

## „TAILORED COATINGS“ – KONSTRUIEREN VON UND KONSTRUIEREN MIT BESCHICHTUNGEN

*Stephan Tremmel, Harald Hetzner, Thomas Sander, Edgar Schulz*

### Zusammenfassung

Der nachfolgende Beitrag erläutert, warum maßgeschneiderte PVD-/PACVD-Schichtsysteme, sogenannte „*tailored coatings*“, als ein Konstruktionselement zu verstehen sind. Anhand ausgewählter Beispiele wird das Konstruieren *von* und das Konstruieren *mit* solchen „*tailored coatings*“ verdeutlicht. Außerdem wird gezeigt, wie „*tailored coatings*“ sinnvoll in den Produktentwicklungsprozess eingebunden werden können und wie sie in das DfX einzuordnen sind. Ferner wird analysiert, warum „*tailored coatings*“ trotz ihres Potentials in heutigen Entwicklungs- und Konstruktionsprozessen nur bedingt Berücksichtigung finden. Hieraus werden mögliche Stoßrichtungen für zukünftige wissenschaftliche Arbeiten abgeleitet.

### 1 Einleitung

Im Hinblick auf Leichtbau und Effizienz werden insbesondere im Fahrzeugbau, aber auch im Maschinenbau Komponenten zunehmend höher beansprucht. Dies gilt bei bewegten und sich kontaktierenden Komponenten gleichermaßen für die Bauteile selbst als auch für deren Oberflächen. Die Anforderungen an leistungsfähigere Oberflächen beziehen sich dabei sehr oft auf Reibungs- und Verschleißreduzierung, um den Wirkungsgrad oder die Lebensdauer technischer Systeme zu erhöhen. Zur Verwendung kommen daher mehr und mehr, dünne, tribologische PVD-/PACVD-Beschichtungen<sup>1</sup>, vor allem kohlenstoffbasierte Schichtsysteme (umgangssprachlich oft als „DLC-Schichten“<sup>2</sup> bezeichnet). Diese erlauben in weitaus größerem Umfang als andere bekannte Oberflächenverfahren die gezielte Adaption der Oberfläche an den jeweiligen tribologischen Anwendungsfall. Man kann somit zu Recht von maßgeschneiderten Beschichtungen oder „*tailored coatings*“ reden. Durch die wachsende Verbreitung solcher „*tailored coatings*“ und angesichts der sich hieraus ergebenden neuen Möglichkeiten werden sie auch – und nicht zuletzt! – für die Konstruktionstechnik interessant. Sie müssen in zunehmendem Maße als Konstruktionselement verstanden und wahrgenommen werden. Dabei ist zu unterscheiden zwischen dem Konstruieren *von* solchen Schichtsystemen und dem Konstruieren *mit* diesen Schichtsystemen.

Nachfolgend soll der Gedanke „Schichtsysteme als Konstruktionselement“ näher ausgeführt und in den Kontext der Konstruktionstechnik gestellt werden. In Wissenschaft und industriellem Alltag ist dies bisher bedauerlicherweise weitgehend unterblieben, wie zahlreiche Gespräche der Autoren mit Industrievertretern zeigen. Anhand einiger ausgewählter Beispiele wird die Leistungsfähigkeit von „*tailored coatings*“ demonstriert. Anschließend wird ein kleiner Einblick in das Konstruieren *von* und das Konstruieren *mit* diesen Schichtsystemen gegeben. Eine Schwachstellenanalyse bestehender Entwicklungsprozesse bildet schließlich die Grundlage für die Definition zukünftiger Handlungsfelder im Hinblick auf Entwicklungsmethodik und Prozessgestaltung sowie Versuchstechnik und Simulation.

---

<sup>1</sup> PVD = Physical Vapour Deposition, Physikalische Dampfphasenabscheidung. PACVD = Plasma-assisted Chemical Vapour Deposition, Plasmaunterstützte Chemische Dampfphasenabscheidung.

<sup>2</sup> DLC = Diamond-like carbon, diamantartiger Kohlenstoff. Dieser Begriff ist nach VDI-Richtlinie 2840 [1] im Fachgebrauch nicht mehr zu verwenden.

## 2 „Tailored Coatings“ als Konstruktionselement

### 2.1 Begriff und Verständnis

Sowie Materialwissenschaft und Produktionstechnik es erlauben, durch Schichtsysteme technische Oberflächen von Bauteilen gezielt, anwendungsbezogen und weitgehend unabhängig von Form und Werkstoff des jeweiligen Bauteils zu beeinflussen, ist es legitim, solche Schichtsysteme als eigenständiges Maschinenelement, oder allgemeiner, als Konstruktionselement anzusehen. Obgleich keine exakte Definition der Begriffe „Maschinenelement“ oder „Konstruktionselement“ existiert, wird hierunter in der Fachliteratur, angelehnt an den Elementbegriff der Chemie, ein kleinster, nicht mehr sinnvoll zu zerlegender und in gleicher oder ähnlicher Form immer wieder zu verwendender Baustein im technischen Anwendungsbe- reich verstanden, [2], [3], [4]. Diese Definition trifft auf Schichtsysteme zu.

Im Fall dünner PVD-/PACVD-Schichtsysteme – nur von diesen soll im Folgenden die Rede sein – vollzog sich der Schritt aus den Laboren in die technische Anwendung vor etwa 30 Jahren, [5]. Seitdem hat sich eine rasante Entwicklung vollzogen: Die Anzahl der Schichtsysteme hat sich vervielfacht, ebenso hat sich deren Qualität erheblich verbessert und heutige Produktionsanlagen erlauben die Beschichtung von Bauteilen auch in sehr großen Stückzahlen. Prognosen lassen erwarten, dass PVD-/PACVD-Schichtsysteme vielen anderen Verfahren zur Oberflächenmodifikation deren heutigen Rang ablaufen werden, [6].

Diese PVD-/PACVD-Schichtsysteme als Konstruktionselement zu begreifen wurde in Erlangen frühzeitig aufgegriffen, [7]. Der Gedanke hat sich mittlerweile an verschiedenen weiteren Stellen „etabliert“, z. B. [8], [9]. In Anlehnung an den fertigungstechnischen Fachbegriff „*tailored blanks*“ für maßgeschneiderte Blechplatinen als Halbzeug vorzugsweise für die Automobilindustrie [10] soll im Folgenden für PVD-/PACVD-Schichtsysteme, insbesondere für kohlenstoffbasierte PVD-/PACVD-Schichtsysteme, von „*tailored coatings*“ im Sinne eines Konstruktionselements gesprochen werden. Zwei Beispiele verdeutlichen, wofür „*tailored coatings*“ stehen und warum sie als Konstruktionselement angesehen werden können.

### 2.2 Beispiel: „Tailored Coatings“ als Konstruktionselement im Motorenbau

Im Hinblick auf Kraftstoffreduzierung und Minderung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes werden zahlreiche Anstrengungen unternommen, den Wirkungsgrad von Verbrennungsmotoren zu erhöhen. Neben der Verbesserung des thermischen Wirkungsgrades kommt der Reibungsreduzierung und damit der Verringerung mechanischer Verluste eine zentrale Bedeutung zu. So haben verschiedene Untersuchungen gezeigt, dass der Ventiltrieb von herkömmlichen Ottomotoren in den häufig genutzten niederen Drehzahlbereichen bis zu 25% der motorischen Reibungsverluste verursacht, [11], [12], vgl. Bild 1 (links). Ein wesentlicher Anteil an diesen Reibungsverlusten ist auf den Kontakt zwischen Nocke und Nockenfolger zurückzuführen. Aufgabe des Konstrukteurs ist es also, hierfür bessere, d. h. weniger verlustbehaftete Lösungen zu finden. Beschränkt man sich an dieser Stelle einmal auf Lösungskonzepte, die auf mechanischen Wirkprinzipien basieren, so standen dem Konstrukteur bisher im Wesentlichen die beiden Maschinenelemente „Tassenstößel“ und „Rollenschlepphebel“ zur Verfügung, vgl. Bild 1 (Mitte). Unter dem Gesichtspunkt Reibungsminimierung ist der Rollenschlepphebel dem Tassenstößel eindeutig vorzuziehen. Allerdings sind mit dem Rollenschlepphebel gewisse Nachteile (Dynamik, Kosten) verbunden. An dieser Stelle kommt das Konstruktionselement „*tailored coatings*“ zum Einsatz. Tassenstößel, die mit einer geeigneten, an das jeweilige Belastungskollektiv angepassten Beschichtung versehen sind, erlauben die Realisierung von Tassenstößelventiltrieben, die bezüglich reduzierter Reibung in den Bereich der Rollenschlepphebel vordringen, Bild 1 (rechts), [14]. Diese vergleichsweise kostengünstige Alternative vermeidet gleichzeitig die erwähnten Nachteile im Hinblick auf die Dynamik; somit bietet sie ein sehr gutes Kosten-Nutzen-Verhältnis.

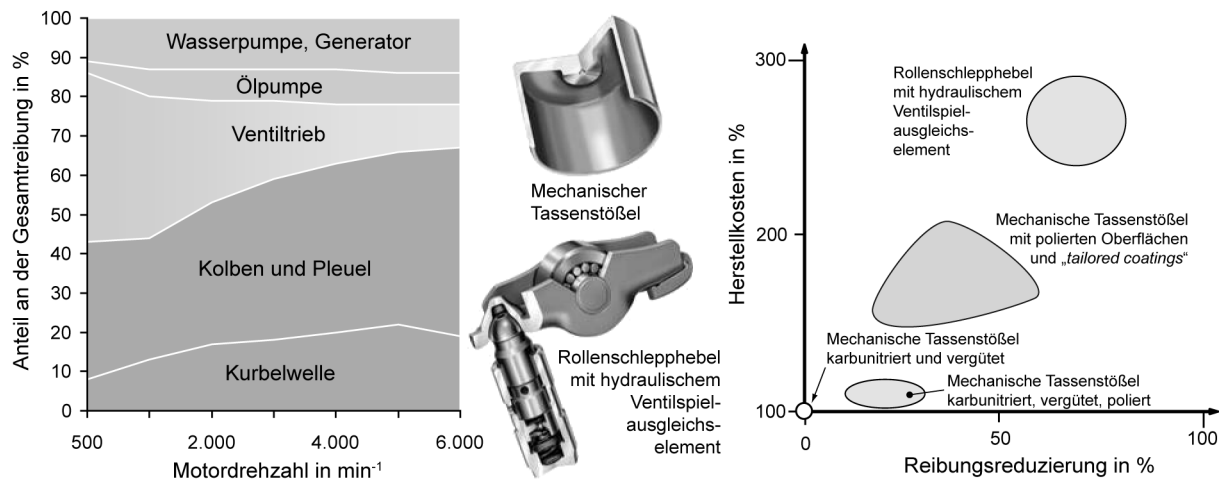


Bild 1: „Tailored coatings“ im Motorenbau. Links: Anteil Ventiltrieb an innermotorischer Gesamtreibung nach [11]. Mitte: Tassenstößel, Rollenschlepphebel, [13]. Rechts: Kosten-Nutzen-Verhältnis bei Tassenstößeln mit „tailored coatings“, nach [14].

### 2.3 Beispiel: „Tailored Coatings“ als Konstruktionselement in der Antriebstechnik

In den letzten Jahren haben rotatorische Magnetlager einen erheblichen Aufschwung genommen. Sie werden bei schnell laufenden Rotoren aller Art, z. B. Zentrifugen oder Werkzeugspindeln, eingesetzt. Neben ihrer hohen Präzision und den sehr geringen Reibungsverlusten zeichnen sie sich prinzipbedingt auch durch Verschleiß- und Schmierstofffreiheit aus. Ungünstig ist dagegen ihr Notlaufverhalten. Ein Ausfall der Magnetlagerung einer schnell rotierenden Welle hätte unabsehbare Folgen für die betroffene Anlage und deren Umgebung. Aus diesem Grund werden Magnetlager zusätzlich mit so genannten Fanglagern versehen. Hierunter versteht man in der Regel Wälzlager, meist vollkugelige Rillenkugellager, die im Regelbetrieb zwischen Lagerinnenring und Wellensitz einen kleinen Luftspalt aufweisen. Bei Ausfall der Magnetlagerung wird der Luftspalt durch die absinkende Welle überbrückt und die Fanglager übernehmen das kontrollierte Herunterfahren der Welle. Die Beanspruchungen und Beschleunigungen dieser Lager sind extrem. Wie jedes Wälzlager müssen auch Fanglager geschmiert werden. Durch den Stillstand der Lager findet jedoch keine gleichmäßige Verteilung des Schmierstoffs im Lager statt, außerdem unterliegt der Schmierstoff Alterungseffekten, was wiederum Wartung erforderlich macht. Die oben genannten prinzipbedingten Vorteile des Magnetlagers werden hierdurch zum Teil wieder aufgehoben. An dieser Stelle kommt das Konstruktionselement „tailored coatings“ zum Einsatz. Eine geeignete, an die beschriebenen, speziellen Randbedingungen angepasste Beschichtung, z. B. auf den Wälzkörpern oder auf Innen- und Außenring des Fanglagers, erlaubt den Verzicht auf Schmierstoff. So kann ein Konstruktionselement durch ein anderes substituiert werden, wobei die Mehrkosten der Beschichtung für diese Sonderanwendung vertretbar sind, sofern dadurch Wartungsfreiheit der gesamten Lagereinheit gewährleistet werden kann.

## 3 Einblicke in das Konstruieren von und das Konstruieren mit „Tailored Coatings“

### 3.1 Einordnung in das DfX

Ohne an dieser Stelle eine Gewichtung der zahlreichen DfX-Kriterien vornehmen zu wollen, nehmen das beanspruchungsgerechte und das fertigungsgerechte Konstruieren eine zentrale Stellung innerhalb der DfX-Rosette ein, vgl. Bild 2 (links). Erst das beanspruchungsge-

rechte Konstruieren ermöglicht funktionierende und langfristig zuverlässig arbeitende technische Systeme. Neben Festigkeits-, Steifigkeits- und Schwingungsaspekten kommt im Rahmen des beanspruchungsgerechten Konstruierens meist auch tribologischen Aspekten sehr große Bedeutung zu. Das fertigungsgerechte Konstruieren andererseits bildet die Grundlage dafür, dass ein entwickeltes technisches System überhaupt in der gewünschten Weise realisierbar ist und technisch-wirtschaftlich möglichst optimal hergestellt werden kann. Insbesondere das Konstruieren mit „tailored coatings“ ist schwerpunktmäßig in den Bereichen des beanspruchungsgerechten und des fertigungsgerechten Konstruierens anzusiedeln, wie Abschnitt 3.4 zeigt. Beim Konstruieren von „tailored coatings“ kommt Werkstofffragen neben Beanspruchung und Fertigung eine herausragende Bedeutung, Bild 2 (rechts).

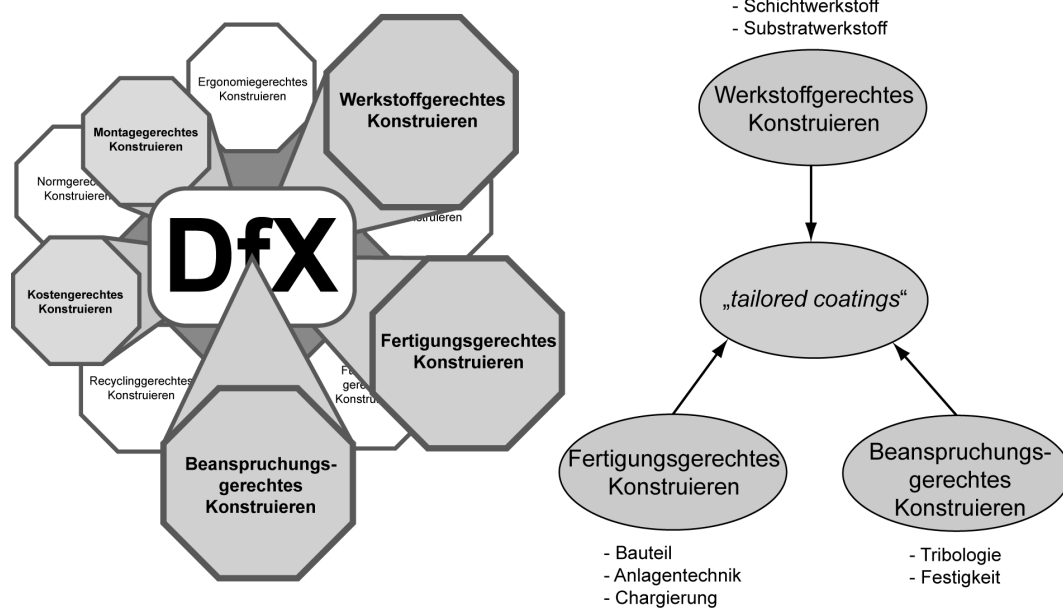


Bild 2: Einordnung in das DfX

### 3.2 Einbindung in den Produktentwicklungsprozess

Heute werden „tailored coatings“ meistens als notwendiges Übel und „Add-on“ verstanden, welches immer erst dann zum Einsatz kommt, wenn existierende Konstruktionen ertüchtigt werden müssen, um die Funktion bei gegebenen Randbedingungen mit ausreichender Lebensdauer sicherstellen zu können. Diese Herangehensweise führt oftmals zu keinem zufriedenstellenden Ergebnis und schadet dem Ruf von „tailored coatings“.

#### Frühe Phasen

In erfolgreichen Entwicklungsprozessen werden „tailored coatings“ bereits frühzeitig, d. h. in lösungsneutralen bzw. geometriearmen Phasen berücksichtigt. Das beginnt bei der Anforderungsdefinition an das Produkt in der Planungsphase und reicht bis zur Einbindung in Wirkstrukturen und Prinziplösungen. Für die Planungsphase bedeutet dies, dass Belastungen, Kinematik, Umgebungseinflüsse etc. aber auch Stückzahlen u. ä. möglichst exakt zu erfassen bzw. zu definieren sind. Hierfür haben sich die nach Hauptmerkmalen strukturierten Anforderungslisten, wie von PAHL und BEITZ [15] empfohlen, bewährt. Sie können nach den Erfahrungen der Autoren in ihrer Struktur unverändert sowohl für das Konstruieren von als auch für das Konstruieren mit „tailored coatings“ übernommen werden. Insbesondere für den erstgenannten Fall empfiehlt es sich ferner, auf die an der Systemtheorie orientierte Beschreibung tribologischer Systeme zurückzugreifen, wie sie von CZICHOS [16] vorgeschlagen und von MUSAYEV [17] erweitert wurde. Letztere greift den Gedanken von „tailored coatings“ als eigenständiges Konstruktionselement auf. Die Berücksichtigung des Konstruktionsele-

ments „*tailored coatings*“ in der abstrakten Konzeptphase erscheint dagegen erheblich schwieriger. Zur Unterstützung des Entwicklers bei der diskursiven Lösungsfindung ist es sinnvoll, „*tailored coatings*“ in gängige Konstruktionskataloge aufzunehmen. Als ein weiterer, womöglich geeigneter Ansatz erscheint den Autoren eine letztlich auf HUBKA [18] und RODENACKER [19] zurückgehende Beschreibung des Zusammenhangs von Funktion und Gestalt technischer Systeme, wie sie von der Karlsruher Schule unter ALBERS verfolgt wird. Dieser Ansatz hat sich mittlerweile unter der Bezeichnung „contact & channel model“ (ursprünglich „Modell der Wirkflächenpaare und Leitstützstrukturen“) etabliert, [20], [21]. Grundlage dieses Modells ist die Hypothese, dass ein Konstruktionselement stets aus einem funktionsbeeinflussenden Wirkflächenpaar und einer, generell in Kombination mit diesem Wirkflächenpaar auftretenden Leitstützstruktur besteht. Dem Gedanken aus Abschnitt 2 folgend müsste damit bei „*tailored coatings*“ der Übergangsbereich zum Grundwerkstoff (Interface) und die Deckschicht als Wirkflächen, das Schichtinnere als Leitstützstruktur bezeichnet werden. Anders interpretiert kann man aber auch zu dem interessanten Schluss kommen, dass „*tailored coatings*“ es offenbar erlauben, Merkmale von Wirkflächen unabhängig von der Leitstützstruktur festzulegen und damit deren Eigenschaften zu beeinflussen.

### Späte Phasen

In der Entwurfs- und Ausarbeitungsphase sind „*tailored coatings*“ ganz praktisch zu berücksichtigen. Das Konstruieren von „*tailored coatings*“ kann dabei noch weitgehend parallel bzw. unabhängig von der Bauteilkonstruktion erfolgen. Das Konstruieren mit „*tailored coatings*“ erfordert dagegen eine verhältnismäßig enge Verzahnung zwischen Werkstoff, Gestaltung und Fertigung. Hierauf soll in den beiden folgenden Abschnitten näher eingegangen werden.

### 3.3 Konstruieren von „Tailored Coatings“

Für das Konstruieren von „*tailored coatings*“ sind genaue Kenntnisse über das tribologische System erforderlich, beispielsweise kontaktierende Körper, Zwischenstoffe, Umgebungsmedien, Kinematik, mechanische und thermische Belastungen, usw. Derzeit ist es nicht möglich, das Belastungskollektiv in seiner Gesamtheit durch Simulationen zu ermitteln, d. h. es sind stets Erkenntnisse aus früheren Konstruktionen bzw. Versuchen oder aus geeigneten Modellversuchen erforderlich.

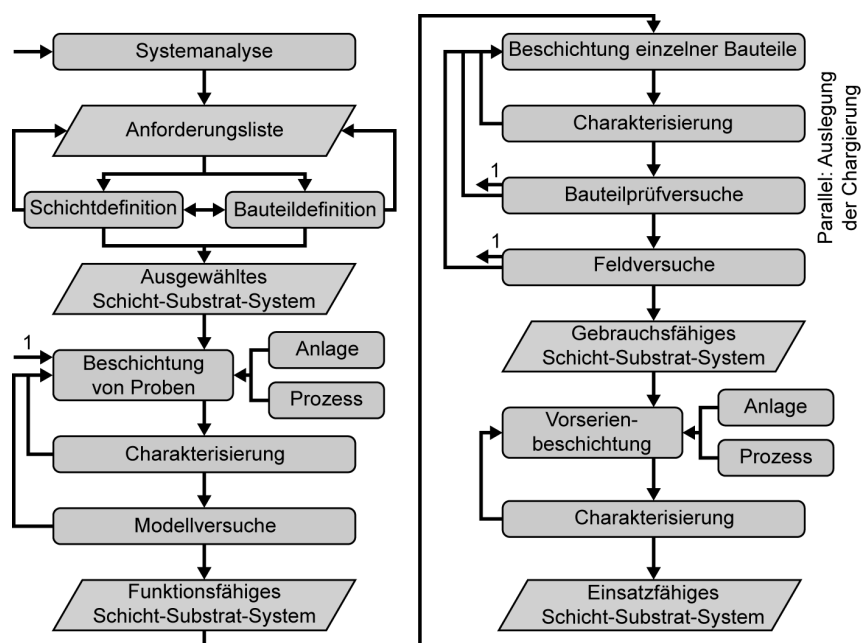


Bild 3: Systematische Entwicklung von „tailored coatings“

In Bild 3 ist ein Ablauf für die systematische Entwicklung von „*tailored coatings*“ vorgeschlagen. Eine weitere Detaillierung ist in [22] zu finden. Aufbauend auf den Anforderungen an das Schichtsystem und basierend auf materialwissenschaftlichen Erkenntnissen sowie Erfahrungen mit früheren Beschichtungen können Schichtsysteme für die jeweilige Anwendung maßgeschneidert werden. Der Entwickler von „*tailored coatings*“ hat dabei unter Berücksichtigung der vorhandenen Anlagentechnologie eine Vielzahl von Variationsparametern zur Verfügung, von denen die wichtigsten nachfolgend genannt seien:

- Wahl des Schichtgrundwerkstoffes sowie Wahl der Dotierungswerkstoffe und damit Vorgabe charakteristischer mechanischer, thermischer, tribologischer und optischer Eigenschaften.
- Wahl des Wasserstoffgehaltes in der Schicht und damit Einstellung von Härte und Duktilität.
- Wahl des Werkstoffs für die Haftvermittlungsschicht sowie deren Ausführung und damit Einstellung der Haftfestigkeit.
- Innerer Aufbau, d. h. Mikro-/Nanostruktur des Schichtsystems sowie Schichtdicke und damit u. a. Beeinflussung des Versagensverhaltens und der Eigenspannungen.

Bild 4 (links) zeigt den prinzipiellen Aufbau von „*tailored coatings*“ sowie Möglichkeiten für die Gestaltung der inneren Struktur, Bild 4 (rechts).

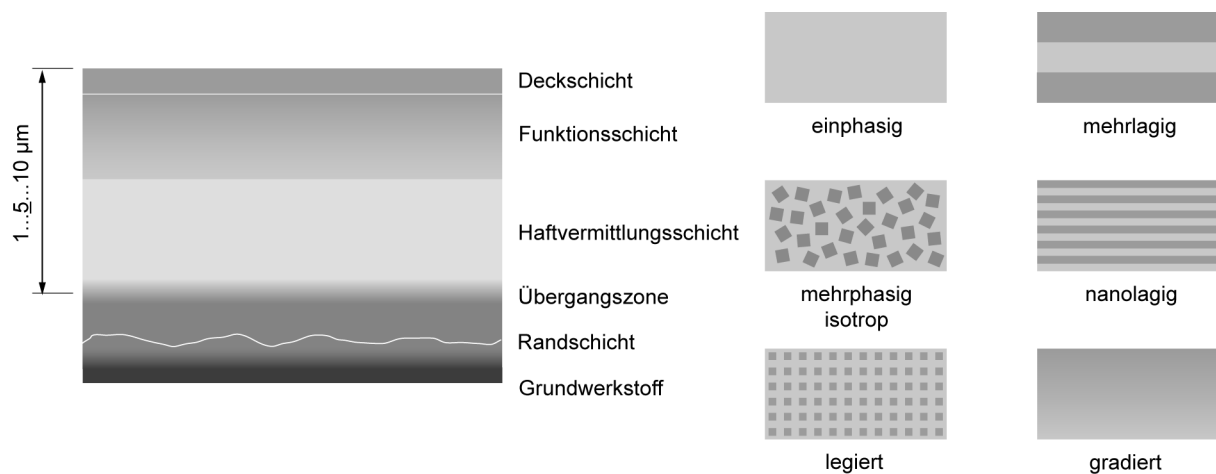


Bild 4: Prinzipieller Aufbau von „*tailored coatings*“

### 3.4 Konstruieren mit „Tailored Coatings“

Wird mit „*tailored coatings*“ konstruiert, so ist die *Beschichtbarkeit* von Bauteilen durch drei wesentliche Faktoren bestimmt: *Beschichtungseignung*, *Beschichtungsmöglichkeit* und *Beschichtungssicherheit*, Bild 5. Die Beschichtungseignung bezieht sich auf Fragen des Schicht- sowie des Bauteilwerkstoffes, insbesondere deren chemische und physikalische Eigenschaften sowie eventuelle weitere Faktoren, etwa Schmierstoffe, Umgebungsbedingungen, u. ä. Die Beschichtungsmöglichkeit beinhaltet die für die Erzeugung geeigneter Schichtsysteme erforderliche Produktionstechnik. Darunter gehören vorbereitende Fertigungsschritte, beispielsweise mechanische Oberflächenbehandlung oder chemische Reinigung ebenso wie die eigentliche Ausführung. Unter Beschichtungssicherheit sind insbesondere die Erfassung des Beanspruchungskollektivs, die Auslegung und die konstruktive Gestaltung des Bauteils zusammengefasst. Eine erfolgreiche Konstruktion berücksichtigt all diese Faktoren frühzeitig. Man spricht dann vom *beschichtungsgerechten Konstruieren*.

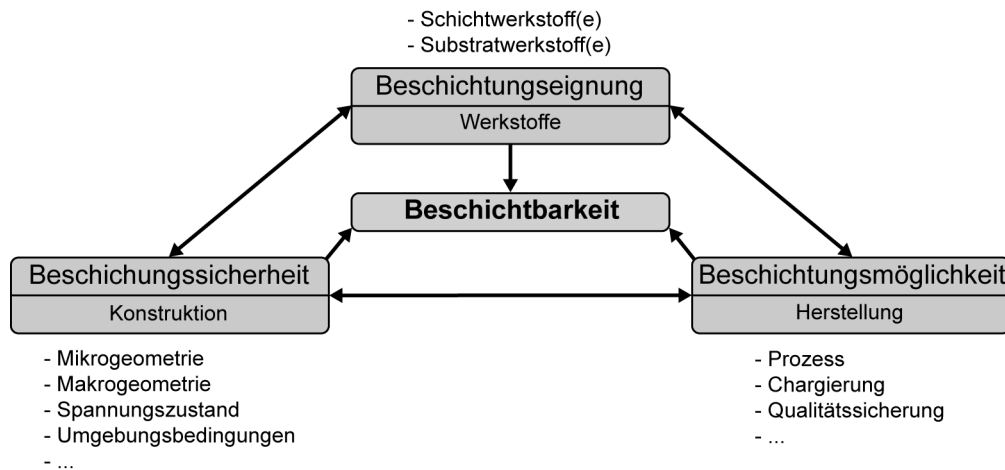


Bild 5: Einflussgrößen auf die Beschichtbarkeit von Bauteilen

Die nachfolgend gezeigten Beispiele verdeutlichen die Wechselwirkungen der genannten Einflussgrößen.

#### Grundwerkstoffwahl

„Tailored coatings“ werden in Vakuumbeschichtungsverfahren hergestellt. Wesentliche Voraussetzung an den Grundwerkstoff ist daher dessen Vakuumtauglichkeit, d. h. der Grundwerkstoff darf im Hochvakuum nicht ausgasen. Als problematisch sind daher poröse Werkstoffe, insbesondere metallische Sinterwerkstoffe, teils auch Gusswerkstoffe oder Keramiken anzusehen, ferner Verbundkonstruktionen, die etwa Metallschäume beinhalten, sowie einige Kunststoffe. Üblicherweise werden „tailored coatings“ bei moderaten Temperaturen im Bereich von 150...300° C erzeugt. Niedrigere Temperaturen sind – bei gewissen Einschränkungen der Schichteigenschaften – prinzipiell möglich, höhere Temperaturen bis etwa 500° C in Sonderfällen erforderlich. Die Temperaturbelastung auf die zu beschichtenden Bauteile ist damit relativ gering. Stähle lassen sich im Allgemeinen problemlos beschichten, auch wenn diese einer vorherigen Wärmebehandlung unterzogen wurden. Das Gleiche gilt für die meisten NE-Legierungen, beispielsweise Kupfer, Aluminium, Magnesium oder Titan. Unkritisch bezüglich der Temperaturbelastung sind auch die meisten Keramiken. Aufgrund ihrer geringen thermischen Belastbarkeit ist dagegen die Beschichtungseignung vieler Kunststoffe nicht gegeben. Zwar lassen sich die mechanischen Eigenschaften von „tailored coatings“ grundsätzlich in einem weiten Bereich einstellen, meistens werden jedoch harte und damit verschleißfeste Schichtsysteme angestrebt. Aufgrund der geringen Dicken von „tailored coatings“ und deren fehlenden Selbsttragfähigkeit muss der Grundwerkstoff eine gewisse Grundhärte aufweisen bzw. die Härte des Schichtsystems muss auf die des Grundwerkstoffs abgestimmt werden. Andernfalls kommt es zum sogenannten Eierschaleneffekt. Dieser beschreibt, dass sich bei Belastung der Grundwerkstoff elastisch oder plastisch verformt und die darüberliegende harte Schicht mangels Stützwirkung einbricht. Für hochbeanspruchte Systeme ist ein gradiertes Härteverlauf mit zunehmender Härte zur Oberfläche hin anzustreben. Dieser kann durch die Kombination verschiedener Verfahren erreicht werden, beispielsweise kann der Beschichtung ein Härte- oder Nitrierprozess vorangestellt werden.

#### Bauteilgrobgestaltung

Bei den PVD-Verfahren zur Herstellung von „tailored coatings“ handelt es sich um Sichtlinienverfahren. Dies bedeutet, dass vorzugsweise diejenigen Flächen eines Bauteils beschichtet werden, die in Richtung der Beschichtungsquellen orientiert sind. Das hat den Vorteil, dass häufig ohne größeren Aufwand gezielt einzelne Funktionsflächen beschichtet werden können. Ist es andererseits erforderlich, komplexere Geometrien homogen zu beschich-

ten, ist eine ggf. auch mehrfache Rotation des gesamten Bauteils notwendig, um die abgeschatteten Bereiche zu den Beschichtungsquellen hin ausrichten zu können. Nachdem die Bauteile hierzu in geeigneter Weise gehalten werden müssen, ist eine völlige Rundumbeschichtung im Allgemeinen nicht bzw. nur durch einen sehr kostenintensiven zweistufigen Prozess möglich. Diesen herstellbedingten Restriktionen ist konstruktiv Rechnung zu tragen, Bild 6.

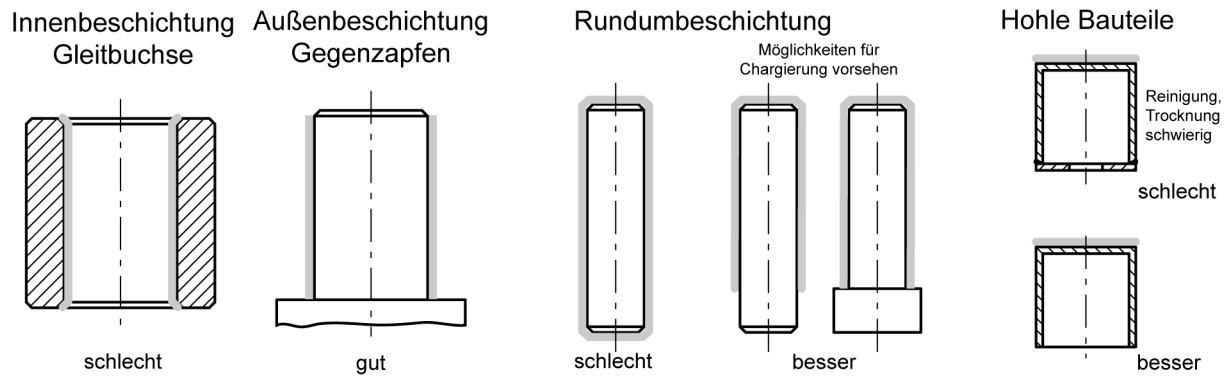


Bild 6: Einige ausgewählte Regeln für die Bauteilgestaltung

Wichtige, hier verkürzt wiedergegebene, Regeln für die Bauteilgestaltung sind:

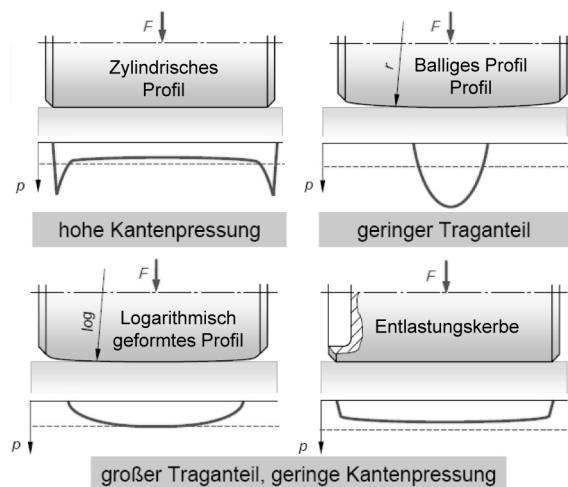
- Die zu beschichtenden Funktionsflächen sind genau zu definieren und in die technische Dokumentation frühzeitig mit aufzunehmen.
- Die zu beschichtenden Funktionsflächen sind möglichst einfach zu halten, so dass eine Ein- oder Zweifachrotation des Bauteils während des Beschichtungsprozesses ausreichend ist. Auf eine Rundumbeschichtung ist nach Möglichkeit zu verzichten.
- An den Bauteilen sind Möglichkeiten für eine leichte Aufnahme vorzusehen.
- Außenflächen lassen sich im Gegensatz zu Innenflächen relativ leicht beschichten. Sofern Innenflächen zu beschichten sind, ist auf ein ausreichend großes Durchmesser-Tiefen- bzw. Breiten-Tiefen-Verhältnis  $\geq 1$  zu achten.
- Kleine Bauteile sind kostengünstiger zu beschichten als große Bauteile. Bei großen Bauteilen ist daher Differentialbauweise anzustreben.
- Schweißbaugruppen sind als besonders kritisch anzusehen, da Lufteinschlüsse und poröse Schweißnähte im Vakuum ausgasen können und auch die Reinigung der Schweißspalte als sehr kritisch anzusehen ist. Daher ist eine Differentialbauweise, z. B. Nutzung von beschichteten Einsätzen, anzustreben.
- Die Bauteile sind vor der Beschichtung einem Reinigungsprozess in Bädern zu unterziehen. Enge Spalte, Löcher und dergleichen lassen sich schlecht reinigen und trocknen. Sie sind daher unbedingt zu vermeiden.

### Bauteilgestaltung

Die Bauteilgestaltung hat erheblichen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit von „tailored coatings“. Bild 7 zeigt ausgewählte Regeln zur beschichtungsgerechten Bauteilgestaltung.



## Kantenpressungen an Übergangsstellen



## Innen- und Außenkanten



## Maßtoleranzen

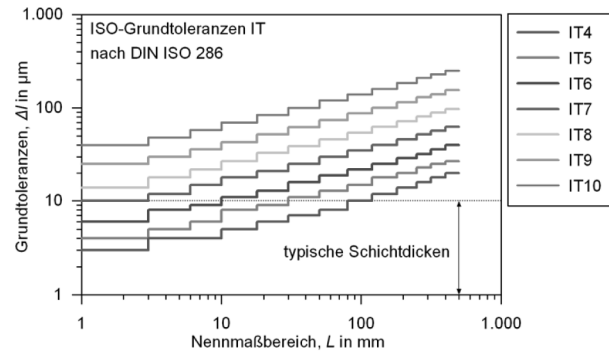


Bild 7: Einige ausgewählte Regeln für die Bauteilfeingestaltung

Ganz allgemein sind in (Relativ-)Kontakten Beanspruchungsspitzen in Übergangsbereichen zu vermeiden. Diese entstehen bei scharf gestalteten Bauteilkanten, bei steifen Übergängen oder kleinen Traganteilen. Durch eine geeignete Formgebung können diese Beanspruchungsspitzen reduziert bzw. vermieden werden.

Generell sollten die zu beschichtenden Funktionsflächen eine sehr hohe Oberflächengüte aufweisen. Der Einsatz entsprechender Fertigungsschritte ist zu berücksichtigen. „Tailored coatings“ bilden die Oberflächentopographie des Bauteils exakt nach. Vorher eingebrachte Strukturen, beispielsweise durch eine mechanische Oberflächenbearbeitung, erlauben somit eine weitere Verbesserung des tribologischen Verhaltens. Ferner besteht die Möglichkeit, „tailored coatings“ nachträglich mittels Laser zu bearbeiten, beispielsweise um zusätzliche Strukturen einzubringen, die als Schmierstoffreservoir oder der Aufnahme von Verschleißpartikeln dienen können, [23].

Während des PACVD-Beschichtungsprozesses entstehen in der Beschichtungskammer elektrische Felder. Die Schichtdicke bildet sich abhängig von der Stromdichteverteilung am Bauteil aus. Hierbei sind scharfe Innen- und Außenkanten als nachteilig anzusehen, da sie Schichtinhomogenitäten verursachen, welche Ausgangspunkt für Schichtversagen unter Belastung sein können. Besser geeignet sind abgerundete oder gefaste Kanten.

Aufgrund ihrer geringen Dicken (im Bereich weniger  $\mu\text{m}$ ) ist der Einfluss von „tailored coatings“ auf Maß- und Formtoleranzen im Allgemeinen zu vernachlässigen. Bei Präzisionsbauteilen, beispielsweise Wälzlagerkomponenten oder bei Steuerkolben von Common-Rail-Injektoren, kann es allerdings erforderlich sein, die Schichtdicke mit zu berücksichtigen bzw. es kann über die Schichtdicke die Fertigungsabweichung eingestellt werden. Aus diesem Grund werden solche Bauteile üblicherweise in Toleranzklassen eingeteilt und entsprechend gepaart.

## Vorausgegangene Fertigungsverfahren

Entscheidend sind weiterhin die dem Beschichtungsprozess vorausgegangenen Fertigungsverfahren zur Endformgebung. So bilden sulfidische oder oxidische Einschlüsse an der Oberfläche, wie sie bei ungünstiger Kombination von Werkstoff und spanender Bearbeitung entstehen können, oder eingebettete Partikel infolge von Schleifen oder Polieren bevorzugte Ausgangspunkte für späteres Schichtversagen im Betrieb. Auch spröde Randschichten, wie

sie beispielsweise beim Erodierschuppen entstehen, sind unbedingt zu vermeiden, da sie zu schlechter Schichthaftung und mangelnder Stützwirkung führen.

## 4 Analyse der gegenwärtigen Situation

Die Beispiele aus Abschnitt 2 verdeutlichen, dass „*tailored coatings*“ im industriellen Alltag teilweise angekommen sind. Außerdem lässt sich erahnen, dass sie noch erhebliches Potential, etwa im Hinblick auf Leichtbau, Leistungssteigerung, Substitution von Schmierstoffen, etc. aufweisen. Gleichzeitig zeigt sich jedoch eine erhebliche Diskrepanz zwischen der grundsätzlich möglichen Leistungsfähigkeit von „*tailored coatings*“ einerseits und dem Umgang mit diesen Schichtsystemen in Entwicklungs- und Konstruktionsabteilungen andererseits. Das hat sich den Autoren im Rahmen verschiedener Industrieprojekte stets aufs Neue bestätigt. Ursächlich sind nach Ansicht der Autoren folgende Aspekte:

### 4.1 Fehlende Kenntnis von der Existenz von „Tailored coatings“

Dieser Punkt ist einerseits zurückzuführen auf die rasch wachsende Zahl von Maschinenelementen, die es Produktentwicklern erschwert, einen fundierten Überblick zu behalten. Ein Beispiel soll das verdeutlichen: In einem der ersten modernen Maschinenelemente-Fachbücher [24] beschreibt CARL VON BACH um 1895 lediglich ca. 15 Maschinenelemente. Heute so selbstverständliche Maschinenelemente wie das Wälzlager sind nicht erwähnt. Rund 70 Jahre später sind ca. 30 verschiedene Maschinenelemente bekannt, [7]. Heute kennen wir alleine rund 25 unterschiedliche Standardwälzlager mit ihren spezifischen Eigenschaften, [26]. Die fehlende Kenntnis ist andererseits auch auf die relative Neuheit von „*tailored coatings*“ zurückzuführen. Durch deren Verankerung in der Ingenieursaus- und -weiterbildung (z. B. in Lehrveranstaltungen und Seminaren<sup>3</sup>) kann dieser Punkt sicherlich entschärft werden. Berücksichtigt man jedoch die durchschnittliche Studiendauer in den Ingenieurwissenschaften sowie das recht zurückhaltende Fortbildungsengagement in der freien Wirtschaft, so ist bezüglich der Verbreitung des Wissens über „*tailored coatings*“ mit einer Verzögerung von wenigstens einigen Jahren zu rechnen.

### 4.2 Mangelndes Bewusstsein für „Tailored coatings“

Obwohl PVD-/PACVD-Schichtsysteme als solche zum Teil in Entwicklungs- und Konstruktionsabteilungen auch schon bekannt sind, beispielsweise als Beschichtungen auf Zerspan- oder Spritzgusswerkzeugen, werden sie doch nicht als eigenständiges Konstruktionselement wahrgenommen. Weder ist der Gedanke, Schichtsysteme überhaupt als Konstruktionselement anzusehen besonders weit verbreitet, noch ist man sich bewusst, dass sie sich heute für die verschiedenen Anwendungen maßschneidern lassen.

### 4.3 Weitgehend fehlende Normung

Viele Konstruktionselemente sind heute durch ein hohes Maß an Normung gekennzeichnet. Typische Beispiele hierfür sind Stifte, Schrauben, Wälzlager, Federn usw. Dimensionierung, Auswahl, ggf. Berechnung, Vergleichbarkeit und Austauschbarkeit werden hierdurch erheblich vereinfacht. Im Bereich von „*tailored coatings*“ dagegen existiert Normung bisher kaum. Der Markt wird dominiert von wenig aussagekräftigen Handelsnamen, aus denen im Allgemeinen nicht einmal eine Klassifizierung hervorgeht. Die Situation ähnelt damit derer bei

<sup>3</sup> Am Lehrstuhl für Konstruktionstechnik der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg wurde bereits 2001 das Thema PVD-/PACVD-Schichtsysteme in knapper Form in die Grundlagenlehrveranstaltung Maschinenelemente I/II integriert. Seit 2008 wird das Thema in einer eigenständigen Lehrveranstaltung „Tribologie und Oberflächentechnik“ in ganzheitlichem Kontext vertieft. Außerdem beteiligt sich der Lehrstuhl am VDI-Seminar „Moderne Schichttechnik für Konstrukteure“.

Schmier- und Klebstoffen. Hierdurch wird es dem Konstrukteur erheblich erschwert, bisweilen unmöglich gemacht, geeignete Schichtsysteme oder Klassen von Schichtsystemen für seine jeweilige Anwendung (vor)auszuwählen.

#### 4.4 Fehlende Methodenkompetenz

Entwicklern und Konstrukteuren fehlt oft die Kompetenz, geeignete Methoden und Werkzeuge im Umgang mit dem Konstruktionselement „*tailored coatings*“ einzusetzen. Zusammen mit Punkt 4.3 ergibt sich damit ein Arbeiten nach dem „trial-and-error“-Prinzip. Als problematisch erweist sich zudem die Tatsache, dass „*tailored coatings*“ im Umfeld verschiedener Fachdisziplinen – Werkstofftechnik, Konstruktionstechnik, Fertigungstechnik – anzusiedeln sind und insofern eine interdisziplinäre Betrachtungsweise erforderlich machen (vgl. insb. Abschnitte 3.3, 3.4). In einigen Fällen ist die Ursache darin zu sehen, dass erforderliche Methoden und Werkzeuge noch nicht existieren (vgl. Punkt 4.5). In den meisten Fällen allerdings existieren Methoden und Werkzeuge, die auch auf „*tailored coatings*“ angewendet oder angepasst werden könnten (vgl. Abschnitt 3.2).

#### 4.5 Unzureichende tribologische Prüftechnik, Simulationstechnik

Für die Entwicklung von „*tailored coatings*“ ebenso wie für deren Qualifizierung sind verschiedene Versuche unabdingbar. Im Idealfall wird hier eine aussagekräftige, jedoch sehr zeit- und kostenintensive Versuchskaskade vom einfachen Modellversuch über Bauteilversuche bis hin zu Feldversuchen durchgeführt. Dieses Vorgehen ist aber nur für die Großserienproduktion – beispielsweise in der Automobilindustrie – oder Sonderanwendungen – beispielsweise in der Luft- und Raumfahrt – vertretbar. Sehr häufig wird sich daher auf stark abstrahierende Modellversuche, beispielsweise Stift-Scheibe-Versuche, beschränkt. Hierbei zeigt sich jedoch, dass diese weitverbreiteten Modellversuche in Bezug auf die Anwendung nur eine sehr beschränkte Aussagefähigkeit besitzen. Kaum eine Alternative stellt derzeit die rechnerunterstützte Simulation dar. Einerseits fehlen geeignete Modelle, beginnend bei einer realistischen Beschreibung des Phänomens Reibung bis hin zur Beschreibung des Versagensverhaltens von „*tailored coatings*“; andererseits fehlen ebenso geeignete experimentelle Möglichkeiten, um erforderliche Werkstoffeigenschaften von „*tailored coatings*“ – beispielsweise für Tragfähigkeits- oder Lebensdaueraussagen – quantitativ zu erfassen. Als nicht weniger problematisch stellen sich der Mangel an geeigneten Simulationswerkzeugen und nicht ausreichende Rechnerkapazitäten (Skalenproblematik) dar.

#### 4.6 Vermeintlich zusätzliche Kosten

Nicht zuletzt ist nach wie vor ein weit verbreitetes Argument, „*tailored coatings*“ würden ein Produkt unnötig bzw. unzulässig verteuern. Dieses Argument basiert auf zwei Fehlannahmen: 1) „*Tailored coatings*“ werden lediglich als „Add-on“ angesehen, somit auch die Herstellkosten. Es unterbleibt in der Regel eine Betrachtung der Lebenszykluskosten. Diese fallen häufig erheblich günstiger aus. 2) „*Tailored coatings*“ werden erst spät im Produktentstehungsprozess berücksichtigt, sie werden nicht als Konstruktionselement aufgefasst. Positive Effekte im Hinblick auf Kosten, wie in Abschnitt 2.1 dargestellt, stellen sich so kaum ein.

## 5 Schlussfolgerungen

Die Leistungsfähigkeit von „*tailored coatings*“ kann als unbestritten angesehen werden, vgl. Abschnitt 2. Wie in Abschnitt 4 ausgeführt, existieren derzeit jedoch verschiedene Schwachstellen in industriellen Produktentwicklungsprozessen bezüglich des Einsatzes von „*tailored coatings*“. Hiervon ausgehend sind zukünftige wissenschaftliche Arbeiten – sowohl theoretischer als auch praktischer Art – in den folgenden Bereichen anzustreben:

## 5.1 Weiterentwicklung der Normung

Zur verbesserten Orientierung für Produktentwickler und Konstrukteure ist es erforderlich, „*tailored coatings*“ besser zu klassifizieren, zu bezeichnen und zu charakterisieren. Einen ersten Schritt in diese Richtung stellt hierbei die VDI-Richtlinie 2840 [1] dar, deren Weiterentwicklung anzustreben ist. So sollte beispielsweise die Bezeichnung komplex aufgebauter Schichtsysteme standardisiert oder die Eigenschaften der jeweiligen Schichtsysteme besser charakterisiert werden. In diesem Zusammenhang sind auch verschiedene Initiativen von wissenschaftlichen Institutionen positiv hervorzuheben, etwa Produktnamensverzeichnisse aufzustellen, z. B. [27]. Das Gleiche gilt für die sich in den vergangenen Jahren herstellerseitig etablierten Auswahlhilfen, z. B. [28]. Aus Sicht der Konstruktionstechnik sind die bestehenden Ansätze allerdings noch nicht ausreichend.

## 5.2 Verbesserte Integration in Entwicklungsprozesse und -werkzeuge

Von wissenschaftlicher Seite ist zu prüfen, inwiefern bestehende Entwicklungsmethoden und -werkzeuge es erlauben, „*tailored coatings*“ schon frühzeitig in die Produktentwicklung einzubinden. Einige grundsätzliche Überlegungen hierzu wurden in Abschnitt 3.2 vorgestellt. Gegebenenfalls sind bestehende Methoden und Werkzeuge anzupassen bzw. zu erweitern. Weiterhin empfiehlt es sich, die Definitionen zweier Rumpfp Prozesse für das Konstruieren *von* und das Konstruieren *mit* „*tailored coatings*“ zu entwickeln. Diese müssen sich anwenderseitig jeweils produkt- und unternehmensspezifisch anpassen lassen.

## 5.3 Geeignete Aufbereitung von Konstruktionsrichtlinien

Für die industrielle Praxis ist es außerordentlich wichtig, Entwicklern und Konstrukteuren Richtlinien zur Verfügung zu stellen, die einen zielgerichteten und iterationsarmen Einsatz von „*tailored coatings*“ erlauben. Diese Richtlinien müssen, wie in Abschnitt 3.4 vorgestellt, zusammengetragen, strukturiert und in geeigneter Form, beispielsweise mittels Assistenzsystem, aufbereitet werden.

## 5.4 Weiterentwicklung der tribologischen Prüf- und Simulationstechnik

Die tribologische Prüftechnik ist dahingehend weiterzuentwickeln, dass Werkstoffkennwerte und Eigenschaften in quantifizierter Form ermittelt werden können. Parallel dazu müssen geeignete Simulationsmethoden entwickelt werden, welche Aussagen zum Betriebsverhalten von „*tailored coatings*“ im Sinne des „predictive engineering“ erlauben. Ziel müssen Tragfähigkeits- bzw. Lebensdaueraussagen für Schicht-Bauteil-Verbünde sein, wie sie beispielsweise aus der Festigkeitslehre oder der Wälzlagerauslegung bekannt sind.

## 5.5 Weiterentwicklung von Anlagentechnik und Schichtsystemen

Selbstverständlich ist an dieser Stelle auch zu erwähnen, dass nicht zuletzt noch erhebliches Potential in der Schichtenwicklung selbst, also dem Konstruieren *von* „*tailored coatings*“ liegt. Dies betrifft das Kohlenstoffgrundgerüst (z. B. tetraedrisch-amorphe Struktur), den Schichtaufbau (z. B. nanolagige Schichtsysteme), die eingesetzten (Dotierungs-)Werkstoffe sowie das gezielte Einbringen von Strukturen in die Bauteiloberfläche vor oder nach dem Beschichten. Ein weiteres Gebiet von Interesse sind grundlegende Untersuchungen zu den Wechselwirkungen zwischen Oberflächenstruktur, „*tailored coatings*“ und Zwischenstoffen. Schließlich ist für eine wirtschaftliche Beschichtung die Weiterentwicklung der PVD-/PACVD-Anlagentechnologie erforderlich. Die betrifft einerseits entsprechende Komponenten (Kathoden, Filter, Chargiereinrichtungen), andererseits die Steigerung der Zuverlässigkeit der Gesamtanlagen. Bei Großserienbeschichtungen ist ferner verstärkt über produktangepasste Anlagen anstelle von Universalanlagen nachzudenken, um Herstellkosten weiter zu senken.

## 6 Literatur

- [1] VDI-Richtlinie 2840. Kohlenstoffschichten – Grundlagen, Schichttypen und Eigenschaften. Ausg. 2005-11.
- [2] MEERKAMM, H.: Skriptum zur Vorlesung Maschinenelemente I und II. Erlangen: Lehrstuhl für Konstruktionstechnik, 5. Aufl., 2003.
- [3] MUHS, D.; WITTEL, H.; JANNASCH, D.; VOßIECK, J.: Roloff/Matek. Maschinenelemente. Normung, Berechnung, Gestaltung. Wiesbaden: Vieweg, 18. Aufl., 2007.
- [4] FELDHUSEN, J.: Gestaltung von Elementen und Systemen (Kapitel 4). In: STEINHILPER, W.; SAUER, B. (Hrsg.): *Konstruktionselemente des Maschinenbaus 1. Grundlagen der Berechnung und Gestaltung von Maschinenelementen*. Berlin: Springer, 7. Aufl., 2008.
- [5] WIJNGAARD, J.H.; SCHÜTZE, A.: Entwicklungen und Trends in der Beschichtungsindustrie. VIP 15 (2003) Nr. 4, S. 194-197.
- [6] DIETZ, T.; ERITT, H.; NOVELLO-VON BESCHERER, W.: Anwendungsfelder moderner Oberflächentechnik bei Anbietern oberflächentechnologischer Leistungen. In: VDI Technologiezentrum (Hrsg.): *Wissenstransfer Oberflächentechnik*. Band 8. Düsseldorf: VDI Technologiezentrum, 2000.
- [7] FRUTH, W.; KRUMPIEGL, T.; MEERKAMM, H.: Tribologische Optimierung von ungeschmierten Lagerkomponenten durch reibungsarme PVD-Verschleißschutzschichten. Tribologie Fachtagung von GfT und DGMK. Göttingen, 30. September/1. Oktober 1997.
- [8] TREUTLER, C. P. O.: Industrial use of plasma-deposited coatings for components of automotive fuel injection systems. Surf. Coat. Technol. 200 (2005), S. 1969-1975.
- [9] MASSLER, O.: Functionality of Coatings in Automotive Applications. 34<sup>th</sup> Int. Conference on Metallurgical Coatings and Thin Films ICMCTF 2007. San Diego, 23.-27. August 2007.
- [10] KORVES, L.; MOHRBACHER, H.: Tailored Blanks – optimierte Bleche für den Automobilbau. In: ThyssenKrupp techforum Dezember 2003, S. 30-33.
- [11] KOCH, F.; GEIGER, U.: Reibungsanalyse der Kolbengruppe im gefeuerten Motorbetrieb. Tribologie Fachtagung von GfT und DGMK. Göttingen, 5./6. November 1996.
- [12] RÜCKAUF, J.; LERCH, B.: Verbrauch und Emissionen senken. Reibungsreduktion bei Ottomotoren. ATZ extra Juni 2008, S. 24-29.
- [13] TREMMEL, S.; MUSAYEV, Y.; HOSENFELDT, T.; CHRISTGEN, W.; MEERKAMM, H.: Friction Reduction in the Valve Train of Modern Combustion Engines Using New Carbon-based Coatings. 6<sup>th</sup> Int. Conference THE coatings 2007. Hannover, 25./26. Oktober 2007.
- [14] IHLEMANN, A.; GEIGER, U.; CHRISTGEN, W.; MÖNIUS, H.: Möglichkeit zur Reduzierung der Reibleistung in Ventiltrieben. 2. VDI Fachtagung Ventiltrieb und Zylinderkopf. Leonberg, 25./26. Oktober 2006.
- [15] PAHL, G., BEITZ, W.; FELDHUSEN, J.; GROTE, K. H.: Konstruktionslehre. Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung. Berlin: Springer, 6. Aufl., 2005.
- [16] CZICHOS, H.; HABIG, K.-H.: Tribologie Handbuch. Wiesbaden: Vieweg, 3. Aufl., 2001.
- [17] MUSAYEV, Y.: Verbesserung der tribologischen Eigenschaften von Stahl/Stahl-Gleitpaarungen für Präzisionsbauteile durch Diffusionschromierung im Vakuum. Dissertation. Universität Erlangen, 2001.

- [18] HUBKA, V.: Theorie technischer Systeme. Grundlagen der wissenschaftlichen Konstruktionslehre. Berlin: Springer, 1984.
- [19] RODENACKER, W. G.; CLAUSSEN, U.: Regeln des methodischen Konstruierens. Mainz: Krausskopf, 1973.
- [20] MATTHIESEN, S.: Ein Beitrag zur Basisdefinition des Elementmodells „Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen“ zum Zusammenhang von Funktion und Gestalt technischer Systeme. Dissertation. Universität Karlsruhe, 2002.
- [21] ALBERS, A.; BURKARDT, N.; OHMER, M.: Approaches for the Synthesis of Technical Systems with the Contact & Channel Model C&CM. 15<sup>th</sup> Int. Conference of Engineering Design ICED 05. Melbourne, 15.-18. August 2005.
- [22] MEERKAMM, H.; STEINMANN, M.; TREMMEL, S.; MÜLLER, A.: Konstruieren mit Beschichtungen. VDI-Seminar Moderne Schichttechnik für Konstrukteure. Reibung und Verschleiß systematisch reduzieren. Braunschweig, 7.-8. Juni 2005.
- [23] SEITZ, A.; TREMMEL, S.; MEERKAMM, H.: Auswirkungen von laserstrukturierten Substratoberflächen auf die tribologischen Eigenschaften beschichteter Gleitpaarungen. Tribologie und Schmierungstechnik, 53 (2006) Nr. 5, S. 13-18.
- [24] BACH, C.: Die Maschinenelemente. Ihre Berechnung und Konstruktion mit Rücksicht auf die neueren Versuche. Stuttgart: Cotta, 4. Aufl., 1895.
- [25] SASS, F.; BOUCHÉ, C.; LEITNER, A. (Hrsg.): Dubbels Taschenbuch für den Maschinenbau. Band 1. Berlin: Springer, 12. Aufl., 1966.
- [26] SCHAEFFLER KG (Hrsg.): Wälzlager. Druckschrift HR 1. Herzogenaurach: 2006.
- [27] <http://www.kohlenstoffschichten.de>
- [28] H-O-T GmbH & Co. KG (Hrsg.): Schichten im Überblick. Druckschrift MB SCH 03. Nürnberg: 2006.

Dipl.-Ing. Stephan Tremmel  
Lehrstuhl für Konstruktionstechnik  
FAU Erlangen-Nürnberg  
Martensstraße 9, D-91058 Erlangen  
Tel: +49-9131-85-23215  
Fax: +49-9131-85-27988  
Email: [tremmel@mfk.uni-erlangen.de](mailto:tremmel@mfk.uni-erlangen.de)  
URL: <http://www.mfk.uni-erlangen.de>