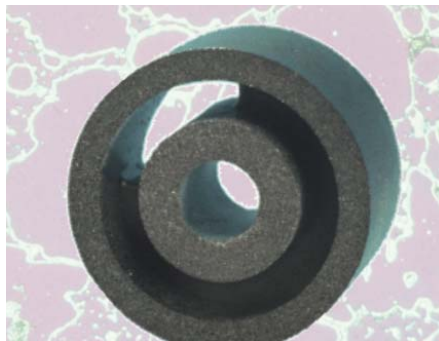


Der neue Pfiff des Materialverbunds

■ *Das Ganze ist mehr als seine einzelnen Teile: Bosch-Forscher kombinieren verschiedene Materialien und deren Eigenschaften zu neuen, maßgeschneiderten Werkstoffen. Damit verbessern sie nicht nur die Funktion etablierter Kfz-Bauteile. Mancher Fortschritt, wie bei der Diesel-Direkteinspritzung, ist ohne die neuen Verbundwerkstoffe erst gar nicht möglich.*

Verbundwerkstoffe sind die neuen Champions der Materialforscher bei Bosch: Wo früher Metalle, Keramiken und Kunststoffe als homogene Werkstoffe verwandt wurden, kombinieren die Forscher heute zunehmend die Eigenschaftsprofile dieser drei Materialien zu so genannten Verbundwerkstoffen. Reduziertes Gewicht, geringer Verschleiß, somit längere Lebensdauer, kostengünstige Bauteile und nicht zuletzt gänzlich neue Materialeigenschaften sind einige der Früchte ihrer Forschungsarbeit, die Wissenschaftler und Entwickler bei Bosch nun ernten.

Beispiel Diesel-Direkteinspritzung nach dem Common-Rail-Prinzip: Um die Vorzüge dieses Einspritzkonzepts auszunutzen, muss das Timing der Ventilschaltzeiten äußerst präzise ausfallen. Herzstück des Ventils ist der Magnettof, in dem die Spule für das Anheben der Ventlnadel aufgewickelt ist. Wäre der Magnettof aus massivem Eisen gefertigt, entstünden störende Wirbelströme im Material, die den Schaltvorgang verzögern. Bosch-Forscher umgehen dieses Problem, indem sie feine Eisenpartikel mit Kunststoff umhüllen und zu einem Verbundwerkstoff verarbeiten. Dies geschieht durch Pressen von kunststoffüberzogenem Eisenpulver und anschließender Vernetzung der Polymere im Bauteil. Der Pfiff des Ganzen liegt in der Kombination der Materialeigenschaften: Die Kunststoffmatrix isoliert die Eisenpartikel voneinander und unterbindet Wirbelströme. Der hohe Anteil an Eisen sorgt für die nötige Magnetisierung und die schnelle Kraftübertragung auf die Ventlnadel.



Der Magnettof aus einem Metall-Polymer-Verbundwerkstoff (lichtmikroskopische Gefügeaufnahme im Hintergrund) erhöht die Dynamik der Ventilschaltzeiten von Einspritzsystemen.

Für stark verschleißbeanspruchte Bauteile, die beispielsweise hohen Reibkräften ausgesetzt sind, entwickelt Bosch auch Verbundwerkstoffe mit Metallmatrix. Eine keramische Phase macht das Material hart und verschleißresistent, während die Metallmatrix mit ihrer hohen Wärmeleitfähigkeit die Reibungswärme abführt. Dazu wird Keramikpulver zu einem offenporigen Material gepresst und anschließend mit einer Aluminium-Schmelze durchsetzt. So entsteht ein maßgeschneiderter Werkstoff, der die Bauteile zudem deutlich leichter macht als die klassischen Materialien Stahl oder Gusseisen.

Die Forscher berechnen mittels Computersimulation je nach Anwendung ein „ideales“ Gefüge für den Verbundwerkstoff, leiten davon die relevanten Eigenschaften ab und optimieren die Herstellungstechniken für die neu erschaffenen Materialien.

Editorial

■ *Dr. Gerhard Benz
Leiter Forschung Chemie,
Werkstoffe, Technologie
Zentralbereich Forschung
und Vorausentwicklung*



Maßgeschneiderte Werkstoffe

In den letzten Jahrzehnten haben Verbundwerkstoffe, Keramiken und polymere Materialien gegenüber etablierten Eisen- und Stahlwerkstoffen kräftig an Bedeutung gewonnen. Diese „jungen Werkstoffe“ erlauben es, Eigenschaftsprofile in weiten Grenzen maßzuschneidern. So ist die Hochleistungskeramik ein wahres Multitalent. Sie ist sehr hart und verschleißfest, hochtemperatur- und korrosionsbeständig und kann in ihren physikalischen Eigenschaften stark variiert werden.

Verbundwerkstoffe mit einer metallischen und einer keramischen Komponente erweitern die Palette des Maßschneiderns: So enthalten Weichmagnete für schnelle Hochleistungsaktoren kleinste Reineisenkörner mit keramischer Oberflächenschicht, die den magnetischen Fluss gut leiten, störende Wirbelströme aber reduzieren.

Mit der Plasma-Dünnschichttechnik können auf metallischen Bauteilen keramische Beschichtungen aufgetragen werden, die zu herausragenden Eigenschaftsprofilen führen. Beispiele sind Titanitridbeschichtete Hochleistungsbohrer. Oder mit reibbarem, verschleißfestem Kohlenstoff beschichtete Teile für Komponenten der Einspritztechnik. Diese Techniken des „Surface Engineering“ erweitern die maßgeschneiderten Werkstoffe um maßgeschneiderte Oberflächen und ermöglichen Hochleistungserzeugnisse mit herausragenden tribologischen Eigenschaften.

Harte Schichten für hohe Beanspruchungen

■ *Hauchdünne Beschichtungen geben Kfz-Bauteilen ein deutliches Mehr an Härte und Verschleißfestigkeit. Das ist nur scheinbar ein Detail. Denn mit ausgeklügelten Beschichtungstechnologien leisten Bosch-Forscher und -Entwickler einen wesentlichen Beitrag, damit Komponenten länger halten und höheren Ansprüchen genügen. In der Folge werden Fahrzeuge sparsamer im Verbrauch und abgasärmer.*

Preisfrage: Wie hängt die ab 2005 verschärfte Abgasnorm (Euro IV) mit der Oberflächenbeschichtung bestimmter Bauteile einer Einspritzpumpe zusammen? Die Materialwissenschaftler von Bosch wissen da Genaueres: Die neuen Anforderungen an geringere Emissionen von Benziner und Diesel werden mit konstruktiven Maßnahmen gemeistert, die zu immer höheren Einspritzdrücken führen. Und damit Bauteile wie Pumpenkolben den extremen Belastungen standhalten, werden sie mit maßgeschneiderten Oberflächentechniken veredelt. Bisherige Materialien geraten nämlich langsam an ihre Grenzen. Zug- und Verschleißfestigkeit, Härte und Abrasionsbeständigkeit sind fast ausgereizt.

Bosch-Forscher und -Entwickler haben nun neue, maßgeschneiderte Oberflächenwerkstoffe im Blick, deren Eigenschaften und Herstellungstechniken sie auf die jeweilige Applikation abstimmen. Unter dem Namen „Surface Engineering“ ist es ihr Ziel, Oberflächeneigenschaften unabhängig vom Volumenmaterial eines Bauteils einzustellen. Dies hat gleich mehrere Vorteile: Das Volumenmaterial wird für den Herstellungsprozess des Bauteils optimiert. Es muss sich in der Serienfertigung gut bearbeiten lassen, weist eine Grundhärte auf und kann unter Kostengesichtspunkten „günstig“ beschafft werden. Die aufgebraute Oberflächenschicht übt hingegen den Kontakt zur Umgebung aus, muss sowohl dicht und korrosionsfest als auch reibarm und verschleißbeständig sein.

Extrem harter, hochlegierter Stahl lässt sich beispielsweise schwer bearbeiten. Deshalb greifen die Ingenieure zu einem kostengünstigen, leicht bearbeitbaren Grundstoff, der mittels „Surface Engineering“ eine funktionale Oberfläche erhält. Die Oberfläche eines Pumpenkolbens der Pumpe-Düse-Einheit bei der Diesel-Direktspritzung ist beispielsweise extrem belastet. Drücke von über 2000 bar liegen auf Flächen an, die dicht sein müssen. Daher

werden engste Passungen benötigt. Die Flächen von Pumpenkolben und Gegenpart müssen perfekt aufeinander gleiten – ohne Verschleiß und Abrieb. Das macht nicht jeder Werkstoff mit. Extrem harte und robuste Oberflächen sind gefragt. Bosch-Forscher konzentrieren sich hier – neben den klassischen Hartstoffbeschichtungen mit Titanitrid – auf den so genannten Diamant-ähnlichen Kohlenstoff (DLC = Diamond-like carbon). Diese Kohlenstoffmodifikation ist quasi ein Mittelding zwischen Graphit und Diamant. Ihre Härte überragt herkömmliche Materialien bei

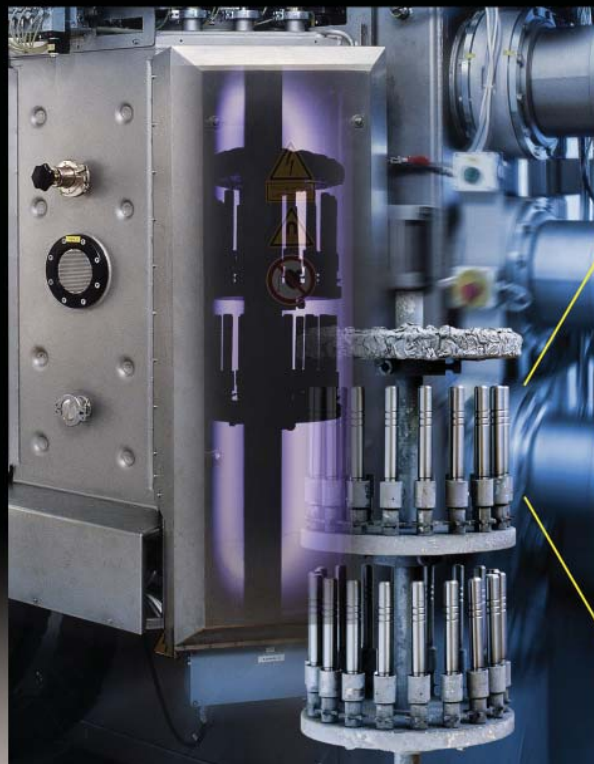
Weitem, wenngleich es an die Härtegrade von rund 8000 HV des Edelsteins nicht herankommt. Mit 3500 bis 4000 HV liegt DLC deutlich über den klassischen Hartstoffbeschichtungen wie Titanitrid, Titanaluminiumnitrid und Titanchromid. Zum Vergleich: Edelstahl liegt bei unter 900 HV. Ein weiterer Vorteil der DLC-Schicht: Sie bringt exzellente Gleiteigenschaften ähnlich dem Graphit mit.

Für sehr präzise, hochbelastete mechanische Bauteile ist DLC also derzeit das Nonplusultra. Doch um diesen Vorteil zu nutzen, müssen andere verfahrenstechni-

Maßgeschneiderte Oberflächen

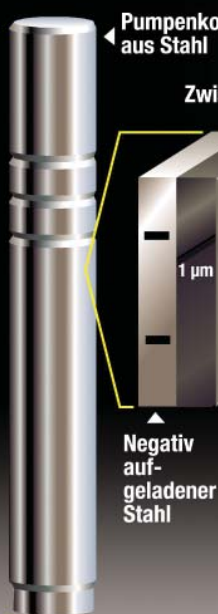
Plasmabeschichtungsanlage

Robust und verschleißresistent: Mit optimierten Prozessparametern wird die Oberfläche (im Bild: Pumpenkolben) für die Anwendungsanforderungen abgestimmt.



Ionenbombe elektrische Fe

Dichte und Energie bestimmen Verne Kohlenstoffschicht



sche Klippen umschiffen werden. Da viele Stahlwerkstoffe oberhalb von 250 Grad Celsius ihre Grundhärte einbüßen, fällt die für Diamantabscheidungen benutzte Methode des Chemical Vapour Deposition (CVD) aus. Sie arbeitet bei über 800 Grad Celsius. Mit einem plasmagestützten Verfahren haben die Bosch-Forscher jedoch eine Lösung gefunden, bei der die Bauteile nicht zu stark erwärmt werden.

Mit diesem Beschichtungsverfahren kann der Materialüberzug in seinen Eigenschaften genau eingestellt werden. In einem Plasma werden Gasmoleküle in ihre Bestandteile Kohlenstoff und Wasserstoff zerlegt. Durch ein elektrisches Feld wird die Oberfläche des Werkstücks mit geladenen Kohlenstoff-Ionen bombardiert. Dichte und Energie dieser Ionen sind nur zwei Parameter, die das Eigenschaftsprofil der aufzubauenden Schicht beeinflussen. Der Einbau von Wasserstoff in die Schicht ist nicht zu vermeiden. Seine Anwesenheit begründet die Instabilität der Schichten oberhalb 350 Grad Celsius. Da diese Temperaturen in realen Anwendungen nicht auftreten, stellt dies kein Problem dar. Die Vorteile des Ionenbeschusses liegen indes-



Verschleißtest an einer dünnen DLC-Schicht.

sen auf der Hand: Die DLC-Schichten weisen eine hohe Dichte und damit Härte auf und sind für extreme Verschleißbelastungen geeignet. Zudem haben Bosch-Forscher die Plasmabeschichtung für einen hohen Durchsatz in der Fertigung optimiert.

Mit ihrem Know-how für harte und verschleißarme Schichten können die Materialwissenschaftler von Bosch schon frühzeitig in die Entwicklung neuer Bauteile einbezogen werden. Der Konstruktionsingenieur beschreibt die Anforderungen an Werkstoffe und Oberflächen. Welche Belastungen treten auf – beispielsweise zwischen Pumpenkolben und Zylinder, zwischen Nocken und Stößel? Durch die genaue Analyse aller Parameter in der Reibpaarung und durch Verschleißversuche am Modell gewinnen die Forscher und Entwickler die nötigen Informationen, um maßgeschneiderte Oberflächen herzustellen.

Häufig wird für Verschleißversuche die so genannte „Stift-Scheibe-Anordnung“ verwendet, bei der wie im Bild oben rechts sichtbar ein Stift oder eine Kugel mit hoher Kraft gegen eine rotierende Scheibe gedrückt wird. Sind beide Teile aus unbehandeltem Stahl, so reibt sich die Kugel an der Auflagestelle ab und die Scheibe erhält eine kreisförmige Verschleißspur. Überzieht man die Scheibe mit einer dünnen DLC-Schicht, so vermindert sich nicht nur der Verschleiß an der Scheibe sehr deutlich, sondern auch an der Kugel oder dem Stift, obwohl diese nicht beschichtet wurden.

Harte Schichten aus Kohlenstoff: In einer Vakuumanlage wird das Bauteil zunächst durch Argonbombardement gereinigt. Das Plasma bricht die kohlenstoffhaltigen Gasmoleküle in Ionen auf, welche durch ein elektrisches Feld auf die Oberfläche gezogen werden. Durch ein Argonbombardement wird die Schicht weiter verdichtet. Zusätzlich können in die Kohlenstoffschicht andere Metalle eingelagert werden, die zuvor über einen Sputtervorgang in das Plasma eingebracht werden.

Der Fachmann spricht vom „reduzierten Gegenkörperverschleiß“ als einem großen Vorteil der DLC-Schichten. So braucht man in einer Hochdruckpumpe nur den Kolben zu beschichten und schützt damit auch die Innenfläche des Zylinders.

Um je nach Anwendung die Eigenschaften von DLC-Schichten zu variieren, können andere chemische Elemente eingebaut werden. So erhöhen Metalle die Elastizität und Zähigkeit und verbessern die Leitfähigkeit der Schicht. Dazu werden aus einer Metall-Kathode mit Argon-Ionen entsprechende Metall-Ionen herausgeschlagen und in die DLC-Schicht mit eingelagert.

Durch die technischen Fortschritte bei den Verschleißschutzschichten gelingt es den Bosch-Forschern, trotz steigender Belastungen vieler mechanischer Bauteile, deren Lebensdauer und Zuverlässigkeit weiter zu verbessern. Materialwissenschaft und moderne Beschichtungstechnologien sind damit entscheidende Stützen für den Konstrukteur von leistungsfähigen und kraftstoffsparenden Aggregaten der Benzin- und Diesel-Einspritztechnik von Kraftfahrzeugen.

Hart wie Diamant

■ *Diamond-like carbon (DLC)*

An die Härte eines Diamanten reichen DLC-Schichten zwar nicht ganz heran, doch mit den klassischen Hartstoffschichten (TiN, CrN) halten sie allemal mit. Dabei haben sie die Gleiteigenschaften einer geschmierten Oberfläche und sind chemisch sehr beständig. Durch ein Plasmaverfahren lassen sich die DLC-Schichten auf Werkstückoberflächen abscheiden. Wegen ihrer überragenden Materialeigenschaften reicht ihr industrieller Einsatzbereich von präzisen und hoch beanspruchten Kfz-Komponenten bis hin zu extrem dünnen Schutzschichten auf Festplatten für Datenspeicher.

ment im
ld

ie der Kohlenstoff-Ionen
tzung und Härte der
nt auf dem Substrat.

Plasmawolke

Argon

Kohlenstoff-Ion

1-3µm

Diamond-like carbon (DLC)

Vor der Beschichtung mit Kohlenstoff wird durch ein Bombardement mit Argon-Ionen die Oberfläche des Bauteils gereinigt.

Schichtaufbau im Röntgenlicht

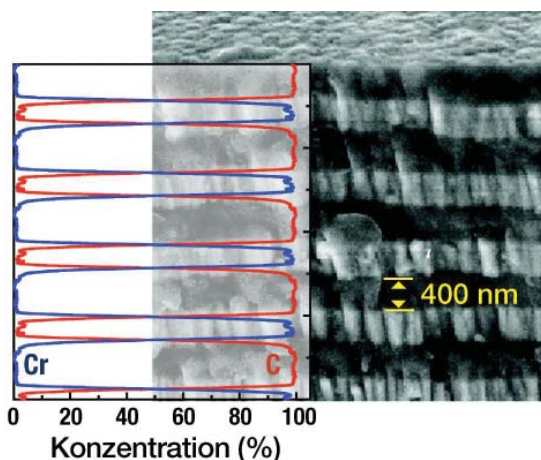
■ *Mit modernen Analysetechniken gehen Bosch-Forscher dem auf den Grund, was Werkstoffe und Schutzbeschichtungen im Innersten zusammenhält. Damit erarbeiten sie die Grundlage für langlebige und robuste Produkte.*

Ohne die modernen Methoden der chemischen und physikalischen Oberflächenanalytik würden Forscher und Entwickler von neuen Werkstoffen und Beschichtungen quasi im Dunklen stehen: Die Materialien würden zwar ihren Zweck und ihre Funktion erfüllen, doch keiner wüsste „warum“. Aufgabe der Analytik ist es, Licht in das Dunkel zu bringen, also die Materialien zu charakterisieren und wesentliche Parameter zum Verständnis ihrer Eigenschaften herauszuarbeiten. Aus welchen chemischen Elementen sind sie zusammengesetzt? Sind die Grenzflächen zwischen den Schichten scharf, oder gehen die Materialien ineinander über und haben miteinander chemisch reagiert? Gerade das Aufwachsen von Schichten ist kritisch. Wenn sich instabile Zwischenschichten bilden, droht der „Eierschaleneffekt“: Die Schicht platzt ab. Bilden sich Risse? Liegen verschiedene kristalline Phasen vor? Welchen Einfluss hat die Kristallitgröße des Materials?

Licht ins Dunkel bringen – das verstehen die Bosch-Forscher wörtlich: Mit Röntgenstrahlen unterschiedlicher Energie „beleuchten“ sie die Werkstoffe. Dabei dringen die Forscher in immer kleinere Dimensionen vor. Mit ESCA (Elektronenspektroskopie zur chemischen Analyse) ist es möglich, die chemische Zusammensetzung von nur drei Nanometern (Millionstel Millimeter) dicken Schichten qualitativ und quantitativ zu bestimmen. Dabei löst die Röntgenstrahlung aus der Oberfläche so genannte Photoelektronen heraus, die analysiert und ihrer Energie nach den chemischen Elementen zugeordnet werden. Die drei Nanometer Informationstiefe entsprechen etwa 10 Atomlagen in einer Beschichtung. „Tieferliegende“ Informationen erhält man, indem die obersten Atomlagen durch Ionenbeschuss (Sputtern) abgetragen und mit ESCA die nächste zugängliche Ebene untersucht wird. Das ist insbesondere bei der Tiefenprofilierung von Multilagenschichten erforderlich. Schichtsysteme mit besonderen

verschleiß- und korrosionsbeständigen Eigenschaften wie Kohlenstoff/Chrom oder Titanaluminiumnitrid/Chromnitrid können so erfolgreich analysiert werden. Die Untersuchungsergebnisse helfen, optimierte Beschichtungen für die geforderten Anwendungen zu erzielen: Exaktes Schichtwachstum und definierte Grenzflächen.

Doch eine Methode vermag nicht sämtliche Fragestellungen zu lösen. Das Know-how der Bosch-Materialforscher besteht



Der chemische Aufbau einer C/Cr-Verschleißschicht (elektronenmikroskopische Aufnahme) offenbart sich durch die Tiefenprofilanalyse mittels ESCA (links).

darin, die relevanten Analyseverfahren geeignet zu kombinieren. Um neben der Elementzusammensetzung auch noch die chemische Bindungsform genauer zu bestimmen, wird die Röntgenbeugung (XRD) eingesetzt. Sie macht zum Beispiel klar, ob Titan metallisch oder als Nitrid vorliegt, und um welches der zahlreichen Titanitride es sich handelt. Darüber hinaus kann mit XRD auch die Kristallitgröße im Nanometerbereich bestimmt werden.

Auch der räumliche Aufbau einer Schicht, beispielsweise die innere Kornstruktur oder die Oberflächentopografie, ist wichtig für ihre Funktion. Diese Eigenschaften werden per Elektronenmikroskop oder Rasterkraftmikroskop ausgemessen. Meist ergeben sich erst aus der Kombination mehrerer dieser Analyseverfahren eine korrekte Beschreibung der Materialprobe und damit Lösungsansätze zur Verbesserung ihrer Eigenschaften.

In Kürze

■ Datenbus für hohe Sicherheit

Seit Juni 2001 ist Bosch Mitglied im FlexRay-Konsortium zur Entwicklung und Standardisierung eines Bussystems hoher Datenrate für sicherheitskritische Anwendungen. Typische Anwendungen von FlexRay sind X-by-Wire-Systeme und integriertes Chassis-Management. Partner im Konsortium sind DaimlerChrysler, BMW, General Motors, Motorola und Philips. Die Abteilung Informations- und Systemtechnik im Zentralbereich Forschung und Vorausbildung koordiniert die Aktivitäten innerhalb von Bosch und vertritt die Interessen der Firma im Konsortium.

Termine

■ 28. bis 29. Januar 2002

Gael le Hen und Roberto Sorito referieren in Stuttgart auf der Konferenz „Collaborative engineering“ über „Digital Mock-Up-basierte Kooperation bei Bosch – Ideen und Konzepte für zukünftige Arbeitsweisen“.

■ 11. bis 12. März 2002

„Magnetische Weg- und Winkelsensoren in der Kfz-Technik, Prinzipien und Anwendungen“ sind das Thema von Klaus Marx, Anton Dukart, Franz Jost, Hartmut Kittel und Henrik Siegle auf der ITG-Fachtagung Sensoren und Mess-Systeme in Ludwigsburg.

Impressum

■ Herausgeber:

Robert Bosch GmbH, Stuttgart

■ Verantwortlich für den Inhalt:

Dr. Wolf-Dieter Haecker

Leiter des Zentralbereichs
Forschung und Vorausbildung

■ Redaktionelle Bearbeitung, Gestaltung:

Medien-Service Wissenschaft,
Stuttgart

■ Anfragen zu dieser Ausgabe:

Robert Bosch GmbH

Dr. Gerhard Benz

FV/FL1

Postfach 10 60 50

D-70049 Stuttgart

Telefon: 0711 8 11 - 64 60

Telefax: 0711 8 11 - 76 23

E-Mail:

Gerhard.Benz@de.bosch.com