

Potentiale für den Leichtbau durch Beschichtung von Kunststoffen

Thomas Sander und Sandro Wartzack
*Lehrstuhl für Konstruktionstechnik;
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg*

1 Einleitung

Die Metallisierung von Kunststoffbauteilen ist ein häufig angewandtes Verfahren, welches derzeit überwiegend zur Aufwertung der optischen Eigenschaften und Verbesserung von Haptik, Oberflächenhärte und chemischer Resistenz Verwendung findet. Doch die metallischen Schichten mit den zugehörigen Nitriden und Karbiden können auch Steifigkeit, Resonanzfrequenz und Festigkeit der Bauteile verändern. In diesem Beitrag werden Potentiale und Problematiken von Dünnschichten auf Kunststoffbauteilen für den Leichtbau erarbeitet. Zunächst wird auf die Grundidee mit Möglichkeiten bezüglich der Werkstoffauswahl eingegangen. Anhand eines Demonstrators werden dann analytisch und numerisch bestimmte Leistungsmerkmale von beschichteten Bauteilen mit einer unbeschichteten Referenz verglichen und so die theoretische Leistungsfähigkeit der Schichten aufgezeigt. Im Anschluss werden die Problematiken des Ansatzes herausgestellt, abschließend zusätzlich integrierbare Funktionen durch die Beschichtung genannt und mögliche Anwendungen vorgestellt.

2 Grundidee

Metallische Schichten werden auf Kunststoffen üblicherweise elektrochemisch oder mittels PVD-/PACVD-Verfahren abgeschieden. Bei der Beschichtung gelangt das Schichtmaterial entweder im Sichtlinienverfahren auf

die äußersten Mantelflächen oder bei den chemischen Beschichtungsverfahren auch auf die gesamte Bauteiloberfläche. Auf die Flächen- und Torsionsträgheitsmomente nehmen gerade die äußeren Mantelflächen großen Einfluss, da sie am weitesten vom Flächenschwerpunkt entfernt sind. Zusätzlich sind Elastizitäts- und Schubmodul der metallischen Schichten um ein Vielfaches höher als die der Polymere, wie Tabelle 1 zu entnehmen ist. Aus diesem Grund können auch sehr dünne Schichten als tragende Strukturen bei der Bauteilauslegung berücksichtigt werden.

Tabelle 1: Elastizitätsmoduln und Dichten der betrachteten Werkstoffe

Werkstoff	ASA	Chrom	Titan	CrN	TiN
E-Modul in 10^3 GPa	2,6	15	105	400 [1]	250 [2]
Dichte in g/cm^3	1,1	7,1	4,5	6,1	5,2

3 Schichtauswahl

Bei galvanischen Schichten ist eine Vielzahl an kommerziellen Standardschichten verfügbar. Man ist jedoch bei diesem Verfahren an Schichtwerkstoffe gebunden, welche elektrochemisch abgeschieden werden können. Auch die Substrate müssen vor der Beschichtung elektrisch leitend sein oder zumindest auf der Oberfläche leitend gemacht werden. Bei den PVD-/PACVD-Verfahren kann vor der Beschichtung meist in derselben Anlage eine Plasmavorbehandlung und Konditionierung des Kunststoffes stattfinden, was die Reaktionsfreudigkeit und Haftung zwischen Schicht und Substratoberfläche verbessert, worauf in Kapitel 4.1 näher eingegangen wird. Beim Sputterverfahren, einer Untergruppe der PVD-Verfahren können nahezu alle beliebigen Werkstoffe und Werkstoffkombinationen zerstäubt und als Schicht abgeschieden werden.

Ein quadratisches Vierkant-Hohlprofil aus dem Kunststoff ASA wird einseitig eingespannt und am Ende mit der Kraft $F = 4$ N mittig belastet. Abmessungen und Randbedingungen sind in Bild 1 skizziert. Verglichen wird das unbeschichtete Hohlprofil als Referenz mit den gleichen Bauteilen mit jeweils $5 \mu\text{m}$ dicken Schichten aus Hartchrom, reinem Titan, Chrom-Nitrid und Titan-Nitrid. Hierbei werden die Schichten, wie in Bild 1 rechts im Schnitt grau dargestellt, nur auf der äußeren Mantelfläche angenommen, was einer Beschichtung mit Sichtlinienverfahren, wie etwa dem PVD-Verfahren entspricht. Die beidseitige Zunahme um $5 \mu\text{m}$ an den Außenabmessungen liegt noch

innerhalb des Grundtoleranzgrades IT 7. Die Gesamtmasse des unbeschichteten Demonstrators von 3,85 g wird durch die aufgetragenen Schichten lediglich zwischen 1,17 % bei reinem Titan und 1,84 % bei reinem Chrom gesteigert.

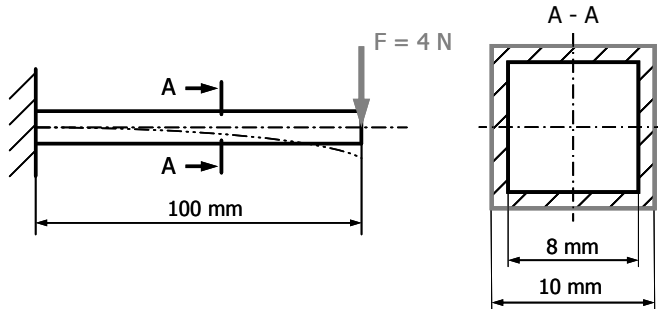


Bild 1: Skizze des eingespannten Demonstrators unter Biegebeanspruchung

3.1 Durchsenkung

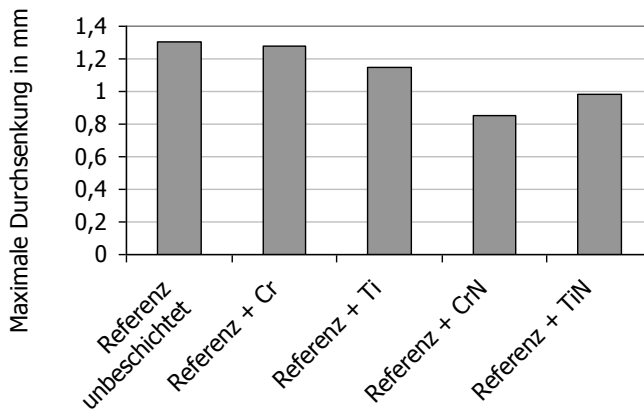


Bild 2: Maximale Durchsenkung bei unterschiedlichen Schichten

Die maximalen Durchsenkungen sind in Bild 2 dargestellt. Sie werden analytisch unter der Annahme ermittelt, dass die Schichten fest auf dem Kunststoffsubstrat haften. Bei der Beschichtung mit Hartchrom wird die maximale Durchsenkung des unbeschichteten Hohlprofils von 1,30 mm um 1,9% reduziert, bei der Beschichtung mit reinem Titan bereits um 12,0 % auf 1,15 mm. Der Effekt wird drastisch gesteigert, wenn anstatt der reinen

Metalle Hartstoffe wie metallische Nitride oder Carbide verwendet werden. So sinkt die Durchsenkung bei Titan-Nitrid als Schichtwerkstoff um 24,6 % auf 0,983 mm und bei Chrom-Nitrid um 34,3 % auf 0,856 mm.

3.2 Spannungen in beschichteten Bauteilen

Bei solch unterschiedlichen Elastizitätsmoduln sind die Spannungen sehr kritisch zu hinterfragen und starke Verformungen der Bauteile als besonders problematisch einzustufen. Bild 3 zeigt die prinzipielle Spannungsverteilung eines unbeschichteten und eines beschichteten Hohlprofils unter Biegebeanspruchung im Vergleich. Beim unbeschichteten Biegebalken steigt die Biegespannung von der neutralen Faser in der Mitte bis zur Aussenkante linear an. Beim beschichteten Biegebalken bildet sich die Spannung bei gleicher Verformung innerhalb des Kunststoffes zunächst identisch aus. An der Grenzfläche zwischen Kunststoff und Schicht steigt der Elastizitätsmodul E bei gleicher Dehnung ϵ um ein Vielfaches an (vgl. Tabelle 1). Nach dem Hookeschen Gesetz $\sigma = E \cdot \epsilon$ ist somit an der Grenzfläche auch ein großer Spannungssprung festzustellen. Da die Schichtdicke von $5 \mu\text{m}$ des Demonstrators grafisch schwierig darzustellen ist, sind die Proportionen in Bild 3 stark übertrieben dargestellt und als Prinzipskizzen anzusehen.

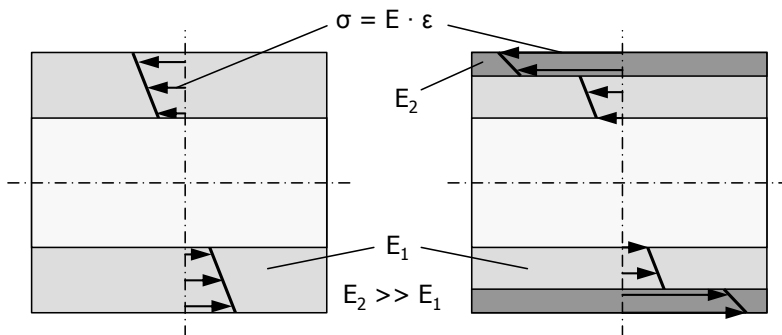


Bild 3: Prinzipielle Spannungsverteilung in einem unbeschichteten und einem beschichteten Biegebalken bei gleicher Verformung

Insbesondere für Schichtmaterialien sind die für die Bauteilauslegung notwendigen Festigkeitskennwerte nur in sehr begrenztem Maße in der Literatur zu finden und stark von den Parametern bei der Abscheidung abhängig. Eine Übersicht der Verfahren zur Bestimmung von Festigkeitskennwerten von dünnen Schichten bietet [3]. Die Kombination des duktilen Kunststoffes mit den steifen, teilweise auch spröden Schichtmaterialien ist mit den

typischen Auslegungskonzepten nur schwer abzubilden. Während die Normalspannungshypothese für sprödes Werkstoffverhalten geeignet ist, liefern Schubspannungs- und Gestaltänderungshypothese nur für duktilen Werkstoffverhalten zuverlässige Ergebnisse. Eine weiterführende Diskussion der bestehenden und die Vorstellung eines neuen vielversprechenden Auslegungskonzeptes ist in [4] zu finden. Nachfolgend werden die maximalen Biegespannungen für den Demonstrator gezeigt, welche analytisch nach dem Vorgehen von [5] berechnet sind.

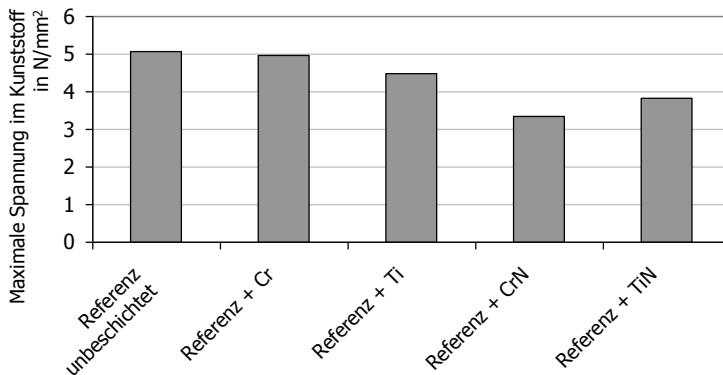


Bild 4: Maximale Biegespannungen im Kunststoff

Betrachtet man die maximalen Biegespannungen im Kunststoff des Demonstrators, so ist festzustellen, dass die Dünnschichten bei gleicher Belastung durch die erhöhte Steifigkeit die Dehnungen im gesamten Bauteil einschränken. Folglich nehmen mit Erhöhung der Steifigkeit die Spannungen ab, was in Bild 4 zu erkennen ist. Bei einer Streckgrenze des Werkstoffes ASA von 53 N/mm² sind die gezeigten Beanspruchungen innerhalb des Kunststoffes unkritisch.

In den Schichten bilden sich jedoch deutlich höhere Spannungen als im Kunststoff aus, wie Bild 5 zeigt. Für Schichten aus Hartchrom werden von kommerziellen Anbietern Zugfestigkeiten von 100 bis 400 N/mm², bei Titan je nach Legierungsbestandteilen zwischen 290 und 930 N/mm² angegeben. Für die nitridischen Schichten lassen sich nur schwer Festigkeitskennwerte recherchieren. Nach [6] korreliert jedoch zumindest für Metalle die Martenshärte (Universalhärte) gut mit der Zugfestigkeit. Unter der Annahme, dass diese Umrechnungsmethode auch für die beiden Hartstoffschichten des Demonstrators die Festigkeitskennwerte abschätzen lässt, erhält man für CrN mit einer Martenshärte von durchschnittlich 10200 N/mm² eine theoretische

Zugfestigkeit von 3169 N/mm^2 und für TiN mit einer Martenshärte von durchschnittlich 14100 N/mm^2 eine theoretische Zugfestigkeit von 8529 N/mm^2 . Aufgrund der sehr hohen Werte sind diese Ergebnisse jedoch als fragwürdig einzustufen und unbedingt durch experimentell ermittelte Messwerte nachzuprüfen.

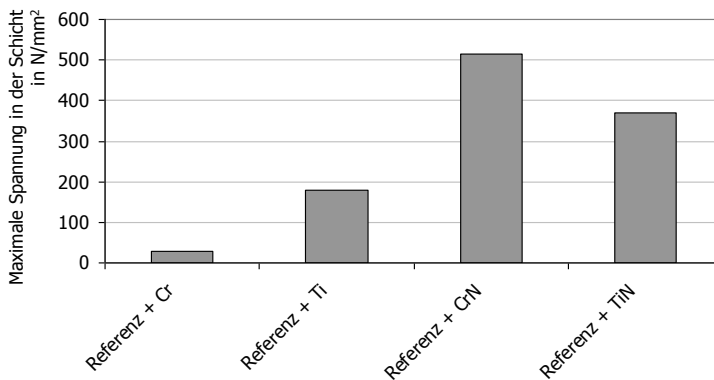


Bild 5: Maximale Biegespannungen in den Schichten

3.3 Eigenfrequenzen

Um den Einfluss der Schichten auf die Eigenfrequenzen festzustellen, wird das Kunststoffhohlprofil des Demonstrators in der FEM-Applikation Pro/Engineer Mechanica in ein Schalenmodell aus Viereck- und Dreieckselementen überführt. Die Schichten werden jeweils separat vernetzt mit den gleichen Elementtypen und -größen und anschließend am Hohlprofil haftend in ein Gesamtmodell überführt. Die Modalanalysen werden mit der Methode der adaptiven Mehrfach-Konvergenz mit einem Konvergenz-Grenzwert für die Frequenz von 5 % durchgeführt. Alle Ergebnisse konvergierten bei einem Polynomgrad zwischen vier und sechs von maximal neun, was auf eine gute Ergebnisqualität hinweist. [7] Betrachtet werden die ersten fünf Eigenfrequenzen im eingespannten Zustand, also die niedrigsten Eigenfrequenzen, welche typischerweise für die Bauteilauslegung am relevantesten sind. Bild 6 zeigt die ermittelten Eigenfrequenzen mit den sich ausprägenden Schwingungsformen. Die Schichten nehmen sichtbaren Einfluss auf die Höhe der Frequenzen. Interessant ist hierbei, dass die Frequenzen im Vergleich zur unbeschichteten Referenz nicht nur ausschließlich gesteigert, sondern durch die Chromschicht sogar gesenkt werden können. Der Grund hierfür ist, dass der Quotient aus Elastizitätsmodul und Dichte bei reinem Chrom unter dem der restlichen Schichtmaterialien und des Kunststoffes ASA liegt. Mit den

Variablen der Schichtdicke und der Auswahl des Schichtwerkstoffes können so die Eigenfrequenzen in gewissem Rahmen gewählt und sehr genau eingestellt werden.

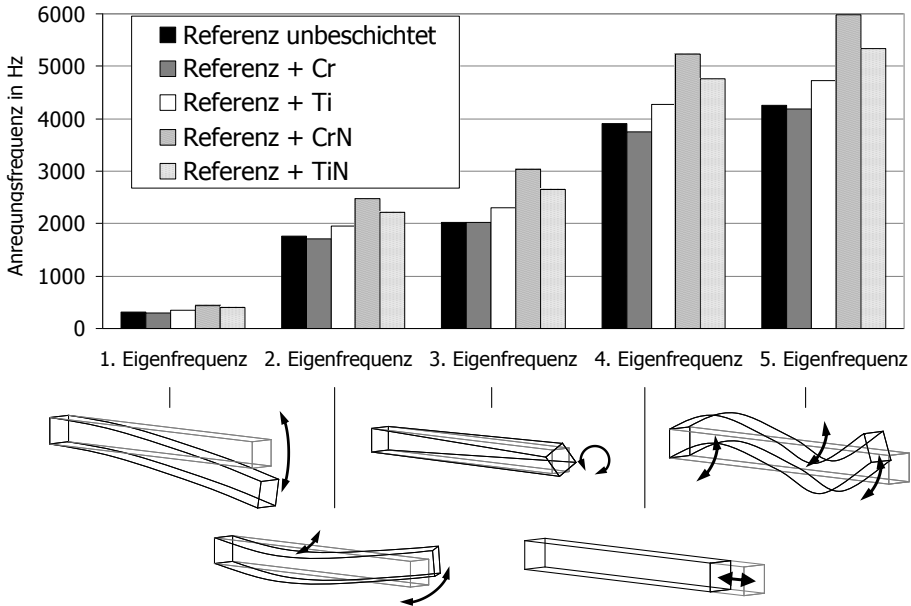


Bild 6: Eigenfrequenzen mit den zugehörigen Schwingungsformen

4 Herausforderungen

4.1 Schichthaftung

Durch die Verformungsbehinderung und dem Sprung der Biegespannungen am Übergang zwischen Schicht- und Substratmaterial entstehen Scherspannungen. Diese müssen von der Übergangszone aufgenommen werden, was oftmals eine große Herausforderung an die Schichthaftung darstellt. Um diese zu verbessern werden vor der Beschichtung häufig aufwendige mechanische und chemische Vorbehandlungen und Plasma-konditionierungen des Substrates vorgenommen. Auch die Erstellung eines Schichtsystems mit Haft- und Zwischenschichten neben der eigentlichen Funktionsschicht, wie in Bild 7 dargestellt, hat sich in der Praxis bewährt. Hierbei können die Haftungsmechanismen zwischen Schicht und Substrat verbessert und zusätzlich, durch geschickte Werkstoffwahl der Zwischenschicht(en), die Spannungssprünge verringert werden.

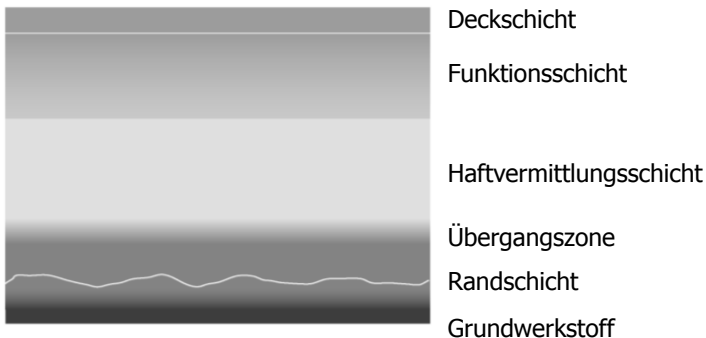


Bild 7: Schematischer Aufbau eines typischen Schichtsystems

Neben den mechanischen Belastungen sind bei der Kombination zweier Materialien mit unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten auch die thermischen Einflüsse zu berücksichtigen, da Temperaturschwankungen elastische Verformungen oder auch irreversible Schäden in Bauteilen hervorrufen können. Wird die Schicht bei einer erhöhten Temperatur abgeschieden, so sind Eigenspannungen im Bauteil sehr wahrscheinlich und zusammen mit den Betriebsbelastungen in die Auslegung einzubeziehen. Auch die Eigen- und Thermospannungen müssen an der Übergangszone aufgenommen oder durch geeignete Wahl von Haft- und Zwischenschichten gemindert werden.

Ein Problem bei der Quantifizierung der Haftfestigkeit sind die mangelnden Charakterisierungsmethoden für Kunststoffsubstrate mit harten Schichten. Während der Stand der Forschung und Technik für die Charakterisierung von Hartstoffen auf harten Substraten wie Keramiken oder vielen Metallen und auch für weiche Schichten wie beispielsweise Lacken auf Kunststoffbauteilen verhältnismäßig weit ist, gibt es nur wenige brauchbare Charakterisierungsmöglichkeiten für die behandelte Problemstellung. Zumindest Prüfkkräfte und Geometrien der Prüfkörper müssen angepasst und im Idealfall genormt werden.

4.2 Wechselnde Schichteigenschaften

Selbst bei scheinbar gleichen Standardschichten, welche von zahlreichen Lohnbeschichtern angeboten werden, sind teilweise erhebliche Unterschiede in den Leistungsmerkmalen und Eigenschaften der Schichten festzustellen. Ein Grund hierfür ist, dass neben der stöchiometrischen Zusammensetzung zahlreiche weitere Parameter Einfluss auf die Schichteigenschaften nehmen. So sind zum Beispiel für die PVD-Beschichtung zahlreiche relevante Ab-

scheideparameter zu nennen wie Betrag und Art der Stromstärke oder die Leistung der Kathoden, Betrag und Art der Biasspannung, Abscheidetemperatur, Prozessdruck und Durchflussmengen der kontrolliert zugeführten Gase. Da die einzelnen Lohnbeschichter ihre Schichten mit verschiedenen Rezepten und auf unterschiedlichsten Anlagen produzieren, sind auch die Abweichungen der Schichteigenschaften nicht verwunderlich. Das Strukturzonenmodell in Bild 8 zeigt anschaulich die Vielfältigkeit der sich ausbildenden Schichtstrukturen bei Änderung des Argondruckes und der Kammer-temperatur während der Schichtabscheidung.

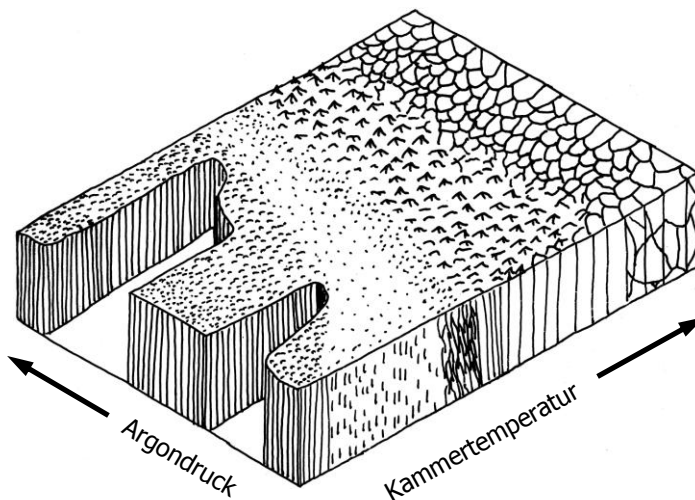


Bild 8: Strukturzonenmodell für gesputterte Schichten nach [8]

Auch die bereits angesprochenen Schichtsysteme können auf unterschiedlichste Weise aufgebaut sein. So können diese einlagig, mehrlagig, nanolagig, einphasig, mehrphasig isotrop oder legiert sein und die Übergänge zwischen den Schichtzonen schlagartig oder gradiert verlaufen. Auch dieser Aufbau des Schichtsystems ist ausschlaggebend für die Eigenschaften der gesamten Schicht.

Eben diese vielfältigen Möglichkeiten der Beeinflussung der Schicht erschweren zum Einen die Auslegung der Bauteile, da Werkstoffkennwerte nicht pauschal sondern immer nur für einen speziellen Schichttyp bestimmt werden können, was den experimentellen Aufwand drastisch steigert. Zum Anderen bieten sie ein sehr großes Potential für Optimierung auf ganz spezielle Anwendungen hin, was dem Gedanken der „Tailored Coatings“ entspricht [9].

5 Mögliche Anwendungen und Integration zusätzlicher Funktionen

Eine große Chance, Schichten wirtschaftlich als Teil der tragenden Struktur zu nutzen ist die Integration zusätzlicher Funktionen. Der Mehraufwand, die Schicht lediglich anzupassen, wenn ohnehin schon eine Schicht zur Sicherstellung einer besonderen Funktion vorgesehen ist, ist deutlich geringer als bei der Planung eines zusätzlichen Beschichtungsprozesses während der Produktentstehung. Als typische Funktionen von Dünnschichten auf Kunststoffteilen sind zu nennen:

- Aufwertung der dekorativen Eigenschaften
- Speicherung von Daten in der Schicht
- Aufwertung der haptischen Eigenschaften
- Erfüllung von optischen Funktionen
- Erhöhung der Biokompatibilität
- Verminderung der Diffusion von Gasen und Dämpfen
- Abschirmung gegen elektromagnetische Strahlung
- Erhöhung der Oberflächenhärte
- Verminderung von Reibung und Verschleiß
- Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeit der Bauteiloberfläche

Wie in den vorigen Kapiteln beschrieben, können Dünnschichten die Steifigkeit von Bauteilen erheblich steigern. Doch bei Belastungen, welche große Verformungen hervorrufen, steigen die Spannungen zwischen Substrat und Schicht und auch innerhalb der Schicht rasch an. Aus diesem Grund eignen sich für das vorgestellte Konzept Anwendungen besonders gut, welche hohe Steifigkeit bei geringer Belastung und Verformung fordern.

Insbesondere im Bereich der optischen Anwendungen könnte auf Kunststoffteilen mit nahezu beliebiger Geometrie eine zum Beispiel spiegelnde Schicht aufgebracht werden. Im Fahrzeugbereich könnten so durch Beschichtung Montageschritte von Halter und Spiegelglas eingespart und neue Freiheiten für Bauteilgestaltung und -design geschaffen werden.

Auch bei der Steigerung der elektromagnetischen Verträglichkeit von elektronischen Bauteilen und Messinstrumenten könnten tragende Schichten verwendet werden. Derzeit werden auf den Gehäusen von Fluginstrumenten meist sehr dünne (einige 10 bis 100 nm dicke), elektrisch leitende Schichten aufgebracht. Hier könnte Kunststoff und Gewicht eingespart werden und zusätzlich störende Eigenfrequenzen gezielt verlagert werden.

Rein dekorative Schichten zum Beispiel auf Gehäusen für Mobilfunktelefone könnten bei entsprechender Anpassung auch die Steifigkeit sowie chemische und mechanische Widerstandsfähigkeit sowie die Kratzfestigkeit erhöhen. Hier ist natürlich die oft gewünschte Abschirmung gegen elektromagnetische Strahlungen der Schicht zu berücksichtigen und die Antenne entsprechend unterzubringen beziehungsweise auszuliegen.

Wälzlagerkäfige positionieren die Wälzkörper zueinander und verhindern so zum Einen den Kontakt zwischen den Wälzkörpern untereinander und sorgen zum Anderen für eine gleichmäßige Lastverteilung. Neben günstigen Standardkäfigen aus Blech kommen auch häufig massive Käfige aus Stahl, Messing, Leichtmetall oder Kunststoff zum Einsatz. Kunststoffkäfige werden überwiegend bei schnell laufenden Lagern verwendet, da hier verhältnismäßig geringe Massenkräfte auftreten [10]. Die Eigenfrequenzen und die Steifigkeit spielen bei Käfigen eine wichtige Rolle und könnten durch Dünnschichten optimiert werden. Zusätzlich könnten Reibung und Verschleiß minimiert und auch die Notlaufeigenschaften verbessert werden. Ein derzeitiges Problem bei Kunststoffkäfigen ist die beschleunigte Alterung bei Schmierung mit bestimmten Ölen und Additiven. Auch hier könnte bei entsprechender Schichtwahl die chemische Beständigkeit und somit auch die Käfiglebensdauer erheblich gesteigert werden.

6 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde anhand eines Demonstrators analytisch und numerisch aufgezeigt, dass Dünnschichten von nur wenigen Mikrometern Schichtdicke auf Kunststoffsubstraten bereits wesentlichen Einfluss auf Steifigkeit, Spannungen und Eigenfrequenzen der Gesamtbaueteile nehmen können - insbesondere Hartstoffschichten mit hohem Elastizitätsmodul und verhältnismäßig niedriger Dichte. Insofern können und sollten sie bei der Bauteilauslegung berücksichtigt und gezielt mit eingeplant werden. Es gilt jedoch auch noch einige Herausforderungen zu meistern. Zunächst müssten die in diesem Beitrag ermittelten Werte durch vergleichbare Experimente validiert werden. Des Weiteren sollten Werkstoffkennwerte zu typischen Schichtwerkstoffen und quantitative Zahlenwerte zu erreichbaren

Haftfestigkeiten für unterschiedlichste Schicht-Substrat-Kombinationen experimentell ermittelt und für die Berechnungen veröffentlicht werden. Im Beschichtungssektor gilt es Schichten und Schichtsysteme den neuen Anforderungen anzupassen und im Idealfall dabei zusätzliche Funktionen zu integrieren um die vorgestellten Anwendungen realisieren zu können.

Literatur

- [1] Holleck, H.: Material selection for hard coatings. J. Vac. Sci. Technol. A 4 (1986) Nr. 6, S. 2661-2669.
- [2] Schatt, W.; Wieters, K.-P.; Kieback, B.: Pulvermetallurgie. 17 Hartstoffe und Hartstoffverbunde. 2. Auflage. Berlin: Springer 2007.
- [3] Brotzen, F.R.: Mechanical testing of thin films. Int. Mater. Rev. 39 (1994) Nr. 1, S. 24-45.
- [4] Tremmel, S.: Ein Beitrag zur Auslegung beschichteter Bauteile unter zyklischer Beanspruchung im Wälz-Gleit-Kontakt. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Dissertation, 2009.
- [5] Richard, H. A.; Sander, M.: Technische Mechanik. Festigkeitslehre. 2. Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner 2008.
- [6] Heermant, C.; Denger, D.: Klassische Werkstoffkennwerte abschätzen. Materialprüf. 38 (1996) Nr. 9, S. 2-6 (Sonderdruck).
- [7] Vogel, M.; Ebel, T.: Pro/Engineer und Pro/Mechanica. Konstruieren und Berechnen mit Wildfire 4. 5. Auflage. München: Carl Hanser Verlag 2009.
- [8] Thornton, J.A.: Influence of apparatus geometry an deposition conditions on the structure and topography of thick sputtered coatings. J. Vac. Sci. Technol., 11 (1974) Nr. 4, S. 666/670.
- [9] Tremmel, S.; Hetzner, H.; Sander, T.; Schulz, E.: Tailored Coatings – Konstruieren von und Konstruieren mit Beschichtungen. In: Meerkamm, H. (Hrsg.): Design for X – Beiträge zum 19. Symposium. Neukirchen: Lehrstuhl für Konstruktionstechnik, 2008, S. 23/36.
- [10] Schaeffler KG (Hrsg.): Wälzlager. HR 1. 1. Auflage. Herzogenaurach 2008.