Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt

Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine

Band: 106 (1988)

Heft: 48

Artikel: Physical Vapour Deposition: PVD-Verfahrenstechnik und ihre Anwendung beim Herstellen verschleisshemmender Schichten

Autor: Freller, Hemut

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-85853

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 31.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Physical Vapour Deposition

PVD-Verfahrenstechnik und ihre Anwendung beim Herstellen verschleisshemmender Schichten

Der Begriff PVD (Physical Vapour Deposition) fasst Beschichtungsverfahren zusammen, mit denen Metalle, Legierungen und chemische Verbindungen wie z.B. Halogenide, Sulfide, Selenide, Silizide, Oxide, Nitride und Karbide im Vakuum durch Zufuhr thermischer Energie oder kinetischer Energie mittels Teilchenbeschuss abgeschieden werden. Zu den Vorteilen des sehr umweltverträglichen Verfahrens zählen - neben der grossen Auswahl an Beschichtungsmaterialien - die während des Prozesses in weiten Grenzen einstellbare Temperatur des zu beschichtenden Materials (Substrat) sowie die Möglichkeit der gezielten Beeinflussung bestimmter Schichteigenschaften. PVD findet Anwendung für harte Schutzschichten auf Werkzeugen, für dekorative, abriebfeste und goldähnliche TiN-Schichten, für reibungsarme Schichten, für harte, warmfeste Schutzschichten (z.B. Turbinenschaufeln), für Korrosionsschutzschichten. Die Weiterentwicklung der PVD-Verfahrens-, Anlagen- und Anwendungstechnik ist in vollem Gang.

VON HELMUT FRELLER, ERLANGEN

Die Methoden zur Herstellung dünner Schichten und ihre Anwendungen in der Oberflächentechnik sind so zahlreich, dass wir uns kaum vergegenwärtigen, wie weit sie bereits ein Teil unseres täglichen Lebens geworden sind. Tauchmetallisierungen, Auftragsschweissen, Farb- und Metallspritztechnik gehören ebenso zur Beschichtungstechnik wie die Anwendung galvanischer Korrosionsschutzschichten oder die Abscheidung dünner Halbleiterschichten oder von Metallisierungen bei der Herstellung von Schaltkreisen der Mikroelektronik (Bild 1).

Die Abscheidung von Schichten aus der Dampfphase, die sich in die Hauptzweige physikalische Dampfabscheidung (PVD-Technik) und chemische Dampfabscheidung (CVD-Technik) aufgliedert, gehört zu den jüngeren, technologisch anspruchsvolleren Methoden dünne Schichten abzuscheiden. Insbesondere die PVD-Verfahren, die noch vor 30 Jahren eher ein Experimentier- und Forschungsfeld für Physiker darstellten, haben in den letzten 20 Jahren einen enormen Zuwachs der industriellen Anwendungen gefunden. Dieser Zuwachs war und ist sehr eng mit der Weiterentwicklung hochinnovativer Schlüsseltechnologien, wie der Halbleiterelektronik, der Optoelektronik und der Mikroelektronik verknüpft [1].

Die durch die Wechselwirkung mit diesen Technologien erzielten apparativen und verfahrenstechnischen Fortschritte erlauben heute den Vorstoss dieser als teuer verschrieenen Verfahren in technologische Grenzbereiche der Anwendung dünner Schichten gegen Korrosion, Reibung und Verschleiss, die nach wie vor von älteren, konventionellen Verfahren beherrscht wurden und werden.

Die Bemühungen, Werkzeuge länger haltbar bzw. leistungsfähiger zu machen, reichen weit zurück. Diese Bemühungen waren und sind durch die Schwierigkeit beeinträchtigt, die für die Funktion eines Werkzeuges wichtigen Eigenschaften, wie Härte, Zähigkeit, Reibung und Beständigkeit gegen den bearbeiteten Werkstoff in einem Werkzeug optimal zu kombinieren.

Diese Problematik führte zur Beschichtung von Werkzeugen, da hierdurch eine beanspruchungsbezogene Arbeitsteilung zwischen Oberfläche und Werkzeugvolumen möglich ist. Damit wird die Optimierung der technologischen Eigenschaften wie Härte, Zähigkeit, der chemischen Beständigkeit und geringer Reibung gegen den bearbeiteten Werkstoff in einem Werkzeug wesentlich erleichtert.

Die zunehmende Automatisierung und Verkettung von Fertigungsprozessen führt nun einerseits zu der angestrebten Verringerung der lohnabhängigen Kosten im Fertigungsbereich. Anderseits steigen in der Regel die Fixkosten und die Kosten für Instandhaltung und Maschinenstillstand (Bild 2).

Oder anders ausgedrückt - je höher der Automatisierungs- und Verkettungsgrad einer Fertigung ist, desto mehr Kosten verursacht ein Fertigungsstillstand, der z.B. durch Verschleiss eines Werkzeuges oder eines Maschinenelementes ausgelöst sein kann. Diese Zusammenhänge führten zur Entwicklung immer leistungsfähigerer Beschichtungen, um Werkzeuge und Maschinenelemente mit höherer Verschleissfestigkeit und Zuverlässigkeit zu erhalten.

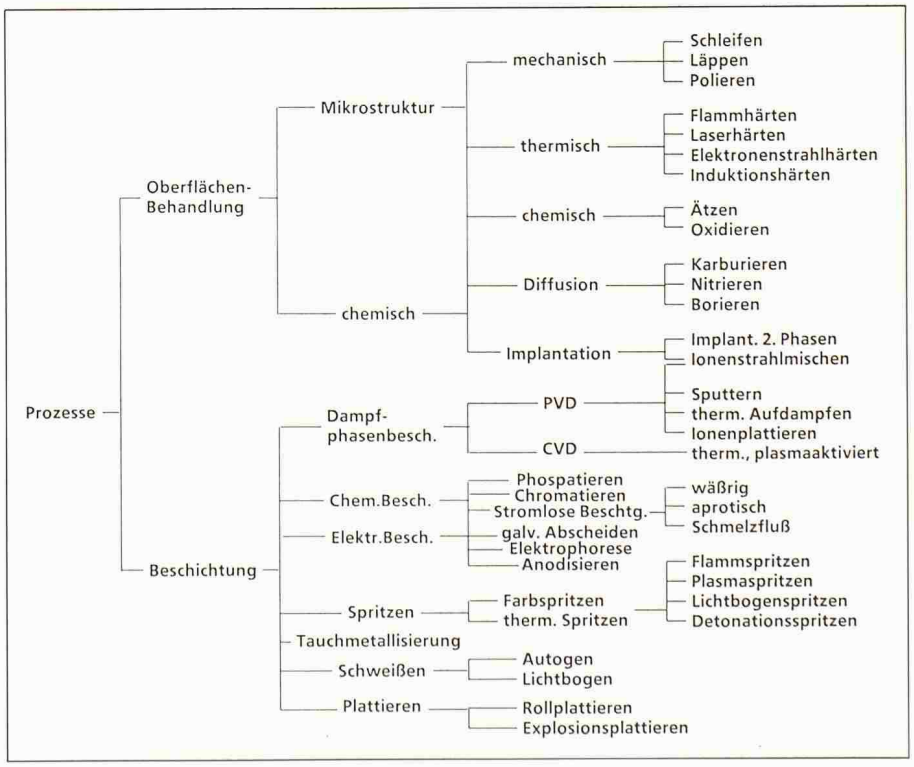


Bild 1. Übersicht Oberflächenbehandlungsverfahren

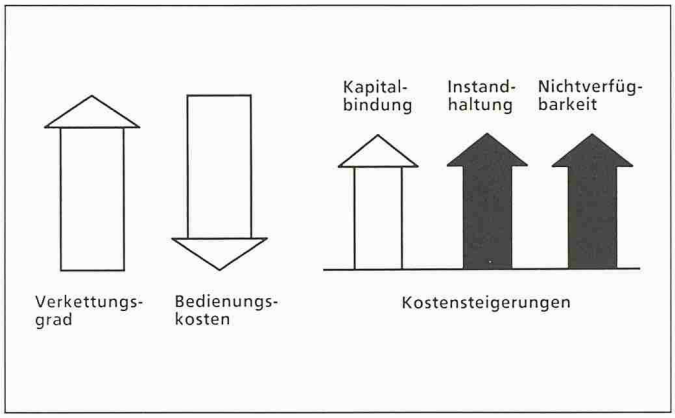


Bild 2. Einfluss der Verkettung und Automatisierung auf die Kostenarten

Prozeßbezeichnung	Materialverdampfung	Material-zerstäubung	Chemische Reaktion	Aktivierung Gasphase
Vakuumverdampfung	⊕			
reaktive Bedampfung	⊕		⊕	
aktivierte reakt. Bed	⊕		⊕	⊕
Sputt.-Beschichtung		↑⊕↓		⊕
reaktiv Sputtern		↑⊕↓	⊕	⊕
Ionenplattieren	⊕	⊕↓		⊕
reaktives Ionenplattieren	⊕	⊕↓	⊕	⊕

Bild 4. Prinzipielle Funktionsmechanismen der PVD-Verfahren

PVD-Verfahren als Beispiel einer Beschichtungstechnologie

Warum überhaupt PVD-Verfahren als neuzeitliches Verfahren zum Verschleissschutz neben den bereits etablierten Verfahren? Ein wesentlicher Nachteil der Verfahren, die heute den grössten Anteil an Verschleissbeschichtungen aufweisen ist, dass sie wegen der Dicke des Auftrages häufig eine Nacharbeit erfordern. Fertig bearbeitete Werkzeuge mit feinen Strukturen sind mit diesen Verfahren nicht zu beschichten. Galvanische Abscheideverfahren ermöglichen keine Abscheidung der harten Nitride, Karbide oder Boride der Übergangsmetalle, die im Verschleissschutz zunehmende Bedeutung gewinnen. Die CVD-Technik, mit der diese extrem harten Oberflächen Einzug in die technische Anwendung gefunden haben, ist auf Grund ihrer hohen Abscheidetemperaturen von ≧ 800 °C für die im Formenbau eingesetzten Werkzeugstähle nur bedingt einsetzbar. Dies ist nur möglich, wenn das Werkzeug und die Toleranzforderungen einen Nachhärteprozess zulassen.

Für die Verschleissminderung dieser Werkstoffgruppe und für die Ausdehnung auf Werkzeuge der spanlosen Umformtechnik, für die noch in weit grösserem Masse Werkzeugstähle eingesetzt werden, war also ein Verfahren gesucht, das eine Abscheidung der für Hartmetalle bereits bewährten Hartstoffe bei Temperaturen unterhalb 500 °C bzw. 300 °C im Falle der einfachen Werkzeugstähle ermöglicht. Diese Lücke kann heute mit Hilfe der ionengestützten PVD-Prozesse geschlossen werden. Die hohe Reaktivität der in der Gasentladung atomar vorliegenden Reaktionsgase erlaubt die reaktive Abscheidung von Oxiden, Nitriden und über die Zerlegung von Kohlenwasserstoffen auch Karbiden. Es können sowohl Legierungen als auch heterogene Stoffgemische z.B. Metalle mit feinst verteilten Hartstoff- oder Schmierstoffeinlagerungen abgeschieden werden [2] [3] [4].

Merkmale der PVD-Verfahren

Ein kennzeichnendes Merkmal aller PVD-Prozesse ist, dass sie im Vakuum in einem Druckbereich zwischen 10^{-2} und 10^{-10} mbar ablaufen. Man unterscheidet zunächst ganz grob in Aufdampfprozesse, Kathodenzerstäubung oder Sputtern und Ionenplattieren oder «Ion-plating» (Bild 3).

Die Dampfquellen in Aufdampfanlagen können widerstandsbeheizt oder induktionsbeheizt, durch Laser- und Elektronenstrahl erhitzt oder Lichtbogenquellen sein. Der Arbeitsdruckbereich für Aufdampfprozesse liegt in der Regel bei Drücken unterhalb 10^{-4} mbar.

Bei Sputterprozessen wird der Teilchenstrom zum Substrat nicht durch Verdampfen erzeugt, sondern durch Beschuss der Materialquelle (Target) durch Ionen mittlerer Energie, vorzugsweise Argonionen.

Diese Ionen werden auf die negativ vorgespannte Materialquelle beschleunigt und schlagen dort infolge ihrer hohen

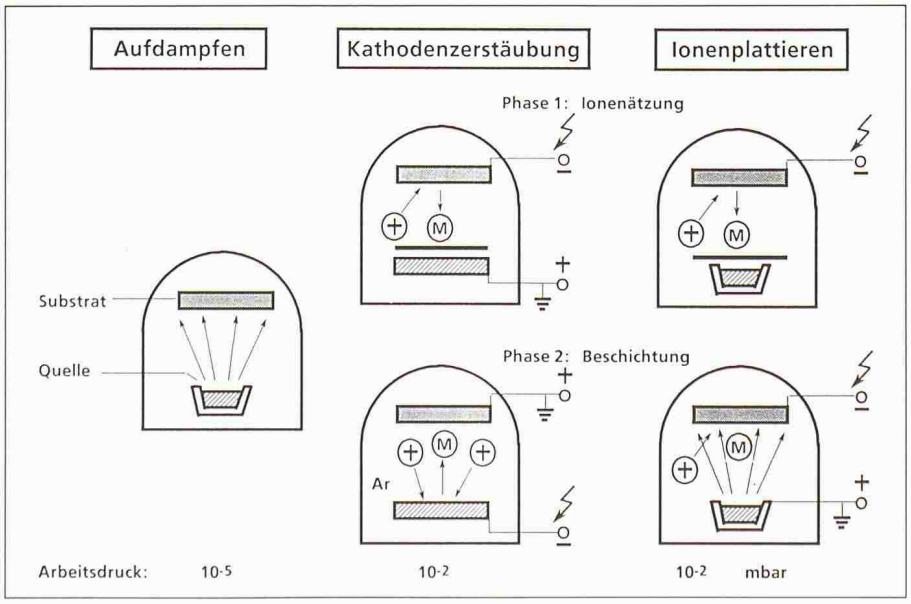


Bild 3. PVD-Verfahren (Vakuumbeschichtungsverfahren)

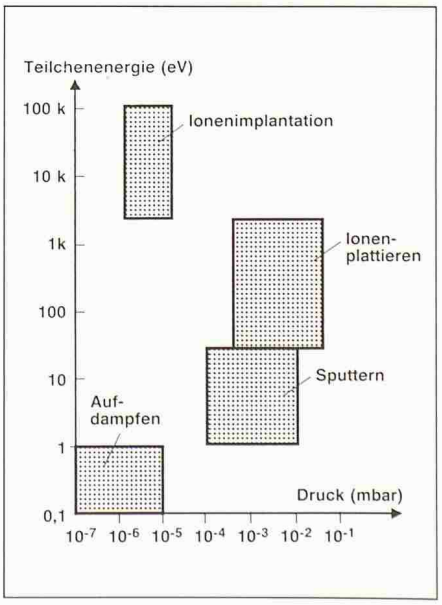


Bild 5. Teilchenenergie und Druckbereiche der PVD-Verfahren

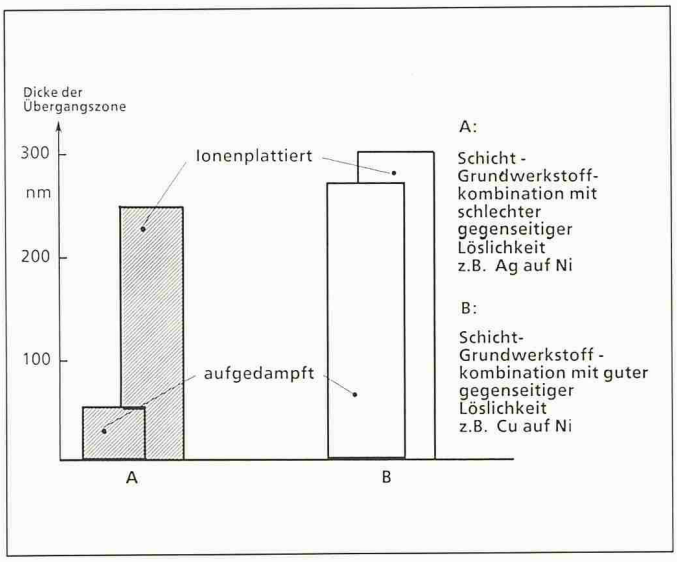


Bild 6. Einfluss des Ionenplattierens auf die Dicke der Übergangszone Schicht/Substrat

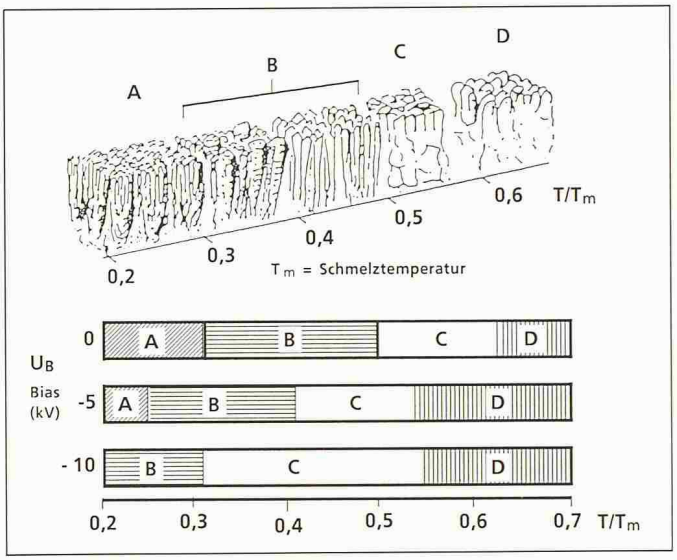


Bild 7. Einfluss der Temperatur und des Substratpotentials auf die Struktur abgeschiedener Titanschichten (n. Lardon et al. [5])

kinetischen Energie Atome aus dem Kristallverband los (Kathodenzerstäubung). Es haben verschiedene Varianten wie Gleichspannungs-, Hochfrequenz- und Magnetron- oder Hochleistungszerstäubung technische Bedeutung erlangt. Der Arbeitsdruckbereich dieser Verfahren ist zwischen 10^{-2} und 10^{-3} mbar angesiedelt.

Der prinzipielle Aufbau einer Ionenplattieranlage entspricht weitgehend dem einer Aufdampfanlage, mit der Erweiterung, dass das Substrat beim Ionenplattieren auf einem negativen Potential von einigen Volt bis einigen Kilovolt liegen kann. Damit ist es möglich, bei einem Arbeitsdruck von 10^{-2} mbar eine Gasentladung zwischen Verdampfer und Substrat zu zünden, so dass die aufwachsende Schicht unter der Einwirkung von auftreffenden Gas- und Metallionen kondensiert.

Bei genauer Betrachtung ist unschwer zu erkennen, dass beim klassischen Ionenplattieren mit Dampfquelle Elemente der Aufdampftechnik und der Kathodenzerstäubung in einem Prozess vereinigt sind (Bild 4).

Zum einen Materialverdampfung und Kondensation, zum anderen Materialzerstäubung, Aktivierung der Gasphase zur Unterstützung und Beschleunigung chemischer Reaktionen bei der Schichtbildung. Zu beachten ist, dass Materialverdampfung und Kondensation auf dem Substrat und Materialzerstäubung durch den Ionenbeschuss am Substrat gegeneinander gerichtete Teilprozesse sind, da die Kondensatmenge am Substrat um die wieder abgestäubte Menge vermindert wird. Anderseits weisen die kondensierenden Teilchen, teils dadurch, dass sie selbst ionisiert sind und damit auf das Werkstück beschleunigt werden, teils dadurch, dass sie durch Stossprozesse in der Gasentladung Energie aufgenommen haben, eine wesentlich höhere mittlere Teilchenenergie auf, als die thermische Verdampfungsenergie von einigen Zehntel eV, wie sie für die reinen Aufdampfverfahren charakteristisch sind. (Bild 5)

Diese erhöhte Teilchenenergie bewirkt eine gegenüber dem Aufdampfen verbesserte Haftung in Kombination mit Aufwachsraten, die die der üblichen Kathodenzerstäubung weit übertreffen. Es vereinigt damit Vorteile beider Verfahren in sich. Erst durch das Ionenplattieren konnte auf Metallen eine Schichtadhäsion erzielt werden, die ein breiteres Eindringen der PVD-Technik in Anwendungen des Maschinenbaues überhaupt ermöglichte.

Wodurch werden diese Vorteile des Ionenplattierens gegenüber den übrigen Beschichtungsverfahren an der Dampfphase erzielt? Im wesentlichen sind das Effekte der kinetischen Energie geladener und ungeladener Teilchen aus der Gasentladung, die durch entsprechende Potentiale an Werkstück und Materialquelle die gewünschten Wirkungen entfalten können.

- In einer der eigentlichen Beschichtung vorgeschalteten Phase, in der eine Gasentladung zwischen dem Substrat und dem Anlagengehäuse gezündet wird, erfolgt eine Oberflächenreinigung durch Sputtern, die eine Verbesserung der Schichthaftung durch Entfernung von Oberflächenoxiden oder Verunreinigungen unmittelbar vor der Beschichtung bewirkt.
- Darauf folgt durch Abstäuben von Material des Werkstückes eine Tiefenätzung und Aufrauhung der Oberfläche, die zusätzlich eine mechanische Verzahnung der aufwachsenden Schicht und damit eine Haftungsverbesserung bewirkt.
- Wird die Dampfquelle zugeschaltet, erfolgt eine Mischung von abgestäubtem, durch Stoss reflektiertem Substratmaterial mit ankommenden Dampfteilchen (physical mixing), so dass die Bildung einer Übergangsschicht resultiert. Die Bildung einer Übergangsschicht wird weiter durch die erhöhte Diffusion an durch Ionenbeschuss induzierten Defekten gefördert. Implantation von energiereichen Teilchen in die obersten Atomlagen. Alle diese Effekte können in Richtung einer Haftungsverbesserung der Schicht wirken.
- Auf die Morphologie der aufwachsenden Schicht hat die Erwärmung der Werkstücke durch die Umwandlung der kinetischen Energie der auftreffenden Teilchen eine entscheidende Bedeutung, darüber hinaus verbessert sie die Oberflächendiffusion und damit auch die Reaktionswahrscheinlichkeit durch Erhöhung der Oberflächenwanderung kondensierender Dampfteilchen.

Wie wirksam im Falle der Übergangszone zwischen Werkstück und Schicht der Ionenbeschuss ist, wird am Beispiel einer schlecht mischbaren Substrat-Schichtkombination wie Ag auf Ni und einer gut mischbaren Kombination wie Cu und Nickel demonstriert (Bild 6).

Während Aufdampfschichten bei Ag auf Ni nur eine Übergangszone von 50 nm aufweisen, die evtl. durch das Analyseverfahren noch verbreitert und damit z.T. vorgetäuscht wird, ergibt eine Cu-Schicht auf Nickel eine Übergangszone von fast 300 nm. Wird für die Herstellung der gleichen Schichtkombination das Ionenplattieren einge-

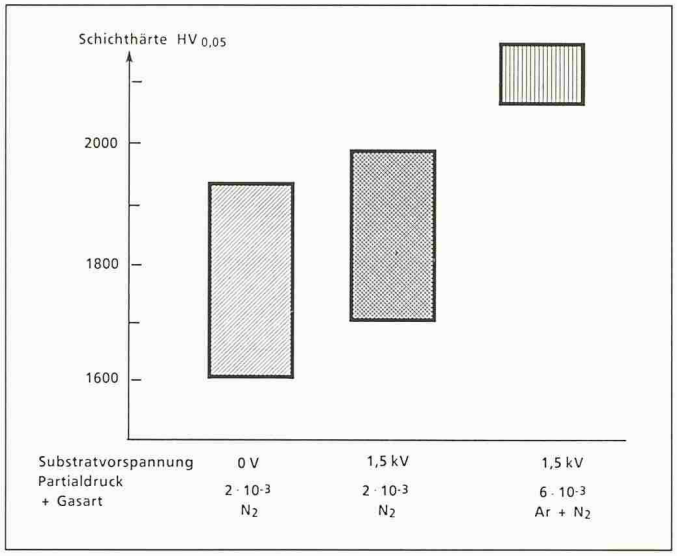
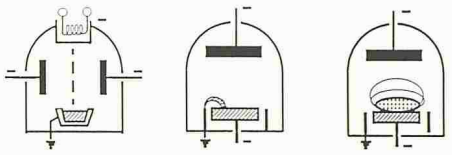


Bild 8. Härtewerte von PVD-TiN-Schichten bei unterschiedlichen Abscheidebedingungen



Energiequelle	Elektronenstrahl	Lichtbogen	Magnetron-entladung
Art u. Zustand der Materialquelle	Anode (flüssig)	Kathode (fest)	Kathode (fest)
Anordnung der Materialquelle	horizontal	beliebig	beliebig
Ionenanteil im Teilchenstrom	10 - 15 %	10 - 100 %	< 10 %
Beschichtungs-temperatur	450 °C	200 °C	160 °C

Bild 9. Ionenplattieren, Prozessvarianten

setzt, so ergeben sich nahezu identisch dicke Übergangszonen, die nur noch geringfügig durch die gegenseitige Löslichkeit beeinflusst werden.

Der Einfluss der Temperatur und der an das Substrat angelegten Spannung auf die Morphologie von Titanschichten wurde von Moll und Mitarbeitern untersucht [5]. Der Ausschnitt aus dem Thornton-Diagramm zeigt die Abhängigkeit der Schichtstruktur normaler Aufdampfschichten von der Werkstück- bzw. Substrattemperatur T, die als Verhältnis Substrattemperatur zu Schmelztemperatur T_{Tm} aufgetragen wurde (Bild 7). Die verschiedenen Schichtstrukturen, mit A, B, C und D bezeichnnet, werden durch Anlegen eines negativen Potentials an das Substrat in Richtung tieferer Temperaturen verschoben oder sie weiten sich auf ein grösseres Temperaturintervall aus.

Das bedeutet, dass z.B. bei der gleichen Werkstücktemperatur bei der ohne Ionenbeschuss relativ porös aufgebaute Schichten mit Stengelstruktur (Zone B) entstehen, bei einer Substratvorspannung von 10 kV sich bereits dichtere Schichten mit nahezu isometrischen Kristallachsen ergeben. Dieser Sachverhalt lässt darauf schliessen, dass in einer oberflächennahen Zone durch den Ionenbeschuss Wachstumsbedingungen für die Schicht vorliegen, die einer höheren Temperatur zuzuordnen wären, als es der Gesamttemperatur des beschichteten Teiles entspricht.

Der Einfluss des Ionenbeschusses auf die Eigenschaften von reaktiv abgeschiedenen TiN-Schichten wird auch durch die Ergebnisse von König u. Grewe eindrucksvoll demonstriert [6].

Bei einer Abscheidung der Schicht bei 600 °C ohne Ionenbeschuss am Substrat mit Hilfe der plasmaaktivierten reaktiven Bedampfung (ARE) werden Härtewerte zwischen 1600 $HV_{0,05}$ und 1950 $HV_{0,05}$ festgestellt. Schichten, die bei der gleichen Temperatur bei einer Substratspannunq von 1,5 kV hergeste11t wurden, zeigen bereits erhöhte Härtewerte zwischen 1700 $HV_{0,05}$ und 2000 $HV_{0,05}$.

Die Zugabe eines relativ schweren Edelgases und eine Drucksteigerung bringen eine Erhöhung der auf das Substrat eingebrachten kinetischen Energie und eine Steigerung der Schichthärte auf Werte zwischen 2070 und 2200 $HV_{0,05}$ bei Verminderung der Streubreite. Durch eine Steigerung des Ionenbeschusses konnten damit Schichteigenschaften für TiN erzielt werden, wie sie ohne Ionenbeschuss erst bei Temperaturen oberhalb 850 °C möglich gewesen wären (Bild 8). Das Ionenplattieren bot somit die Ansatzpunkte, die erprobten Hartstoffschichten wie TiN und TiC bei wesentlich niedrigeren Abscheidetemperaturen auf Stählen niederzuschlagen als es die CVD-Technik erlaubt [7].

Das Ionenplattierverfahren ist relativ jung. Obwohl das Prinzip bereits 1939 von Berghaus in einem Patent niedergelegt war [8], wurde erst 1964 das Verfahren von Mattox einer breiteren Anwendung zugeführt und der Begriff «Ionplating» oder Ionenplattieren geprägt [9] [10].

Nach einer Definition von Mattox ist das Ionenplattieren eine Bezeichnung für Abscheidemethoden dünner Schichten im Vakuum, bei denen die Substratoberfläche und/oder die sich abscheidende Schicht einem Teilchenstrom mit genügend hoher Energie ausgesetzt wird, der entweder in der Übergangszone Substrat/Schicht oder in der Schicht selbst Veränderungen gegenüber Beschichtungen ohne Teilchenbeschuss bewirkt. Diese Betrachtung setzt nur das, was am zu beschichtenden Werkstück oder Substrat geschieht zur Abgrenzung des Verfahrens ein, unabhängig davon, von welcher Quelle die zur Schichtbildunq einfallenden Teilchen stammen. Das heisst, dass nach dieser Definition auch die Kathodenzerstäubung mit Gegenspannung am Substrat (Bias) zum Ionenplattieren zählt. Auf diese Variante wird jedoch im Rahmen dieser Arbeit nicht näher eingegangen.

Wie richtig diese breit gefasste Definition ist, zeigt die Tatsache, dass heute verschiedene PVD-Prozesse z.B. für die Herstellung vor TiN-Hartstoffschichten, mit vergleichbaren Ergebnissen eingesetzt werden.

Anlagen zum Ionenplattieren

Die stürmische Weiterentwicklung, die das Ionenplattieren und die PVD-Technik in den letzten Jahren erfahren haben, ist nicht ohne Auswirkungen auf die Anzahl der Varianten des Verfahrens geblieben, die für die Herstellung ionenplattierter Schichten eingesetzt und in der Literatur vorgestellt wurden. Man hat dabei den Eindruck, dass manche Variante weniger einer systematischen Weiterentwicklung auf der Basis des bestehenden technischen Standes entspringt als vielmehr den Möglichkeiten, die sich aus dem Umbau einer vorhandenen Aufdampfanlage und den vorhandenen Einrichtungen für die Hochspannungserzeugung für die jeweilige Aufgabe ergaben. Trotz dieser vielen Varianten und dem Einsatz des Verfahrens auf vielen Gebieten der Oberflächenbeschichtung für Metall-, Verbindungs- und Heteroschichten für die unterschiedlichsten Substrate und Anwendungen hat sich im Laufe der Jahre eine Konvergenz der Varianten

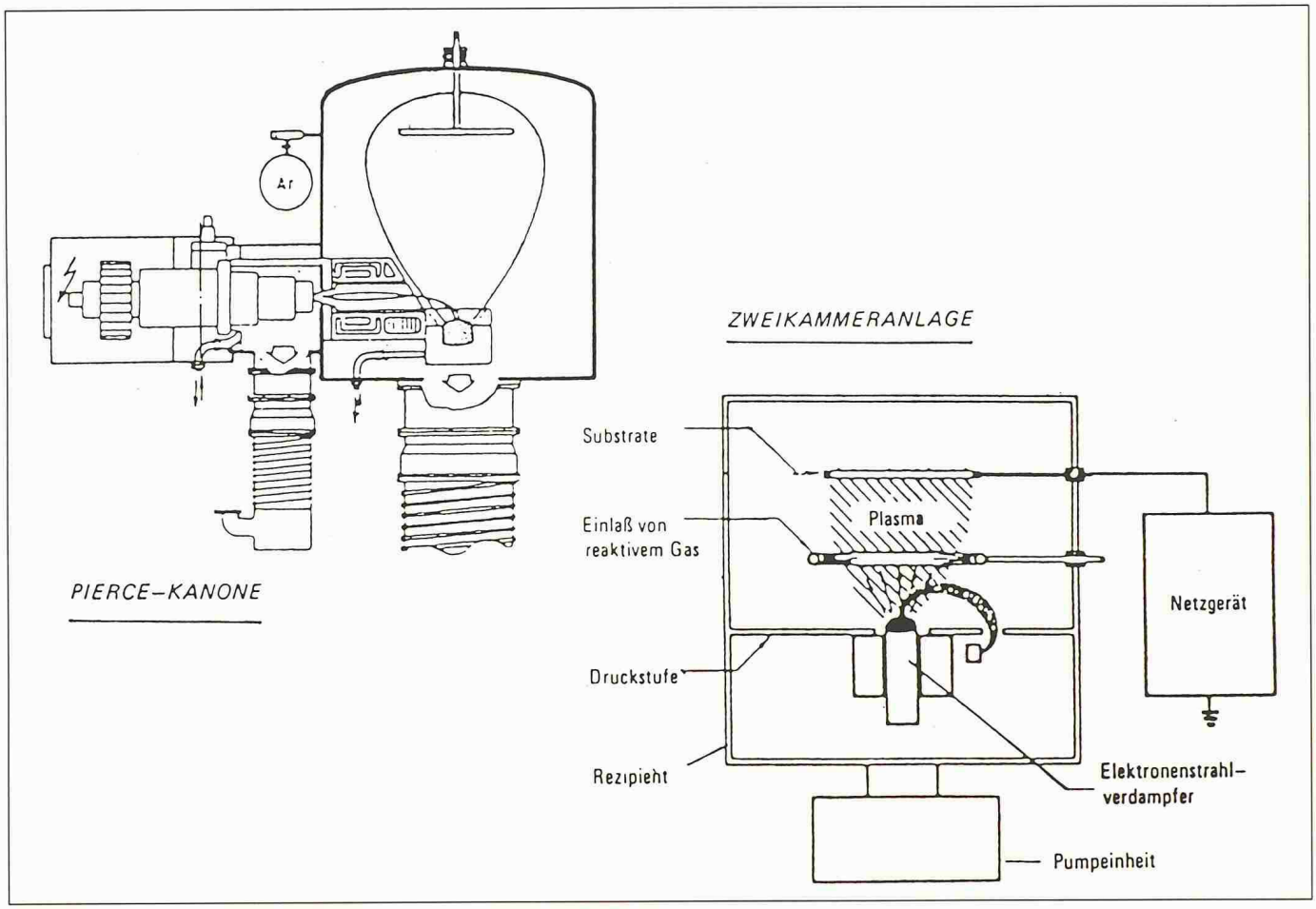


Bild 10. Ionenplattieranlagen mit differentiell gepumpten Elektronenstrahlverdampfern

auf einige besonders günstige und vielseitige Aufbauten ergeben [11] (Bild 9).

Anordnungen mit widerstandsbeheizten Tiegeln

Die einfachste Einrichtung zum Gleichspannungsionenplattieren ist die klassische Anordnung von Mattox [9], in der eine selbständige Gasentladung zwischen einem widerstandsbeheizten Verdampfer und einem isoliert aufgehängten Substrat benutzt wird, um Ionen zu erzeugen (Bild 3 c).

Dazu wird in eine konventionelle Anlage über ein Gaseinlassventil bei gedrosselter Saugleistung der Pumpe ein Edelgas, z.B. Argon, bis zu einem Druck von etwa 10^{-2} mbar eingelassen und an das Substrat eine Spannung von 1-5 kV angelegt. Mit diesen Anordnungen kann bei technisch annehmbarer Beschichtungsrate jedoch nur ein geringes Verhältnis zwischen ionisierten und nicht angeregten Dampfteilchen n_I/n_D erzielt werden (meist $\leq$ 0,01). Der für die selbständige Gasentladung erforderliche hohe Gasdruck wirkt sich in der Regel auch ungünstig auf die Schichteigenschaften aus.

Wege zur Erhöhung der Ionenausbeute, wie sie unter anderen von Kloos, Broszeit u. Gabriel [12] untersucht wurden, sind das sogenannte Triodenionenplattieren, wobei mit Hilfe einer positiven 3. Elektrode, die ähnlich wie beim ARE-Prozess nur auf etwa + 100 V Spannung liegt, nur eine geringfügige Erhöhung des Ionenstromes zum Substrat registriert wird; anders liegen die Verhältnisse beim Verdampfen mit dem Elektronenstrahl auf das ich später zurückkommen möchte. Das Tetroden-Ionenplattieren, bei dem eine Hilfsentladung quer zum Dampfstrom einen Elektronenstrahl mit einer Elektronenenergie im günstigen Bereich von 100 eV einschiesst, erbringt auch bei Anwendung widerstandsbeheizter Verdampfertiegel Stromdichten bis zu 1 mA/cm² am Substrat bei Substratspannungen im Bereich von etwa 5 kV, das ist gegenüber der klassischen Diodenanordnung immerhin eine Steigerung um den Faktor 5. Ausserdem kann mit Hilfe dieser unselbständigen Entladung der Arbeitsdruckbereich auf Werte von 10^{-3} mbar abgesenkt werden, so dass die nachteiligen Wirkungen des hohen Gasdruckes auf die Schichteigenschaften vermindert werden.

Anordnungen mit ES-Verdampferquellen

Eines der Hauptanliegen, die zur intensiven Weiterentwicklung des Ionenplattierens beigetragen haben, ist die Möglichkeit, hohe Beschichtungsraten zu erzielen. Diese Forderung ist mit Hilfe von widerstandsbeheizten Dampfquellen nur für eine beschränkte Anzahl von Materialien realisierbar. Elektronenstrahlverdampfer ermöglichen aufgrund ihrer hohen Energiedichte dagegen hohe Verdampfungsraten auch bei Materialien mit niedrigem Dampfdruck.

ES-Verdampfer mit thermischem Emitter

Im Hinblick auf ihre Anwendbarkeit im Ionenplattierprozess ergaben sich jedoch für konventionelle ES-Verdampfer insofern Schwierigkeiten, als der Arbeitsdruckbereich für Elektronenstrahlkanonen mit Glühkathodenemitter mit $P_A \leq 10^{-3}$ mbar nicht mit dem Arbeitsdruck von 10^{-2} mbar übereinstimmt, wie er für das Ionenplattieren mit einer selbständigen Gasentladung erforderlich ist. Wie in Bild 10 gezeigt wird, kann diese Schwierigkeit mit differentiell gepumpten Elektronenstrahlverdampfern technisch umgangen werden, indem man z.B. eine Pierce-Kanone mit 90° Ablenkung und einer eigenen Pumpe benutzt [13] oder in einer Zweikammeranlage mit einem Ver-

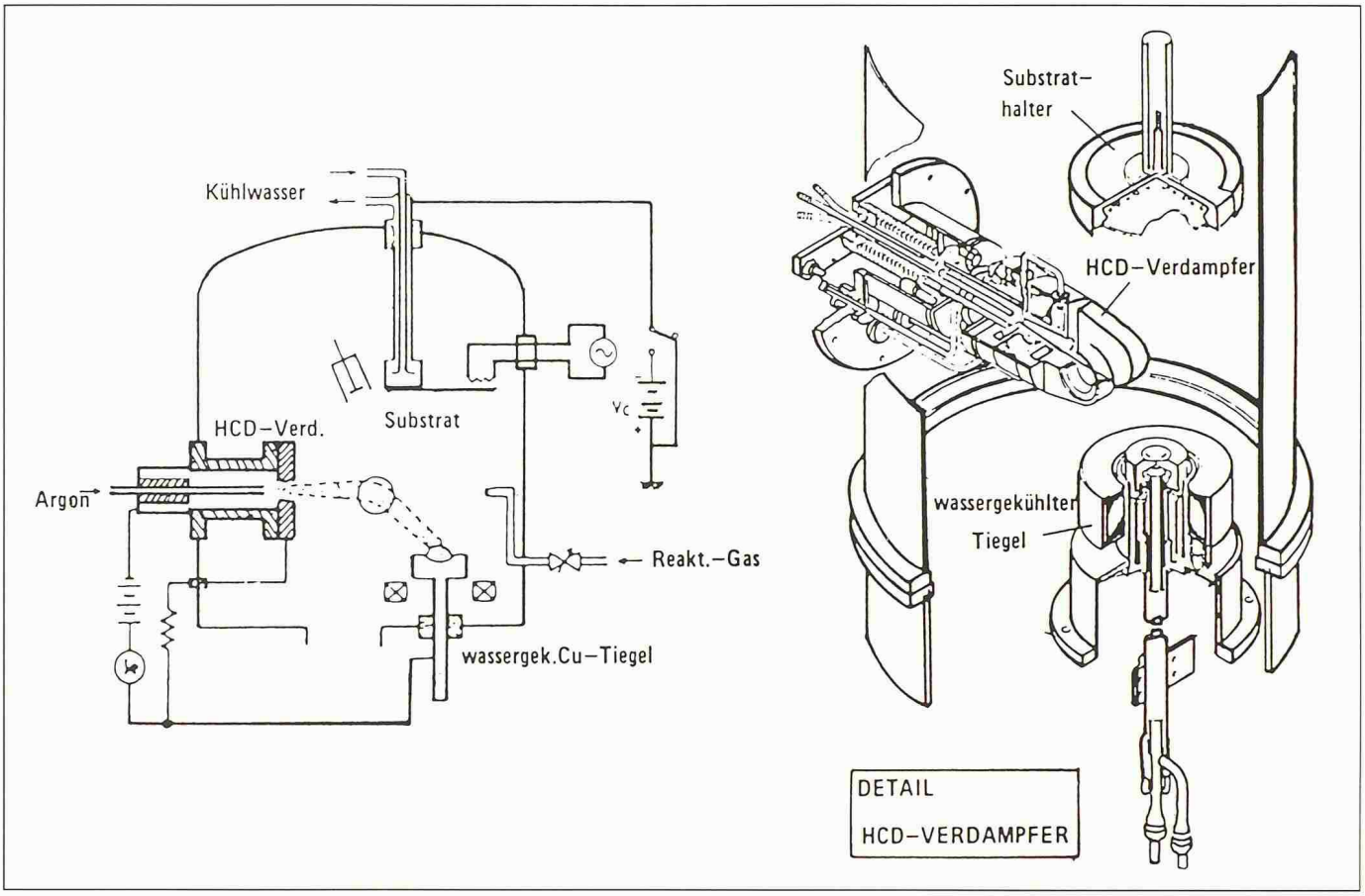


Bild 11. Aufbau zum Ionenplattieren mit HCD-Elektronenstrahlverdampfer

dampfer mit 270°-Ablenkung arbeitet [14].

Die im Bereich des Tiegels erzeugten Dampfionen werden durch die negative Spannung am Substrat abgesaugt und auf das Substrat beschleunigt. Die auf diese Weise erreichbare Ionendichte ist zwar merklich höher als beim Verdampfen mit widerstandsbeheiztem Tiegel, ist aber insbesondere für viele Anwendungsfälle beim reaktiven Ionenplattieren [13] [15] noch nicht ausreichend. Auch in solchen Ionenplattiereinrichtungen können Massnahmen zur Erhöhung der Ionenstromdichte wie z.B. durch die bereits beschriebene Hilfsentladung eine weitere Verbesserung bewirken [16] [17] [18].

Durch Einrichtungen wie sie in Bild 9 dargestellt sind, konnten am Substrat Stromdichten bis 3 mA/cm^2 erzielt werden. Der Vorteil solcher Anordnungen besteht vor allem darin, dass die Plasmaerzeugung vom Beschichtungsprozess und vom Druck in der Kammer weitgehend getrennt ist. Der Prozess kann bei Drücken unterhalb 10^{-3} mbar stattfinden, was einerseits den Betrieb von konventionellen Elektronenstrahlverdampfern ohne differentielles Pumpen zum anderen eine weitere Dichteerhöhung der abgeschiedenen Schichten ermöglicht.

Hohlkathoden ES-Verdampfer

Basierend auf den Schwierigkeiten mit Hilfe von konventionellen Elektronenstrahlkanonen ausreichende Ionenstromdichten ohne Zusatzionisierung zu erzielen, wurden andere Möglichkeiten untersucht. Für die meisten Gase liegt die optimale Ionisierungsenergie bei 50-150 V Beschleunigungsspannung für die Elektronen.

Der Einsatz von Hohlkathodenentladungen mit Brennspannungen im Bereich von 100 V zur Dampf- und Ionenerzeugung ist daher ein weiterer Weg, um die Ausbeute an Ionen zu erhöhen [19] [20] [21]. Dieser Verdampfertyp hat für das Ionenplattieren zwei entscheidende Vorteile: Es können auch bei sehr geringer Ionenenergie bis herab zu einigen Elektronenvolt hohe Stromdichten auf dem Substrat erzielt werden, da ein hoher Anteil (ca. 35-40%) des Dampfes ionisiert wird, darüberhinaus ist die Kanone infolge des Fehlens eines Glühfadens im Fein- und Hochvakuumbereich betreibbar und damit besser mit dem Ionenplattierprozess kompatibel (Bild 11).

Es wurden bereits Hohlkathodenelektronenstrahlverdampfer (HCD-Kanonen) bis 15 kW betrieben; dabei wurden bei Absaugspannungen von 100 V Ionenströme bis in den Bereich von 2 A am Substrat erreicht [10].

Analysen der Wärmeeinbringung in das Substrat zeigen, dass die höchsten Anteile durch Strahlung und Kondensationswärme, Metallionen und energiereiche Neutralteilchen zugeführt werden. Eine Erhöhung der Substratvorspannung erhöht den durch Ionen eingebrachten Energieanteil.

Reaktive Beschichtungen zur Herstellung von Karbiden und Nitriden von Cr, Ti und anderen Werkstoffen wurden mit Erfolg durchgeführt [22] [23]. Die Abhängigkeit der Schichthärte von TiN-Schichten von Stickstoff- und Wasserstoffpartialdruck, wie sie von Sato u. Mitarbeitern gefunden wurde, ist in Bild 12 dargestellt.

Als Nachteil muss angesehen werden, dass die Energiedichte geringer als bei Glühkathoden-ES-Verdampfern ist, so dass nicht die hohen Raten erreicht werden. Weiterhin ist das Zerstäuben von Material der HCD-Kanone zu befürchten.

ES-Verdampfer mit Niedervolt-Bogenentladung (NB-ES-Verdampfer)

Ebenfalls hohe Ionenströme zum Substrat liefert der von Moll und Daxinger [24] entwickelte ES-Verdampfer mit

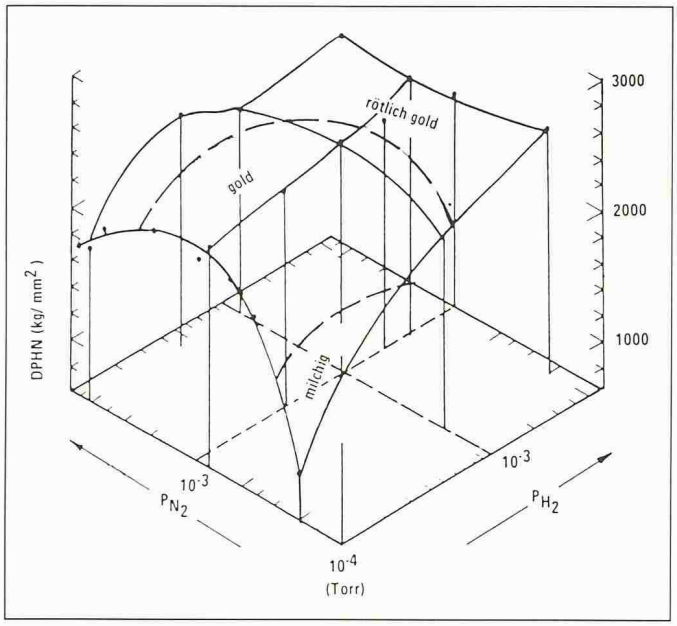


Bild 12. Zusammenhang zwischen Mikrohärte, Farbe und Stickstoffpartialdruck (n.Sato et al [23])

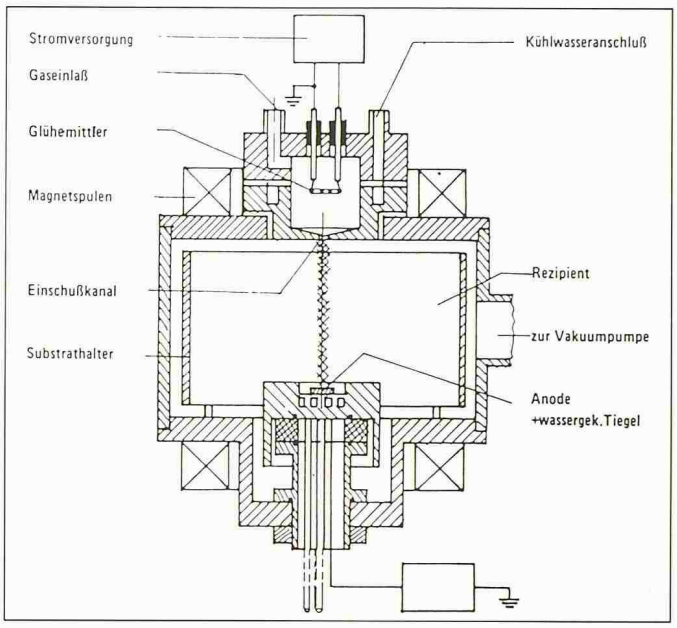


Bild 13. Einrichtung zum Ionenplattieren mit Niedervoltbogen-elektronenstrahlverdampfer (schematisch)

Niedervolt-Bogenentladung (Bild 13). Das Verdampfungsmaterial wird von einem Elektronenstrahl hoher Leistungsdichte $\geqq 10$ kW/cm² aber geringer Beschleunigungsenergie (140 A; 70 V) erwärmt und verdampft. Der günstige Ionisationsquerschnitt der Elektronen bewirkt eine starke Ionisation der Dampfteilchen, so dass bei 200 V Substratvorspannung Ionenströme von 15–30 A auf die zylindrisch um den wassergekühlten Verdampfertiegel angeordneten Substrate gezogen werden können. Mit diesem Verfahren, das im Druckbereich von etwa $5 \cdot 10^{-3}$ mbar im Beschichtungsraum arbeitet, werden heute durch reaktive Abscheidung harte TiN-Schichten auf Stählen [25] und Werkzeugen mit guter Haftung grosstechnisch abgeschieden [26].

Der Lichtbogen- oder Funkenverdampfer

Als weitere aussichtsreiche Möglichkeit, Dampfströme mit hohem Ionenanteil zu erzeugen, hat sich in den letzten Jahren die Verdampfung des Materials durch einen Lichtbogen etabliert.

Diese Dampfquelle, die zum Teil auf russische Entwicklungsarbeiten zurückgeht [27], wird in Europa von Interatom, in USA von Multi-Arc und Vac-Tec für Hartstoffbeschichtungen wie TiN gebaut.

Folgende Vorteile werden für die Quelle beansprucht:

- Der mikroskopisch kleine Kathodenfleck der Bogenentladung (typ. Brennspannung bei Ti-Kathode 20–22 V bei $\geqq 80$ A) ist in ständiger Bewegung und verdampft das Material blitzartig ohne grössere Bereiche aufzuschmelzen.
- Damit kann die Quelle in jeder beliebigen Einbaulage betrieben werden. Bei komplizierten Werkstücken werden mehrere Dampfquellen gleichzeitig verwendet (Multi-Arc-Prinzip), um eine gute allseitige Beschichtung bei möglichst kleinem Aufwand für die Teilehalterung zu erhalten (Bild 14).
- Gute Ausnutzung des Einsatzwerkstoffes (60–70%).
- niedrige ($\geqq 200$ °C) Beschichtungstemperatur.

Gemeinsam ist diesen Ionenplattierverfahren, dass relativ hohe Ionenströme (2 mA/cm² auf das auf negativem elektrischem Potential liegende Substrat gelenkt werden können und die Hartstoffsynthese (z.B. Ti + N = TiN) bei der Beschichtung unter der Einwirkung dieses Teilchenbeschlusses abläuft. Erst durch das Ionenplattieren konnte auf Metallen bei Temperaturen unterhalb 300 °C eine Schichtadhäsion erzielt werden, wie sie für die Anwendungen auf Werkzeugen des Maschinenbaues erforderlich ist.

Schichtmaterialien

Warum haben gerade TiN-Schichten bei der Anwendung auf Stählen solche Bedeutung erlangt? Stellt man die Ausdehnungsskoeffizienten einiger bekannter Hartstoffe, die zum Teil schon aus der CVD-Beschichtungstechnik für Hartmetalle bekannt sind, den thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Werkzeugstählen und Hartmetallen gegenüber, so ist zu erkennen, dass lediglich TiN, NbN und Cr_3 Cr_5 Ausdehnungskoeffizienten aufweisen, die zumindest annäherungsweise dem der Werkzeug- und HSS-Stähle gleichen (Tabelle 1).

Der aus der Literatur entnommene Wert für CrN wird allerdings inzwischen stark in Zweifel gezogen, da CrN-Schichten sehr gut auf Stahl haften und nicht die hohen Druckspannungen erkennen lassen, die bei einem derartigen Unterschied im Ausdehnungskoeffizienten auftreten müssten. Von den genannten Schichtwerkstoffen ist die gute Verschleiss-Schutzwirkung von TiN bereits von CVD-beschichteten Werkzeugen bekannt. Schliesslich ist auch die goldgelbe Farbe ein guter Kontrast zum Grau des Stahls oder des Hartmetalls und stellt somit einen guten Verschleissindikator am Werkzeug dar, der dazu beigetragen hat, dass sich dieser Oberflächenwerkstoff auf breiter Front durchgesetzt hat.

Es zeichnet sich jedoch heute ab, dass die Entwicklung von neuen Mehrstoffmisch- und Mehrstoffverbundschichten weitere Verbesserungen durch eine günstigere Anpassung zwischen Schicht und Grundwerkstoff und an den spezifischen Anwendungsfall bringen werden [28] [3] [29] [30]. Das heisst, es kann je nach Anwendungsfall eine härtere Schicht mit einer harten oder zähen Grundschicht kombiniert werden, die eine gute Haftung zum Substrat bewirkt; oder anders ausgedrückt, es findet auch innerhalb der dünnen Schichtkombinationen wieder eine Arbeitsteilung statt, wie wir sie im Makromassstab schon zwischen Werkzeugvolumen und Oberfläche kennen [30]. Auch hier hat ebenso wie bei den Karbid- und Nitridschichten die CVD-Technik eine Vorreiterrolle in der Mehrlagenbe-

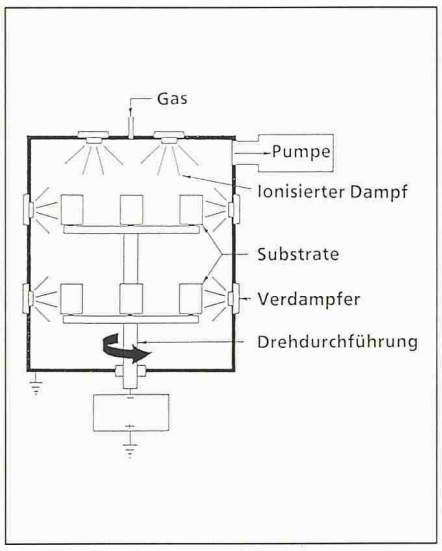


Bild 14. Ionenplattieranlage mit Mehrfach-Lichtbogenverdampfer

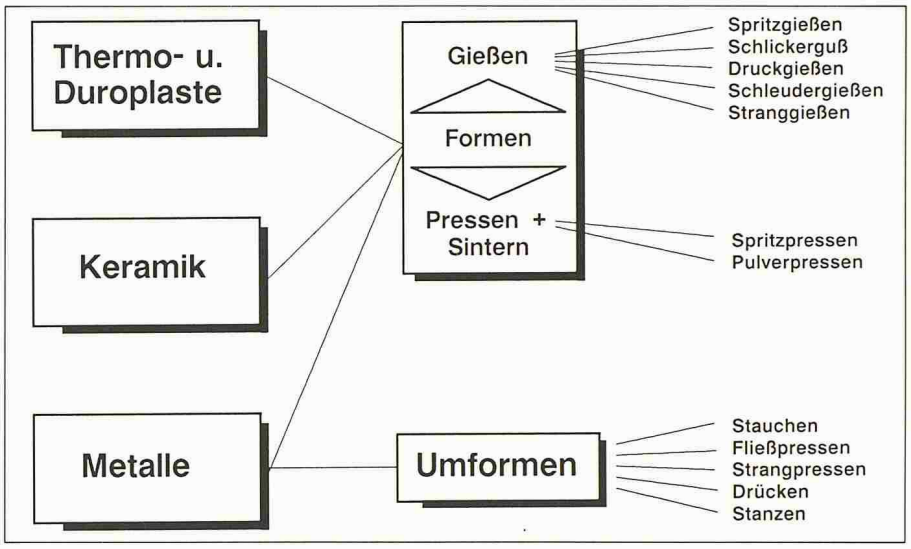


Bild 15. Spanlose Fertigungsverfahren und verarbeitete Werkstoffe

schichtung von Hartmetallwendeschneidplatten gespielt [31] [6].

Anwendungsbeispiele

Teilt man die wesentlichen Werkstoffe, die in der spanlosen Umformtechnik verarbeitet werden, in Gruppen ein, so bleiben Thermo- und Duroplaste, keramische Werkstoffe und Metalle (Bild 15).

Bearbeitungsvorgänge, deren Werkzeuge besonderer Belastung ausgesetzt sind und stark verschleissen, sind das Spritz- und Druckgiessen, das Pressen in Form von Spritzpressen und Pulverpressen sowie beim Umformen die Stanztechnik, das Stauchen sowie das Fliess- und Strangpressen. In den Anwendungsbeispielen erfolgt eine Konzentration auf Anwendung beim Formen gefüllter Thermo- und Duroplaste sowie auf die Metallbearbeitung.

Formwerkzeuge für Thermo- und Duroplaste

Bei dieser Werkzeuggruppe treten in zunehmendem Masse Verschleiss- und Korrosionsprobleme auf, da die Verarbeitungstemperaturen der temperaturbeständigen Kunststoffe höher liegen, höhere Anteile von Füllstoffen beigemengt werden und chemisch aggressive, flammhemmende Zuschlagstoffe verwendet werden. Im Falle stark erosiv wirkender harter Füllstoffe wurde die Gebrauchsdauer der teuren Werkzeuge erheblich verschlechtert. Während man früher, und bei weniger stark gefüllten Kunststoffpressmassen noch heute, die Werkzeuglebensdauer mit 5 Jahren ansetzte, sind heute zumindest extrem belastete Teilbereiche der Werkzeuge bereits nach einem halben Jahr verschlissen. Die Kosten der Spritzgusswerkzeuge und anderen Kunststofformen sind sehr hoch. Abhängig von den Genauigkeits-und Toleranzanforderungen an das gespritzte Teil muss mit 20 000 DM für einfache und 300 000 DM für komplexe Formen hoher Genauigkeit gerechnet werden. Die Werkzeugstähle sind in der Regel gut bearbeitbare Kaltarbeitsstähle oder spezielle Kunststofformenstähle mit Anlasstemperaturen zwischen 170 °C und 260 °C.

Damit sind PVD-Verfahren für die Entwicklung neuer verschleissfester Beschichtungen in diesem Bereich besonders prädestiniert, da mit diesem Verfahren Schichten im oben genannten Temperaturbereich abgeschieden werden können und somit keine Enthär-

Hartstoffe		*Werkzeuggrundmaterialien*	
Material	*Ausdehnungskoeffizient* $\times 10^{-6} \cdot C^{-1}$	*Material*	*Ausdehnungskoeffizient* $\times 10^{-6} \cdot C^{-1}$
TiC	7,4	Werkzeugstahl (niedr. legiert)	15
TiN	9,35	HSS-Stähle	12
ZrC	6,7	Hartmetalle 5% Co	5,4
ZrN	7,24	Hartmetalle 12% Co	6,1
HfC	6,6		
HfN	6,9		
NbC	6,6		
NbN	10,1		
TaC	6,3		
TaN	3,6		
Cr_3C_2	10,3		
CrN	2,6		
WC	4,2–5,0		

Tabelle 1. Lineare thermische Ausdehnungskoeffizienten von Hartstoffen und Werkzeugstählen bzw. Hartmetall

Verarbeitetes Material	*Materialien*		*Standmengenerhöhung*
	Werkzeug	*Schicht* (32)	
Phenolharz gefüllt	–	TiN	4fach
Bakelit	RAB 1	TiN	6fach
Noryl + 30% Glasfaser	1.2767	TiN	10fach
Ultramid + Russ	1.2379	TiN	8fach
Ultramid + Eisenoxid	1.2379	TiN	8fach

Tabelle 2. Formen von Thermo- und Duroplasten

tung auftritt. Zunächst sollen jedoch die Faktoren, die die Lebensdauer der Formen negativ beeinflussen, zusammengefasst werden:

- Abrasiver Verschleiss: durch die benutzten harten Füllstoffe wie Glas, Quarz, Kohle und Mineralien in Anteilen bis zu 85% ist der abrasive Verschleiss das grösste Problem. Bevorzugte Verschleissstellen sind Angussverengungen und Öffnungen für Auswerferstifte.
- Korrosiver Verschleiss: flammhemmende Zusätze in Thermoplasten und Reaktionsprodukte in Harzen und Gummi erzeugen korrosiven Angriff auf den Formoberflächen. Die starke Verdichtung der verdrängten Gase in den Entlüftungskanälen und Formspalten kann zu dieselartigen Explosionen mit Brand-Verschleissspuren führen.
- Schlechte Entformbarkeit durch Haften der geformten Teile

Die hohe Härte, der geringe Reibungskoeffizient gegen viele Stoffe und die chemische Beständigkeit von Titannitridschichten ermöglichten bemerkenswerte positive Veränderungen im Hinblick auf die oben genannten Punkte in der Formgebung von Gummi-, Thermo- und Duroplasten mit hohem Füllstoffgehalt. Die benutzten Schichtdicken für TiN liegen je nach Toleranzanforderungen an das Produkt zwischen 3 µm und 40 µm. Typische Ergebnisse sind in Tabelle 2 zusammengestellt.

Die Ergebnisse zeigen, dass Standmengenerhöhungen zwischen 400% und 1000% erzielt werden konnten.

Da der völlige Verschleiss der dünnen TiN-Schicht sich durch den starken Farbunterschied zum Grundwerkstoff sofort zeigt, kann rechtzeitig eine erneute Beschichtung ohne Nacharbeit und Entfernung der ersten TiN-Schicht vorgenommen und mit der Form wieder weitergearbeitet werden.

Die positiven Auswirkungen der Hartstoffbeschichtungen bei Spritzgussformen lassen sich in folgenden Punkten zusammenfassen:

- Der Verschleiss an Anspritzkanälen, Anspritzöffnungen, Kavitäten, Auswerferstiften und Einsätzen wird stark verringert.
- Korrosionsverschleiss der Form durch Säuren und heisse Gase wird stark verringert.
- Auf Formtrennmittel kann in vielen Fällen verzichtet werden. Das erbringt Vorteile im Spritzzyklus und bei Wartungszeiten. Verunreinigungen durch Formtrennmittel bei medizinischen und nahrungsmitteltechnischen Anwendungen werden vermieden.

Material	*Werkzeug*		*Bearbeitungsart*	*Standmengenerhöhung*
	Material	*Schicht* (32)		
austen. Stahl	D 1	TiN	Stanzen/Ziehen	16fach
Stahlblech	D 2	TiN	Stanzen/Ziehen	4fach
NiCoFe	D 3	TiN	Stanzen/Ziehen	24fach
Baustahl	Hartmetall HSS (M 2)	TiN	Fliesspressen	8fach
Stahlblech	HSS/D 2	TiN	Tiefziehen	26fach
Stahlblech	1.2379	TiN	Aufweiten	39fach
Cu-Draht CuAg-Draht	-	TiN	Stauchen	14fach
Stahlrohr	HSS/D 2	TiN	Bördeln	3fach

Tabelle 3. Metallbearbeitung (Verfahren 1)

Material	*Werkzeug*		*Bearbeitungsart*	*Standmengenerhöhung*
	Material	*Schicht* (35)		
16 MnCr5	1.3343	TiN	Gegenfliesspressen	80fach
St 36-2	1.3343	TiN	Fliesspressen	4fach
X 12 CrNi 17 7	1.3344	TiN	Feinschneiden	2fach
St 37	1.3343	TiN	Feinschneiden	3fach
R St 14	1.2379	TiN	Tiefziehen (Ring)	4fach
R St 14	1.2379	TiN	Tiefziehen (Stempel)	80fach
UQ 36	1.3343	TiN	Stanzen	60fach
St 4	1.3343	TiN	Stanzen	10fach

Tabelle 4. Metallbearbeitung (Verfahren 2)

Metallbearbeitung

In der Metallbearbeitung und dort vor allem in der Blechverarbeitung ist der Verkettungsgrad zwischen verschiedenen Arbeitsvorgängen entweder in einem Werkzeug sehr hoch getrieben (Folgeverbund-Werkzeuge) oder verschiedene Arbeitsstufen sind in einer durch eine Transporteinrichtung verbundenen Werkzeugkette verknüpft. Sowohl in diesen Folgeverbundwerkzeugen, als auch in den verketteten Arbeitsstufen ist ein störungsfreier Betrieb nur solange gewährleistet, als alle Werkzeuge in den verschiedenen Stufen ihre Funktion einwandfrei erfüllen. Der Ausfall eines Werkzeuges durch Verschleiss erzwingt den Stillstand der gesamten Fertigungseinrichtung mit den entsprechend hohen Folgekosten.

Für CVD-Beschichtungen sind aus der Literatur [34] zahlreiche Anwendunqen bekannt geworden, die für TiC, TiN, Cr_3C_5-Schichten und für Kombinationsschichten aus solchen Karbiden beträchtliche Standmengensteigerungen beim Tiefziehen, Bördeln, Lochen und Kaltumformen durch Fliesspressen nachweisen. Die erzielten Standmengensteigerungen übersteigen die Verbesserungen durch andere Verfahren wie Nitrieren, Borieren, Hartverchromen beträchtlich. Die bisherigen Erfahrungen mit der CVD-Technik zeigen jedoch auch, dass für jeden Einzelfall eine möglichst optimale Zusammenstellung von Grundwerkstoff und Verschleissschutzschicht und eine optimale Wärmebehandlung vorliegen muss, um zum Erfolg zu kommen. Darüber hinaus verbieten bei ungünstigen Werkzeuggeometrien (grosses Längen/Durchmesserverhältnis) Toleranzprobleme den Einsatz dieses Hochtemperatur-Beschichtungsverfahrens. Auch in diesem Bereich konnten daher PVD-Beschichtungsverfahren durch die niedrigen Abscheidetemperaturen eine Alternative bieten und den Anwendungsbereich verschleissfester Beschichtungen für Präzisionswerkzeuge erweitern. Die Tabellen 3 und 4 zeigen Ergebnisse von TiN-beschichteten Werkzeugen, die mit unterschiedlichen PVD-Verfahrensvarianten beschichtet wurden.

Die zusammengestellten Ergebnisse zeigen klar, dass unabhängig vom Verfahren ähnliche Verbesserungen der Werkzeugstandmengen durch TiN-Beschichtungen auch im Bereich der Metallumformung erreicht werden. Aus dem Gebiet der Presstechnik für die Pulvermetallurgie und die Pulverkera-

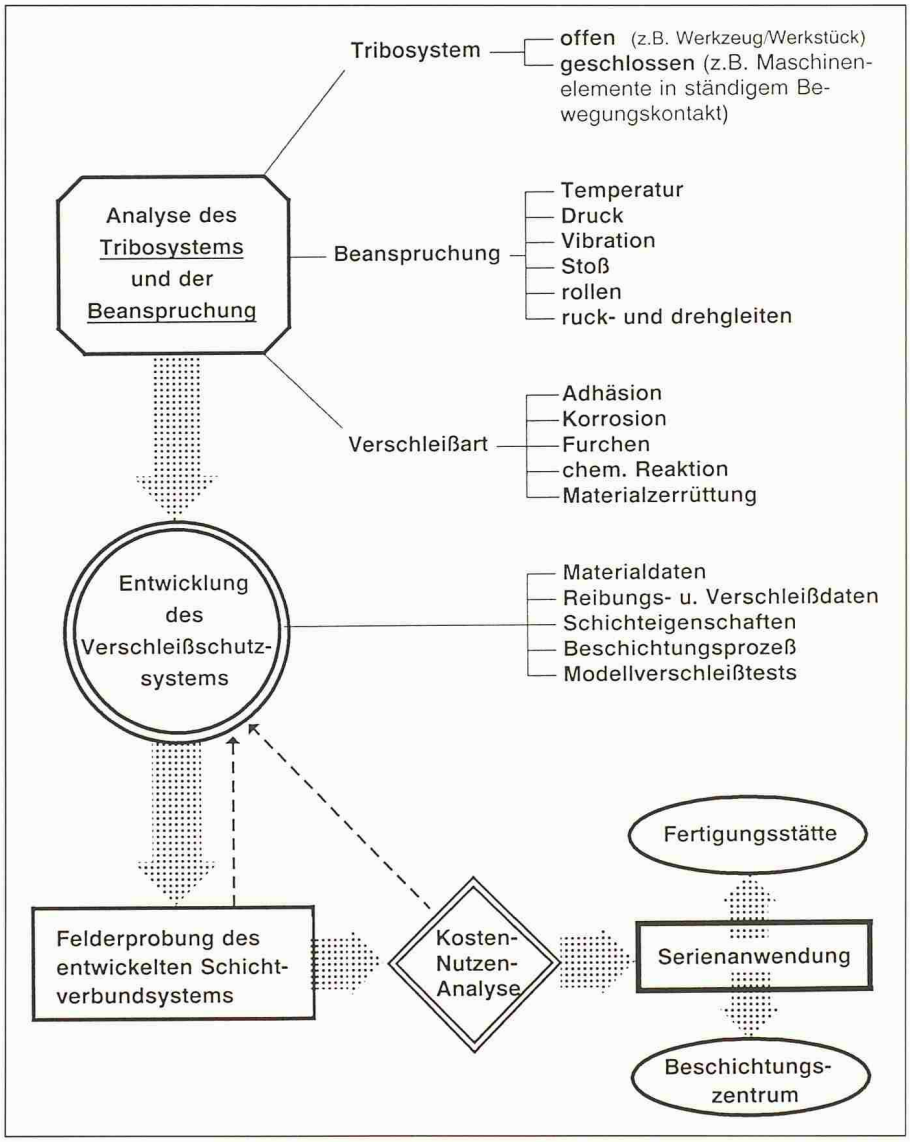


Bild 16. Entwicklung von Schichtverbundwerkstoffen für den Verschleissschutz

mik sind ähnliche Standzeitverbesserungen an Presswerkzeugen bekanntgeworden.

Zusammenfassung und Ausblick

Wie in den vorhergehenden Abschnitten dargestellt werden konnte, zeigt die Anwendung der PVD-Beschichtungsverfahren zum Verschleissschutz an Werkzeugen der spanlosen Form- und Umformtechnik bereits heute bemerkenswerte Erfolge. Diese erfolgreichen Anwendungen beruhen jedoch in erster Linie auf dem «Erste-Hilfe»-Konzept, d.h. es wurde ein Schichtsystem, das man von anderen Anwendungen her kannte – zum Beispiel von Werkzeugen der spanenden Fertigungstechnik – und vom Prozess her beherrschte – wie z.B. TiN – auf Werkzeuge der spanlosen Umformtechnik übertragen. Häufig stellte sich der erhoffte Erfolg ein, jedoch blieben auch Rückschläge nicht aus. Das heute weitgehend technisch beherrschte Schichtsystem, nämlich TiN, ist weit davon entfernt, eine Lösung für alle Verschleissprobleme zu bieten. Ein Scheitern der TiN-Schicht in einem spezifischen Anwendungsfall bedeutet jedoch nur – wenn Schichtdicke und Schichtadhäsion dem Anwendungsfall angemessen waren -, dass TiN für den spezifischen Anwendungsfall nicht der angemessene tribologische Partner für den zu bearbeiteten Werkstoff war. Es wäre falsch, hierfür das Verfahren haftbar zu machen. Die Zahl von Hartstoffen mit vergleichbaren

Literatur

[1] *F. v. Bernus, H. Freller, K. G. Günther:* Thin Solid Films, 50 (1978) 39–48
[2] *R. F. Bunshah and C. V. Deshpandey:* J. Vac. Sci. Techn. A3 (1985) 553–560
[3] *H. Dimigen, H. Hübsch:* Philips Techn. Rev., 41 (1983/84) 186
[4] *H. Freller und H. Hässler:* Vakuumtechnik 30 (1982) 175–179
[5] *M. Lardon, R. Buhl, H. Signer, H.K. Pulker und E. Moll:* Thin Sol. Films 54 (1978) 317
[6] *U. König und H. Grewe:* Tribologie, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York (1981) 197–250
[7] *H. Freller, H. Hässler und M. Schreiner:* High Temperatures—High Pressures 14 (1982) 315–320
[8] Berghaus DRP Nr. 683414 (1939)
[9] *D. M. Mattox:* Electrochem. Techn., 2 (1964) 295–98
[10] *D. M. Mattox, J. Vac:* Sci. Techn., 10 (1973) 47–52
[11] *S. Schiller, U. Heisig und K. Goedicke:* Vakuumtechnik 25 (1976) 113
[12] *K. H. Kloos, E. Broszeit, E. Gabriel:* Vakuumtechnik 30 (1980) 15
[13] *B. Heinz und G. Kienel:* IPAT 77 (1977) 73
[14] *A. Matthews and T. G. Teer:* Thin Solid Films 72 (1980) 541
[15] *A. C. Raghuram, R. Nimmagadda and C. J. Wagner:* Thin Solid Films 20 (1974) 187
[16] *A. Matthews and T. G. Teer:* Thin Solid Films 80, (1981) 41
[17] *D. Schulze:* die Technik, 33 (1978) 7, 399
[18] *M. Kobayashi and Y. Doi:* Thin Solid Films, 54 (1978) 67
[19] *J. R. Morley and H. R. Smith:* J. Vac. Sci. Techn., 9 (1972) 1377
[20] *S. Komiya and K. Tsuruoka:* J. Vac. Sci. Techn., 12 (1975) 589
[21] *S. Komiya and K. Tsuruoka:* J. Vac. Sci. Techn., 13 (1976) 520
[22] *S. Komiya N. Umezu and T. Narusawa:* Thin Sol. Films 54 (1978) 51
[23] *T. Sato* et al.: Thin Sol. Films, 54 (1978) 61
[24] *L. Moll und H. Daxinger:* U.S.-Patent 4.197.175 (1977)
[25] *R. Buhl, H. K. Pulker und E. Moll:* Thin Solid Films, 80 (1981) 265
[26] *K. Gühring und W. Kerschl:* Industrie-Anzeiger, 100 (1980) 23
[27] *H. E. Brandolf:* ASM-Metals Congress (1982) 23.–28.10., St.Louis, USA
[28] *O. Knotek, W. Bosch und T. Leyendekker:* 11. Intern. Plansee Sem. (1985) Proc. Bd 1, 677
[29] *W. D. Münz:* 13. Intern. Conf. Met. Coatings, San Diego, USA, 7.–11.4.1986
[30] *H. Holleck:* 13. Intern. Conf. Met. Coatings, San Diego, USA, 7.–11.4.1986
[31] *W. Schintlmeister* et al.: Zeitschr. Metallkunde, 75 (1984) 874
[32] Multi-Arc: Application Reports 1986
[33] *C. W. Cathcart:* 13. Intern. Conf. Met. Coatings, San Diego, USA, 7.–11.4.1986
[34] *W. Kübert und R. Woska:* Werkstatt und Betrieb, 116 (1983) 117
[35] *M. Berger und E. Bergmann:* Material-Anlagen-Verfahren, (1985), H.7/8, 62

Härtewerten ist bemerkenswert gross, sie unterscheiden sich jedoch beträchtlich bezüglich ihrer chemischen, thermischen, mechanischen und elektrischen Werte. In zahlreichen Fällen sind diese Hartstoffe auch kombinier- und mischbar. Eine erfolgreiche Nutzung des Potentials, das in dieser Vielfalt von Eigenschaftskombinationen steckt, erfordert jedoch ein gezieltes Vorgehen (Bild 16).

Zunächst muss das für den vorliegenden Anwendungsfall vorliegende Tribosystem analysiert werden, um die Beanspruchungsart und den überwiegend wirksamen Verschleissmechanismus zu klären. Eine systemoptimale Auswahl der Werkstoffe erfordert zunächst eine Grobauswahl nach bekannten Werkstoffdaten und dann zusätzlich Modellverschleissuntersuchungen mit verschiedenen Werkstoffpaarungen. Erst nach einer Eingrenzung und Auswahl durch die Modellverschleisstests werden konkrete Werkzeuge beschichtet und in einer protokollierten Erprobung im Fertigungseinsatz getestet. Nach einem Kosten/Nutzenvergleich erfolgt die endgültige Einführung in die Fertigung.

Die genannte Vielzahl der in Frage kommenden Schichtwerkstoffe, die unter Umständen erforderliche Kombination verschiedener Werkstoffe z.B. als homogene Mischschicht, als Mischschicht mit graduellen Konzentrationsänderungen in der Dicke der Schicht, als heterogene Sandwichschicht oder als heterogene Mischschicht aus zwei oder mehreren Komponenten, erfordert vom Beschichtungsverfahren ein hohes Mass an Flexibilität. Ein solches Verfahren muss darüber hinaus in der Lage sein, das Schichtsystem bei Temperaturen aufzubringen, die den vorher unabhängig in seinen Eigenschaften durch Wärmebehandlungsverfahren optimierten Grundwerkstoff des Werkzeuges nicht mehr schädigen. Zusätzlich muss eine Schichtadhäsion und Schichtdicke gewährleistet sein, die dem spezifischen Anwendungsfall angepasst ist.

Die plasmagestützten PVD-Verfahren kommen heute diesem Ideal am nächsten und verfügen über ein erhebliches Entwicklungspotential. Die Zukunft wird zeigen, welche Verfahrensvariante die Anforderungen der neuen Schichtsysteme technisch und wirtschaftlich am besten meistert.

Adresse des Verfassers: *Helmut Freller*, Siemens AG, Zentrale Fertigungsaufgaben, Erlangen.

Bimetallzylinder für Kunststoffmaschinen

Eine zentrale Komponente von Spritzguss- und Extrusionsmaschinen für Kunststoffe ist der Zylinder mit der Förderschnecke, wo das rohe Kunststoffgut aufbereitet und zum Formgebungswerkzeug transportiert wird. Die Tendenz, die Ausstossleistung durch immer höhere Betriebsdrücke und -temperaturen zu steigern, sowie der Vormarsch der technischen Kunststoffe mit agressiven Zusätzen stellen höchste Anforderungen an die Verschleiss- und Korrosionsfestigkeit von Zylinder und Schnecke. Der Bimetallzylinder beruht auf der Idee, die unterschiedlichen Beanspruchungen an Volumen und Oberfläche durch Kombination von verschiedenen Werkstoffen zu einem Verbund optimal aufzufangen. In einem speziellen Zonenschmelzschleuderverfahren wird innen auf ein Trägerrohr aus hochwarmfestem Stahl eine verschleiss- und/oder korrosionsfeste Panzerschicht aufgebracht. Bei optimaler Anpassung der Schichteigenschaften an den Verarbeitungsprozess können bis zu 20fache Steigerungen der Standzeit gegenüber derjenigen bloss durch eine Nitrierbehandlung gehärteter Zylinder erreicht werden.

Anforderungen an Bimetallzylinder

Obschon in Werkstoffachkreisen bereits vom «Keramikzeitalter» gesprochen wird, welches das gegenwärtige

VON EUGEN MOHN, OLTEN

«Plastikzeitalter» demnächst ablösen soll, stehen heute weltweit einige hunderttausend Kunststoffmaschinen im Einsatz, und der Wachstumstrend auf diesem Gebiet scheint ungebrochen [1]. Im wesentlichen handelt es sich um Spritzgussmaschinen zur Herstellung von Formteilen sowie um Extrusionsmaschinen für die kontinuierliche Herstellung von Profilen.

Wie die schematische Darstellung in Bild 1 erkennen lässt, ist eine zentrale Komponente dieser Maschinen der Zylinder mit der Förderschnecke. Darin wird das meist in Granulatform zugeführte Kunststoffgut plastifiziert, mit den verschiedensten Zusätzen gemischt und homogenisiert, auf den erforderlichen Betriebsdruck komprimiert und transportiert. Bei Spritzgussmaschinen wird die so aufbereitete Masse schliesslich im Taktbetrieb über eine geeignete Düse mit Rückstromsperre in das Formwerkzeug eingespritzt, während sie bei Extrudern kontinuierlich durch die Matrize ausgestossen wird. Die üblichen Betriebsdrücke und -temperaturen im Inneren des Zylinders liegen normalerweise im Bereich von 1000–2000 bar und 200–500 °C.

Die Entwicklung von immer leistungsfähigeren Maschinen erhöht die Anforderungen an die Qualität der Spritzguss- und Extrusionszylinder. Ein höherer Ausstoss kann durch die Steigerung von Betriebsdruck und -temperatur erreicht werden. Dies führt zu enormen Beanspruchungen des Zylindermaterials bezüglich mechanischer Festigkeit. Man wünscht heute bereits Temperaturen bis 700 °C und Drücke bis 2500 bar, wofür die geeigneten Zylinder erst noch zu entwickeln sind.

Zusätzlich bringt der Vormarsch der technischen Kunststoffe eine immer höhere Beanspruchung der Zylinderinnenfläche bezüglich Verschleiss und Korrosion [2]. Durch Verwendung von Füllstoffen und Additiven (Aufhellern, flammhemmenden Mitteln, Antioxidantien, Farbpigmenten, Glasfasern, Kohlefasern usw.) sowie hochfluorierten oder hochchlorierten Kunststoffen wird der Verschleiss und die Korrosion in einem Ausmass gefördert, dass der Einsatz von Zylindern und Schnecken ohne speziellen Oberflächenschutz praktisch verunmöglicht wird.

Ausreichende Standzeiten der Zylinder sind für die wirtschaftliche Kunststoffverarbeitung nicht nur wegen de-