

Halterungskonzepte für die PVD Beschichtungstechnik

Dr.- Ing. Stefan Esser, 4pvd, Aachen

Einleitung

Ein wesentlicher Unterschied zu den CVD Verfahren ist die bei allen PVD Prozessen auftretende gerichtete Ausbreitung des Schichtmaterials /1/. Während im CVD Prozess das Schichtmaterial an fast allen Flächen und Stellen abgeschieden wird, werden im PVD Prozess vorzugsweise Flächen beschichtet, die Sichtkontakt zu den Verdampfern haben.

Daher richtet sich die Anordnung der Substrate im Beschichtungsraum nach den zu beschichtenden Flächen. Unterschiedliche Anordnung der Substrate hat nicht nur Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der Prozesse, sondern auch auf die Qualität der abgeschiedenen Schichten und die Leistung der beschichteten Produkte /2/.

Viele Anwendungen erfordern eine einseitige Beschichtung flacher Substrate (CD-ROM, Flachglas, Folien, etc.), oft auch 2-D Beschichtung genannt. Andere Anwendungen (Werkzeuge, Formen, Bauteile, etc.) erfordern Schichten auf Oberflächen nahezu jeder Orientierung, meist 3-D Beschichtung genannt. Einige Sonderfälle der 3-D Beschichtung können auch als 2 ½ – D Beschichtung bezeichnet werden (Innen- und Außenbeschichtung von Zylindern, Beschichtung von Fasern)

Grundlagen

Von den Verdampferquellen (Targets) einer PVD Beschichtungsanlage gehen wie in Bild 1 dargestellt keulenförmige Dampfwolken aus.

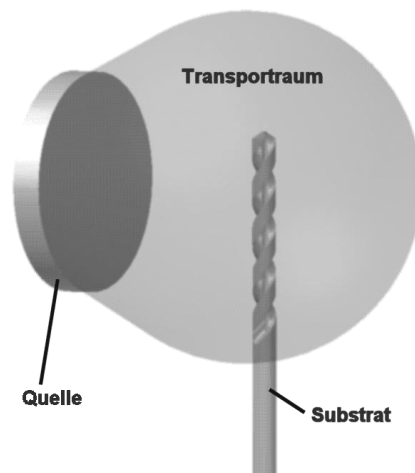


Bild 1: Ausbreitung des Schichtmaterials im PVD Verfahren

Die Konzentration des Dampfes und die Energie der Teilchen nimmt hierbei nach folgenden Gradienten ab /3/:

- Vom Zentrum des Targets nach außen
- Mit zunehmendem Winkel zur Flächennormalen des Targets
- Mit zunehmender Entfernung vom Target

Kreisförmige Verdampfer verfügen nicht über ausgedehnte Bereiche mit gleicher Verdampferate. Bei rechteckigen Verdampfern gibt es zumeist eine mehr oder weniger ausgeprägte Linie über der Längsachse der Targetoberfläche, entlang derer die Verdampferate konstant ist /4/.

Um eine gleichmäßige Schichtdicke auf den Substraten zu erzielen müssten diese eigentlich auf komplizierten Bahnen so vor den Verdampfern bewegt werden, dass alle funktionell zu beschichtenden Flächen gleich lange Zeit und in gleichem Winkel vor den Verdampfern verweilen.

Dies erinnert an eine Lackieranlage, in der die Lackierpistole fest montiert ist, und die Werkstücke am Ausleger eines Roboters befestigt sind. Tatsächlich sind auch Beschichtungsanlagen bekannt, bei denen die Verdampfer wie in einer Lackieranlage auf einem Roboterarm montiert sind. Diese Variante bedingt aber eine geringe Nutzung des Beschichtungsraumes und ist in der PVD Technik in dieser Form nicht weit verbreitet.

In der industriellen Produktion wird die Bewegung der Substrate aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten daher meist stark vereinfacht. Im Allgemeinen werden die Substrate auf einem Drehtisch an den Verdampferquellen vorbei bewegt. Hierbei verteilt sich die Dampf Wolke auf dem Umfang des Drehtisches bzw. auf den Substraten, die dort angeordnet sind. Bei Bedarf werden auch die Substrate auf dem Drehtisch dann noch gedreht.

Bei komplex geformten Substraten können mit einfacher Drehung nicht alle Flächen in die optimale Position zu den Verdampfern gebracht werden. Ein Fräser wie in Bild 2 dargestellt kann durch einfache Drehung relativ gleichmäßig auf dem Umfang und in der Spannt beschichtet werden.

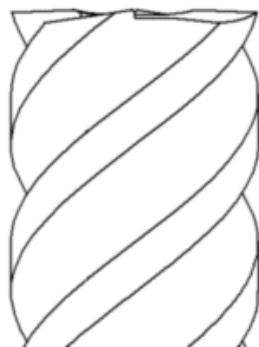


Bild 2: Funktionsflächen eines Fräasers

Die Stirnfläche dieses Fräasers weist aber bei konventioneller Chargierung immer senkrecht zur Oberfläche der Verdampfer und ist damit einer relativ geringen Schichtrate ausgesetzt. Ähnlich schwierig ist die rundum Beschichtung von Wendeschneidplatten. Später wird beschrieben, wie durch die Substratanordnung hier trotzdem eine akzeptable Schichtdicke erzielt werden kann.

Um die Zusammenhänge zunächst einfach darzustellen wird eine beispielhafte Anordnung mit einem Verdampfer und einem Zylinder als Substrat untersucht. Der Verdampfer sei $b = 100\text{mm}$ breit und der Zylinder habe einen Durchmesser von $d = 400\text{mm}$. Vor dem Verdampfer würde die Schichtrate stationär und im Mittel zu ca. $40\mu\text{m/h}$ gemessen. Auf dem Zylinder soll eine Schicht von ca. $3\mu\text{m}$ Dicke abgeschieden werden.

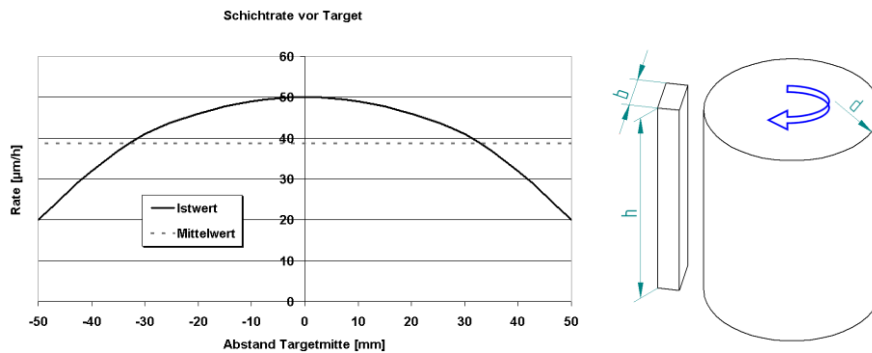


Bild 3: Schichtdickenverteilung vor einem Target

Bild 3 zeigt beispielhaft die Schichtrate vor diesem Verdampfer. Näherungsweise kann angenommen werden, dass der Mittelwert dieser Verdampferate sich gleichmäßig auf dem Umfang eines rotierenden Zylinders verteilt. Aus der Schichtrate vor dem Target S_{Target} wird in Abhängigkeit vom Durchmesser d des Substrattisches näherungsweise S_{Tisch} .

$$S_{\text{Tisch}} = S_{\text{Target}} \frac{b}{\pi d}$$

Dies zeigt, dass ein doppelter Tischdurchmesser die Schichtrate auf dem Tisch halbiert, so dass die Behandlungszeit verdoppelt werden muss. Für einen Verdampfer von 100mm Breite und einen Tisch von 400mm Durchmesser ergeben sich aus $40\mu\text{m/h}$ stationär ca. $3,2\mu\text{m/h}$ auf dem Umfang

Die Geschwindigkeit der Tischdrehung hat in erster Linie keinen Einfluss auf die Schichtrate. Allerdings werden in Abhängigkeit von der Umfangsgeschwindigkeit dünne oder dicke Lagen aus Schichtmaterial abgeschieden. Angenommen, die Drehzahl des Zylinders könne zwischen 1 min^{-1} und 10 min^{-1} reguliert werden, so kann die gewünschte $3\mu\text{m}$ dicke Schicht aus ca. 60 bis zu 600 Lagen abgeschieden werden. Hierbei wird die Dicke der einzelnen Lagen zwischen 50nm und 5nm betragen. Insbesondere bei der Herstellung von Multilayern wird die Umfangsgeschwindigkeit der Substrate zur wichtigen Größe $1/5$.

Substratanordnungen mit einer Drehachse

Auf der Mantelfläche des eingangs beschriebenen Zylinders können flache Substrate oder solche angebracht werden, die im Wesentlichen nur an einer Seite beschichtet werden sollen. Hierzu gehören z. B. Scheiben, aber auch Lochstempel oder Schrauberbits. Die Substrate werden so angeordnet, dass die zu beschichtende Fläche möglichst tangential auf dem Zylinder aufliegt.

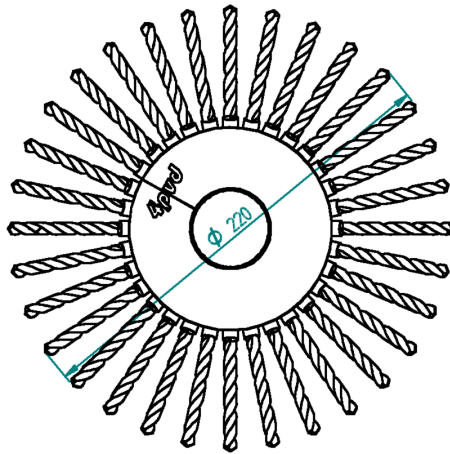


Bild 4: Substratanordnung für Bohrer mit einer Drehachse

Auch Bohrwerkzeuge etc. können in dieser Anordnung (Bild 4) beschichtet werden, wenn man von der Bohrerspitze zum Schaft hin eine abnehmende Schichtdicke akzeptiert. Vorteile dieser Anordnung sind:

- Hohe Schichtrate, da die zu beschichtenden Funktionsflächen immer den Verdampfern zugewandt sind (keine Eigenrotation)
- Hohe Füllgrade, da keine Mechanismen und Antriebe vorhanden sind. Ggf. kann die Zylinderfläche vollständig mit Substraten besetzt werden.
- Zuverlässig und wartungsarm, da keine Lagerstellen vorhanden sind
- Niedrige Anschaffungskosten, da einfache Konstruktion

In folgenden Fällen führt die beschriebene Anordnung zu Nachteilen:

- Substrate, die eine gleichmäßige Beschichtung rundum oder auf einer Zylinderfläche erfordern. Diese Anordnung erzeugt eine gleichmäßige Beschichtung nur auf den Flächen, die in etwa tangential auf der Zylinderfläche des Substrattisches liegen.
- Substrate, die länger sind als etwa das 0,4fache des Tischdurchmessers. Diese ragen so weit in die Tischmitte, dass nur noch wenige auf dem Umfang chargiert werden können.

Für diese Anwendungen empfehlen sich z. B. Substrattische mit mehreren Drehachsen.

Substratanordnungen mit mehreren parallelen Drehachsen

Eine häufige Aufgabe besteht in der Beschichtung von relativ kleinen zylindrischen Substraten (Bohrer, Fräser, Kolbenstangen). Diese werden dann z. B. auf dem Rand des bisher betrachteten Substrattisches angebracht (Bild 5) und zusätzlich um die eigene Achse gedreht. In dieser Anordnung, oft als Planetensystem bezeichnet, wird das Schichtmaterial des Verdampfers auf eine größere Fläche verteilt, als im bisherigen Beispiel.

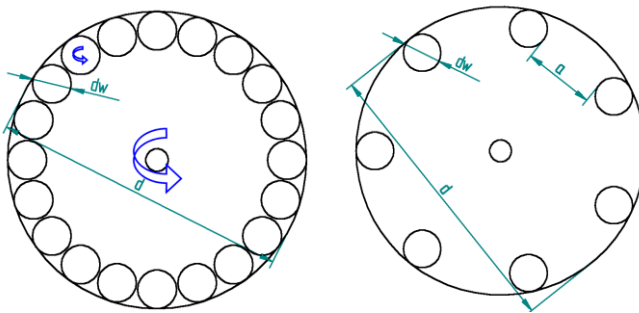


Bild 5: Planetäres Antriebssystem mit verschiedenen Abständen

Würden die Planeten einander berühren, würde die zu beschichtende Fläche gegenüber einem einfachen Zylinder etwa verdreifacht. Ist der Abstand zwischen den Planeten doppelt so groß wie ihr Durchmesser, bleibt die resultierende Oberfläche in etwa gleich dem bisher beschriebenen Zylinder. Bei üblichen Abständen $a < d_w$ liegt die Schichtrate auf dem Planetensystem in etwa bei der Hälfte der Schichtrate, die auf einem Zylinder erzielt wird.

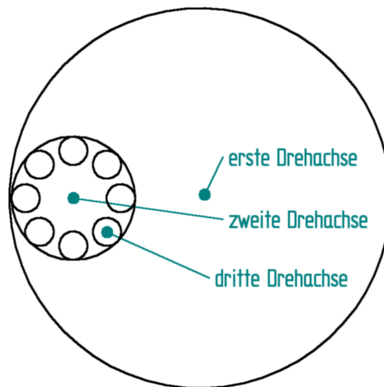


Bild 6: Substrattisch mit drei Drehachsen

Aus wirtschaftlichen Gründen werden noch kleinere Bauteile sogar über eine dritte Achse angetrieben, oft auch Mondsystem genannt (Bild 6). Näherungsweise kann man annehmen, dass jede weitere Drehachse die Anzahl der platzierbaren Zylinder verdoppelt, hierdurch aber auch die Schichtrate auf dem einzelnen Zylinder halbiert.

Diese Faustregel lässt sich allerdings nur so lange anwenden, wie die Planeten oder Monde noch mindestens drei der untergeordneten Elemente aufnehmen können. Ein Planetensystem, das nur zwei Monde je Planet aufnimmt, bietet weniger Platz für den einzelnen Mond als ein System mit der doppelten Anzahl kleinerer Planeten, aber ohne Monde (Bild 7). In diesem Fall kann auch ein System mit größeren Planeten gewählt werden.

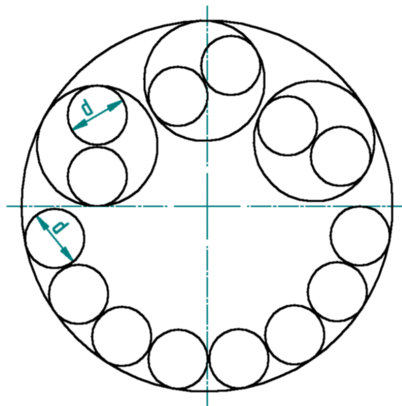


Bild 7: Ungünstige Planetenaufteilung (obere Bildhälfte)

Da bei einem Tischsystem mit Monden diese auch noch zur Tischmitte, also weg von den Verdampfern bewegt werden, hat in diesem Fall ein System ohne Monde deutlich höhere Schichtrate. Allerdings haben Systeme mit mehr Drehachsen bezüglich der Flexibilität Vorteile gegenüber Systemen mit nur zwei Drehachsen.

Besonders bei der Herstellung dünner oder mehrlagiger Schichten muss die Anordnung der Antriebe der einzelnen Drehachsen beachtet werden, da sich hieraus erhebliche Unterschiede bezüglich der Drehgeschwindigkeit ergeben können, die sich wiederum direkt auf die Dicke der einzelnen Schichtlagen auswirken.

Planetengeräte (Umlaufrädergetriebe) können über „außen – außen“ oder „außen – innen“ Paarungen angetrieben werden. Bei fest stehendem Sonnenrad addiert die Paarung außen – außen die Umfangsgeschwindigkeiten von Substratteller (genau genommen Teilkreis auf dem die Planeten liegen) und Planetenrad (Bild 8).

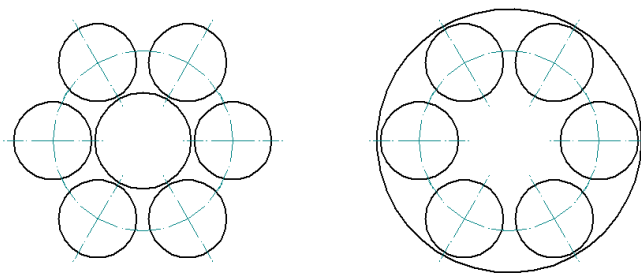


Bild 8: Planetengeräte außen – außen und innen - außen

Die Paarung außen – innen führt im gezeigten Beispiel dazu, dass die Umfangsgeschwindigkeit der Planeten an der äußersten Position jeweils gleich null ist. Somit erzeugt diese Paarung bei jedem Passieren eines Verdampfers eine relativ dicke Schichtlage auf einer Stelle.

Da die Antriebsräder sowohl kleiner als auch in gewissem Maße größer als die Planeten sein können, kann die Geschwindigkeit der Substrate auch über die Auswahl des Übersetzungsverhältnisses zwischen Sonnen- und Planetenrad variiert werden. Dies gilt übrigens in ähnlicher Form auch, wenn die Planeten (oder die Monde) nur unterbrochen (diskontinuierlich) angetrieben werden. Bei einem unterbrochenen Antrieb kommt allerdings als zusätzlicher Parameter noch hinzu, an welcher Stelle sich die Klinke befindet, und um welchen Winkel sie den Planeten (bzw. Mond) weiterdreht.

Liegt das klinkende Element innerhalb der Dampfkeule (Bild 9 rechts), so erfolgt eine Drehung während eine Schichtlage abgeschieden wird. Liegt das klinkende Element außerhalb der Dampfkeule (Bild 9 links), so erfolgt eine Drehung während die Schicht sich ungleichförmig auf dem Substrat abscheiden (Bild 9 links).

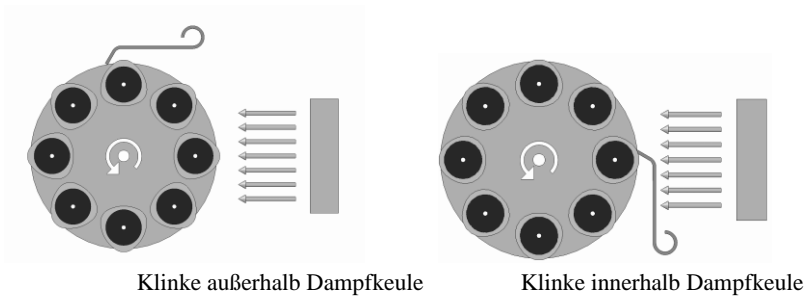


Bild 9: Einfluss der Position der Klinke

Allerdings ist zu beachten, dass eine Klinke wie in Bild 9 rechts mit sehr hoher Rate beschichtet wird. Überschlägig ergibt sich als Schichtdicke je Zyklus auf der Klinke das Vierfache der Schichtdicke auf den Substraten. Bei $5\mu\text{m}$ je Zyklus am Substrat, werden auf der Klinke in 40 Zyklen ca. 1mm Schicht abgeschieden, wodurch deren mechanische Eigenschaften oft erheblich verändert werden.

Substratanordnungen in mehreren Ebenen

Um das Nutzvolumen des Beschichtungsraumes besser zu nutzen, werden Substrate oft in mehreren Ebenen übereinander angeordnet. Hierbei müssen einige neue Parameter berücksichtigt werden. Wie in den vorangegangenen Kapiteln beschrieben erzeugen die Quellen teilweise sich überlagernde Dampfkeulen (Bild 10).

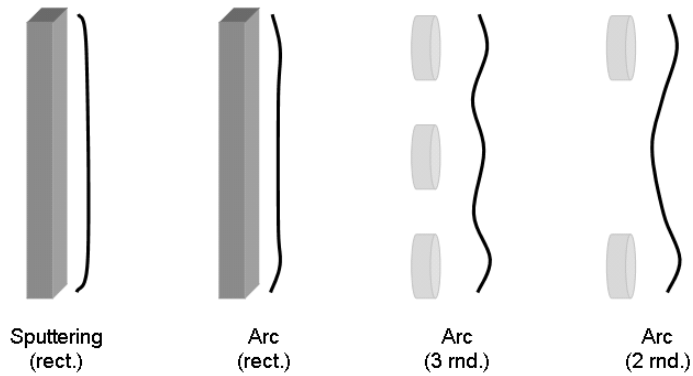


Bild 10: Dampfkeulen, teilweise überlagert

Hieraus ergibt sich in der Mitte des Beschichtungsraumes eine Zone mit relativ gleichmäßiger Schichtrate. An den Enden des Beschichtungsraumes fällt die Schichtrate immer ab, so dass diese Bereiche nicht mit Substraten bestückt werden sollten. Die zulässige Toleranz der Schichtdicke ergibt hierbei, wie weit die Dampfkeulen ausgenutzt werden können.

Sofern nur eine 2 dimensionale Beschichtung erforderlich ist, können die Substrate wie voran beschrieben sehr dicht chargiert werden. Bei dreidimensionaler Beschichtung kommt der Abstand der Ebenen zueinander und die Ausführung der Trägersysteme als wichtiger Parameter hinzu.

Je größer der Abstand der Oberkante einer Ebene zur ersten abschattenden Kante der nächsten Ebene, desto höhere Schichtdicke kann auf den Stirnflächen der dargestellten Substrate verglichen mit Ihren Mantelflächen erzielt werden. In Bild 11 sind zur Vereinfachung nur Bahnen von Schichtmaterial dargestellt, die sich auf den Stirnseiten der Substrate ablageren können.

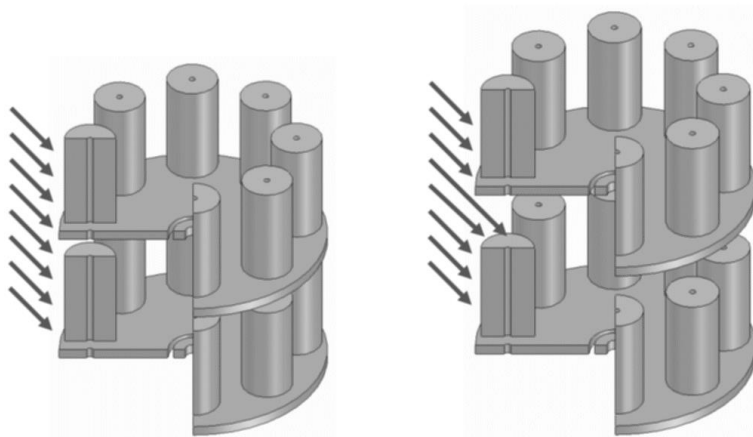


Bild 11: Einfluss des Abstands zweier Ebenen

Als Faustregel kann angenommen werden, dass die Ebenen untereinander mindestens ebensoviel Abstand haben sollen, wie das Schichtmaterial in Richtung der Tellermitte eindringen soll (Regel von der Schichtabscheidung in Bohrungen). Da die Stirnseiten der dargestellten Substrate ungünstiger zum Target geneigt sind als die Zylinderflächen, müssen in der Praxis für homogene Schichtdickenverteilung größere Abstände zwischen den Ebenen eingestellt werden.

Substratanordnungen mit geneigten Drehachsen

Die bisher beschriebenen und weit verbreiteten Halterungen ordnen rotationssymmetrische Substrate entweder liegend, d. h. mit der Stirnfläche zum Verdampfer oder stehend d. h. mit der Mantelfläche zu den Verdampfern an. Beide Varianten sind im Hinblick auf die Schichtdickenverteilung ungünstige Extreme. Theoretisch kann nur eine Anordnung mit geneigten Drehachsen der Substrate eine gleichmäßige Schichtdickenverteilung z. B. an einem Spiralbohrer erreichen (Bild 12).

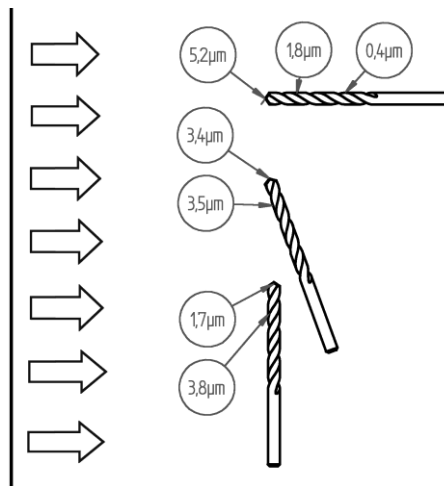


Bild 12: Schichtdickenverteilung in Abhängigkeit der Neigung der Drehachse der Substrate

Jedoch sind Anordnung und Antrieb geneigter Drehachsen aufwändig zu realisieren. Eine wesentliche Schwierigkeit liegt im Antrieb der dritten Drehachse. Dieses Problem kann jedoch gelöst werden, wenn der Antrieb der dritten Drehachse aus dem inneren des Tellers heraus erfolgt /6/. Ein Beispiel der Ausführung zeigt Bild 13.

Bei genauerer Betrachtung wird aus dem anfänglichen Nachteil der geneigten Drehachsen (aufwändige Konstruktion) ein beachtlicher Vorteil. Da der Antrieb der dritten Drehachse im Gehäuse des Tellers untergebracht ist, ist er geschützt vor den Einwirkungen des Plasmas und der Beschichtung. Außerdem ist der Antrieb immer mit dem Teller verbunden, und muss nicht bei jedem Beschichtungszyklus neu justiert werden.

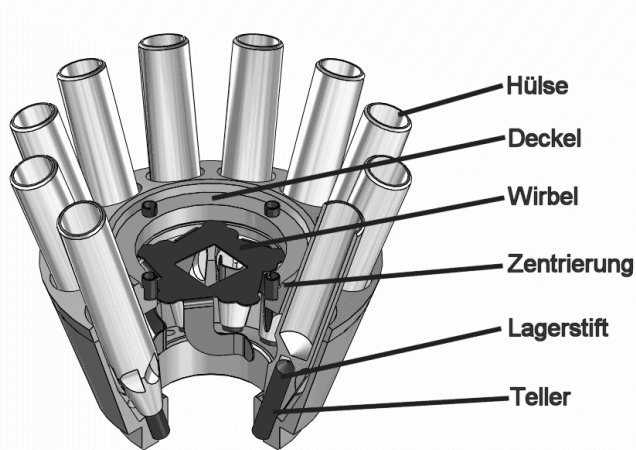


Bild 13: Ausführungsbeispiel für Halterung mit geneigten Drehachsen

Der wohl bedeutendste Vorteil entsteht aber aus der Möglichkeit, die Substrate dichter zu chargieren, ohne dass die Schichtrate oder Qualität an den Funktionsflächen abnimmt. Die Animation in Bild 14 zeigt, dass durch die Neigung der Drehachsen der Abstand zwischen den Ebenen verringert werden kann, obwohl der Abstand der Substrate zueinander an den Funktionsflächen gleich bleibt.

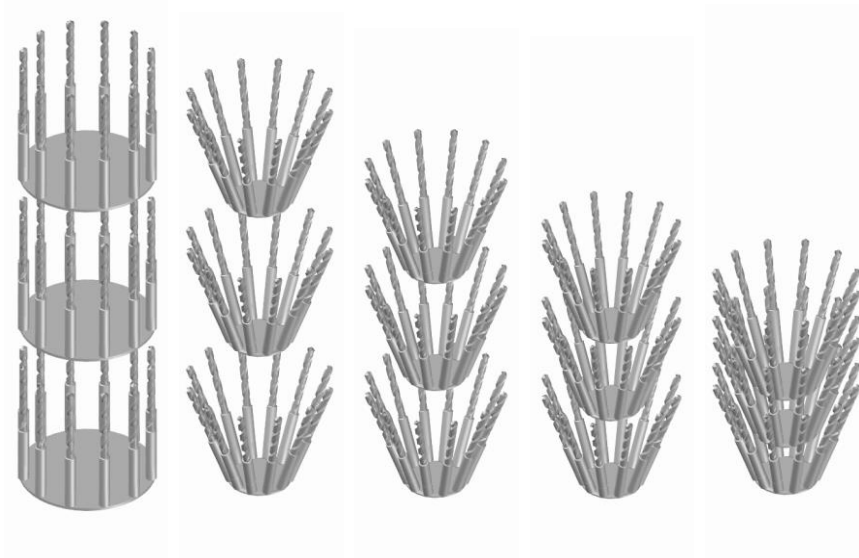


Bild 14: Migration von senkrechten zu geneigten Drehachsen

Die Neigung der Drehachsen der Substrate ist allerdings nur dann sinnvoll, wenn deren Länge geringer ist als der Durchmesser des Tellers, auf dem sie drehen. Andernfalls kommen die unteren Enden der Substrate einander zu nahe. Auch können bei geneigten Drehachsen Substrate unterschiedlicher Länge und Durchmesser kaum auf einem Teller kombiniert

werden. Aber in der Massenproduktion insbesondere kleiner Substrate kann mit der gezeigten Anordnung der Füllgrad einer PVD Anlage durchaus verdreifacht werden (Bild 15).

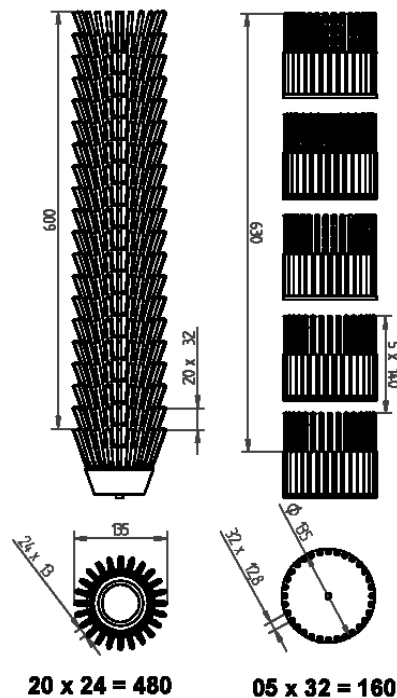


Bild 15: Vergleich Raumausnutzung von Tellern mit geneigten (links) und senkrechten (rechts) Drehachsen

Substrathalter in der Massenproduktion

Bei der PVD Beschichtung von großen Serien ist eine gute Raumausnutzung in der PVD Anlage unbestritten ein vorrangiges Ziel. Bei kleinen Substraten wie z. B. Wendeschneidplatten oder Motorenteilen kann aber eine weitere Steigerung des Füllgrades unwirtschaftlich werden, wenn dadurch das Handling der Substrate erschwert wird. Ungünstig sind auch Chargen, in denen mehr als eine Tagesproduktion eines Produktes Platz hat, da sie schlecht in den Produktionsablauf passen.

Wenn bei solchen kleinen Substraten der Erlös je Stück in der Lohnbeschichtung z. B. unter 0,50 EUR liegt, oder wenn in der Produktion die anlagenbezogenen Herstellkosten z. B. unter 0,10 EUR liegen, ist eine Rationalisierung im Handling der Substrate wirkungsvoller als eine Kapazitätssteigerung der PVD Anlage in ähnlicher Größenordnung.

Bild 16 zeigt ein Beispiel für ein PVD beschichtetes Produkt, von dem z. B. 1000 Stück in eine Charge passen. Hieraus ergeben sich für das Beispiel anlagenbezogene Herstellkosten von 0,50 EUR je Stück. Die Kosten je Stück, die außerhalb der PVD Anlage entstehen, richten sich stark nach der Notwendigkeit einzelne Substrate zu „handlen“. Diese variieren im

Beispiel von 0,30 EUR für den Fall dass ein einziges Halterungssystem für den gesamten Produktionsprozess verwendet werden kann bis hin zu 0,75 EUR für den Fall, dass die Halterung im Verlauf des Produktionsprozesses 2 mal gewechselt werden muss.

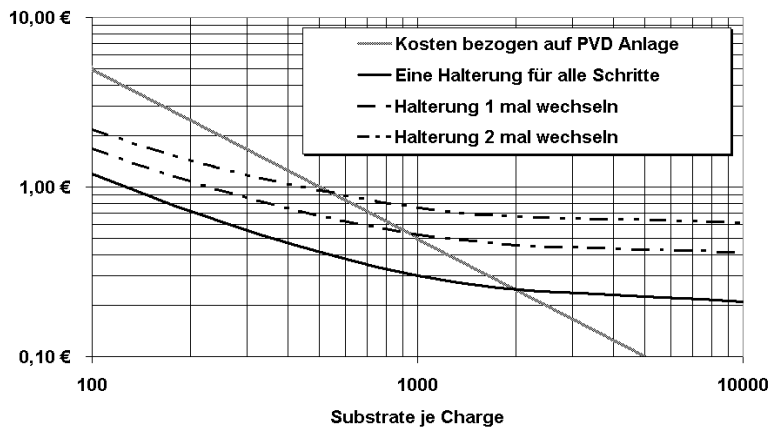


Bild 16: Produktionskosten durch PVD Beschichtung und Handling

Das Beispiel zeigt, dass eine Verdopplung des Füllgrades der PVD Anlage erforderlich ist, um eine gleichwertige Rationalisierung zu erzielen wie die Elimination eines Schrittes in der Handhabung. Im Gegenzug kann durchaus eine Kapazitätseinbuße von 30% in der PVD Anlage ökonomisch sinnvoll sein, wenn im Gegenzug das Handling entsprechend vereinfacht werden kann.

Allerdings müssen Halterungen, die für mehrere Schritte der PVD Produktion verwendet werden, strengeren Anforderungen genügen, als reine PVD Halterungen. Z. B. sollten Halterungen für Beschichtung und Reinigung korrosionsbeständig sein. Dies ist ein Ausschlußkriterium für die meisten heute verwendeten Magnetwerkstoffe. Außerdem sollten Zwischen den Halterungen und den Substraten möglichst keine eng anliegenden Flächen vorkommen, in denen sich das flüssige Reinigungsmedium ansammeln kann. Ideal sind z. B. Halterungen, die die Substrate nur in Punkten berühren (Bild 17).

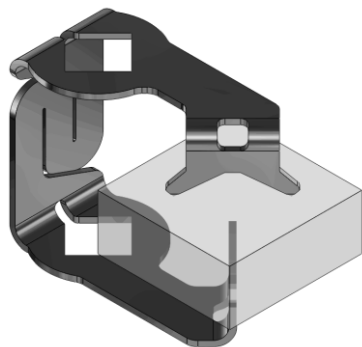


Bild 17: TongS Halteklammer für Wendeschneidplatten

Solche Halterungen können zu Spießen aneinander gereiht werden (Bild 18) und Substrate mit planparallelen Flächen während der Reinigung, der Beschichtung und eventuell noch während weiterer Behandlungsschritte verwendet werden.

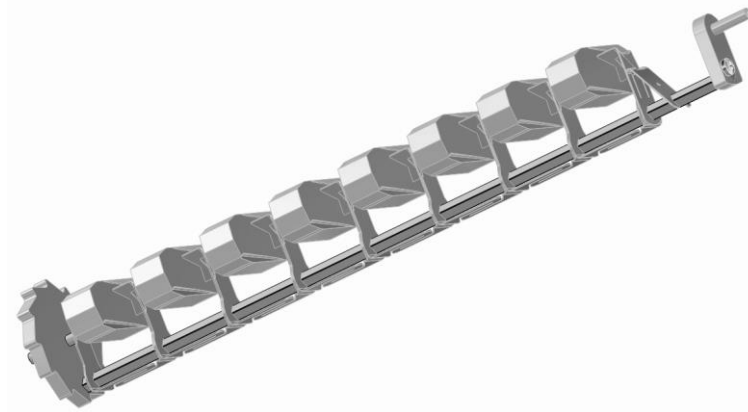


Bild 18: TongS Halterung für den Einsatz in mehreren Schritten der PVD Produktion

Halterungen wie oben beschrieben bergen erhebliche Potenziale für Rationalisierung und Steigerung der Qualität. Allerdings sind diese Steigerungen meist mit einer höheren Spezialisierung der Halterung auf ein bestimmtes Produkt hin verbunden. Daher müssen in jedem Fall zunächst das vorhandene und das mögliche Auftragsvolumen überprüft werden.

Zusammenfassung

Die hohen Temperaturen und das Fehlen von Schmiermitteln stellen erhebliche Anforderungen insbesondere an bewegte Substrathalter in der PVD Technik. In den Jahren des Aufbruchs konnten sich die Beschichter noch leisten, Substrate relativ frei in der Kammer aufzustellen. Mit zunehmender Marktsättigung müssen neue Produkte und Aufträge exakt kalkuliert werden und erfordern angepasste Halterungssysteme.

Hierbei geht es meist, aber nicht immer um die optimale Ausnutzung des Beschichtungsraumes der PVD Anlage. Bei kleinen Substraten wird zunehmend das gesamte Handling der Produkte von der Warenannahme bis hin zum Versand interessant, da die Kosten für Logistik und Umladen der Substrate hier höher sein können als die eigentlichen Kosten der Beschichtung

Schon bei der Aquisition neuer Aufträge müssen die Möglichkeiten und Grenzen der Halterungssysteme bekannt sein, um ein passendes Angebot abgeben zu können. In der Phase der Validierung wird oft aus Kosten- und Zeitgründen ein provisorisches Halterungssystem verwendet, welches dann für die spätere Produktion eine ungünstige oder unwirtschaftliche Anordnung der Substrate festlegt.

Dies alles zeigt, wie wichtig die richtige Auslegung der Substrathalterungen in jeder Phase des Produktlebenszyklus ist. Sinnvolle Anordnungen von Beginn an können teure Validierungsprozesse verkürzen und in der laufenden Produktion täglich Ressourcen sparen und Wettbewerbsvorteile sichern.

Literatur

1. Leyendecker T. Dünne Beschichtungen zur funktionalen Beschichtung technischer Oberflächen, Sprechsaal Vol 120, Nr. 8 Jg. 1987, Coburg 1987
2. Bouzakis K. Wear development on cemented carbide inserts coated with variable film thickness in the cutting wedge region, Surface and coating Technology 188-189 (2004) 636-643
3. Frey, H., Kienel G. Dünnschichttechnologie, VDI Verlag Düsseldorf 1987
4. N. N. Werksangabe Gencoa, Hersteller von Sputterquellen, www.gencoa.com
5. Jehn Herrmann A. Praxishandbuch moderne Beschichtungen, Hanser Verlag 2001
6. N. N. Gebrauchsmuster DBGM 20 2004 009 265.5

Formatiert: Englisch (USA)