



SCHWEIZERISCHE EIDGENOSSENSCHAFT
BUNDESAMT FÜR GEISTIGES EIGENTUM

(19)

Erfindungspatent für die Schweiz und Liechtenstein

Schweizerisch-liechtensteinischer Patentschutzvertrag vom 22. Dezember 1978

(11) CH 650 028 A5

(51) Int. Cl.⁴: C 23 C 14/24
C 23 C 14/54
C 03 C 17/00

(12) PATENTSCHRIFT A5

(21) Gesuchsnummer: 7216/80

(73) Inhaber:
Balzers Aktiengesellschaft, Balzers (LI)

(22) Anmeldungsdatum: 26.09.1980

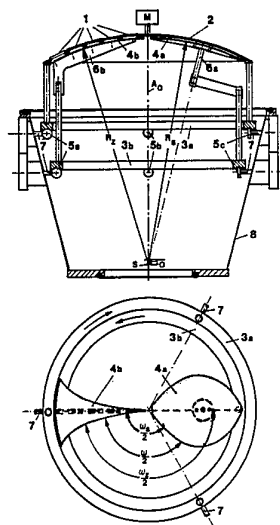
(24) Patent erteilt: 28.06.1985

(45) Patentschrift
veröffentlicht: 28.06.1985

(72) Erfinder:
Kraus, Thaddäus, Triesen (LI)

(54) Anordnung zum gleichförmigen Beschichten von Rotationsflächen durch Bedampfen im Hochvakuum.

(57) Die zu beschichtenden Rotationsflächen (1) befinden sich in Zentrierbohrungen einer rotierenden Kalotte (2), die zentrisch auf einem Drehring (3a) sitzt. Der Drehring wird mit Hilfe von festen Lauf- und Antriebsrollen (5a, b, c) zentriert, so dass die Dampfquelle (O) möglichst nahe an der Rotationsachse (A_O) und im Krümmungsmittelpunkt (S) der Kalotte (2) liegt. Der durch Erhitzen im Hochvakuum verdampfte Stoff kondensiert an den Substraten als dünne Schicht. Aus dem Verlauf der Schichtdicke wird der Umriss einer Korrektur-Blende für konstante Strahlungsstärke des Dampfes in alle nutzbaren Richtungen im Raum berechnet unter der vereinfachten Annahme einer zentralen, punktförmigen Dampfquelle. Eine entsprechende Korrektur-Blende (4a od. 4b) wird nun in unmittelbarer Nähe der zu beschichtenden Rotationsflächen (1) mittels einer Halterung (6a bzw. 6b) an einem Drehring (3b) befestigt, der in gleicher Weise wie der andere Drehring (3a) zentriert ist, aber gegenläufig um dieselbe Achse (A_O) rotiert. Dadurch kommt unter sonst gleichen Bedingungen und trotz Abweichung von den idealen Voraussetzungen eine Gleichförmigkeit der Beschichtung mit hoher Präzision zustande, d.h. Gleichheit der Schichtdicke auf allen Punkten der Rotationsflächen mit gleichen Mittelpunktsabständen.



PATENTANSPRÜCHE

1. Anordnung zum gleichförmigen Beschichten einer Anzahl Rotationsflächen durch Bedampfen in einem Hochvakuum-Rezipienten mit mindestens einer Dampfquelle, mit einer um eine feste Achse rotierenden Halterung für alle zu beschichtenden Substrate und mit mindestens einer um eine feste Achse rotierenden Korrektur-Blende für die Dampfstrahlung, gekennzeichnet durch folgende Merkmale:

- a) alle Substrat-Achsen (A_1, A_2 usw.) schneiden sich in einem Punkt (S),
- b) alle Substrat-Pole (P_1, P_2 usw.) haben gleichen Abstand vom Schnittpunkt (S) der Substrat-Achsen,
- c) die Rotations-Achse (A_0) der Substrat-Halterung führt durch den Schnittpunkt (S) der Substrat-Achsen,
- d) die Rotations-Achse der Korrektur-Blende(n) deckt sich mit der Rotations-Achse (A_0) der Substrat-Halterung, deren Rotation gegenläufig ist,
- e) der Abstand zwischen Dampfquelle (O) und Schnittpunkt (S) der Substrat-Achsen entspricht weniger als 15 % vom Abstand zwischen Schnittpunkt (S) der Substrat-Achsen und den Substrat-Polen (P_1, P_2 usw.),
- f) der Abstand zwischen Korrektur-Blende und Substraten entspricht weniger als 15 % vom Abstand (R_p) zwischen Schnittpunkt (S) der Substrat-Achsen und Substrat-Polen (P_1, P_2 usw.),
- g) der Umriss der Korrektur-Blende richtet sich nach der empirischen Verteilung der Dampfstrahlung im Raum, so dass auf einer Kugelfläche, auf der alle Substrat-Pole liegen, eine gleichmässige Beschichtung entsteht.

2. Anordnung nach Patentanspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Substrat-Halterung (2) zentrisch auf einem Drehring (3a) sitzt, der von festen Lauf- und Antriebsrollen (5) getragen wird, deren Achsen sich in einem Punkt der Drehringachse (A_0) schneiden.

3. Anordnung nach Patentanspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Korrektur-Blende (4) an einem Drehring (3b) befestigt ist, der von festen Lauf- und Antriebsrollen (5) getragen wird, deren Achsen sich in einem Punkt der Drehringachse (A_0) schneiden.

4. Anordnung nach Patentanspruch 2 oder 3, dadurch gekennzeichnet, dass

- a) der Drehring (3) von 3 festen Lauf- und Antriebsrollen getragen wird, von welchen 2 Rollen (5a, b) stark kugelig gewölbt sind,
- b) der Drehring (3) auf der unteren Stirnfläche mit einer Führungsrille versehen ist,
- c) der Drehring (3) auf jeder der beiden stark kugelig gewölbten Rollen (5a, b) mit beiden Borden der Führungsrille aufliegt,
- d) der Drehring (3) mit der dritten Rolle (5c) nur einen Berührungspunkt hat.

5. Anordnung nach Patentanspruch 2 oder 3, dadurch gekennzeichnet, dass die Wellen (7) der Lauf- und Antriebsrollen (5) durch die Wand (8) eines schachtförmigen Abschnitts des Hochvakuum-Rezipienten hindurchgeführt sind.

6. Anordnung nach Patentanspruch 1 mit einer Korrektur-Blende, deren Umriss mit Hilfe von Öffnungswinkel ω und Poldistanz φ eines vom Schnittpunkt (S) der Substrat-Achse ausgehenden und der Umrisslinie entlang gleitenden Leitstrahls (L) dadurch gekennzeichnet, dass das Produkt aus einem Zahlenwert $|\omega|_\varphi$ des Öffnungswinkels ω und einem Zahlenwert $|I_0|_\varphi$ der von der Dampfquelle unter Weglassung der Blende dargebotenen und von der Poldistanz φ abhängigen Strahlungsstärke I_0 sich im ausgenützten Intervall von φ nicht verändert entsprechend der Zahlenwertgleichung:

$$|\omega|_\varphi \cdot |I_0|_\varphi = \text{const.}$$

7. Anordnung nach Patentanspruch 1 mit einer Korrektur-Blende, deren Umriss mit Hilfe von Öffnungswinkel ω und Poldistanz φ eines vom Schnittpunkt (S) der Substrat-Achsen ausgehenden und der Umrisslinie entlang gleitenden Leitstrahls (L) durch die Zahlenwertgleichung

$$\omega = 2\pi \left[\frac{\cos \varphi_{\max}}{\cos \varphi} \right]^k \text{ rad}$$

definiert ist, wenn $\varphi_{\max}$ die obere Grenze des ausgenützten Intervalls von φ und der Exponent k eine Zahl $0 < k < 5$ bedeutet.

8. Anordnung nach Patentanspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Korrektur-Blende kugelig gewölbt ist und der Krümmungsmittelpunkt mit dem Schnittpunkt (S) der Substrat-Achsen zusammenfällt.

9. Anordnung nach Patentanspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Korrektur-Blende zylindrisch gebogen ist und die Zylinder-Achse (z) sich mit der Rotations-Achse (A_0) im Schnittpunkt (S) der Substrat-Achsen senkrecht schneidet.

10. Anordnung nach Patentanspruch 8 oder 9, dadurch gekennzeichnet, dass eine sphärische und eine zylindrische Korrektur-Blende einander gegenüberliegend synchron um eine gemeinsame Achse rotieren.

11. Anordnung nach Patentanspruch 1 zur beinahe gleichmässigen Beschichtung konkaver Substrate, dadurch gekennzeichnet, dass der Abstand R_p der Substrat-Pole (P_1, P_2 usw.) vom Schnittpunkt (S) der Substrat-Achsen etwa dreimal grösser als der Betrag vom Hauptkrümmungsradius R der Substrate ist:

$$R_p \approx 3 |R|.$$

12. Anordnung nach Patentanspruch 1 zur nach aussen zunehmenden Beschichtung konkaver Substrate, dadurch gekennzeichnet, dass der Abstand R_p der Substrat-Pole (P_1, P_2 usw.) vom Schnittpunkt (S) der Substrat-Achsen etwa $\frac{3}{2}$ mal grösser als der Betrag vom Hauptkrümmungsradius R der Substrate ist:

$$R_p \approx \frac{3}{2} |R|.$$

Das Aufdampfen von Stoffen im Hochvakuum ist auf Grund seiner hohen Präzision besonders geeignet zur exakten Beschichtung sphärischer oder planer Oberflächen z. B. von optischen Linsen, Spiegeln und Filtern. Bei der industriellen Beschichtung von Substraten kommt es aber neben der genauen Einhaltung der Schichtdicke auch auf niedrige Herstellkosten an. Man ist aus diesem Grunde bestrebt, möglichst viele Substrate im Dampfstrahlkegel anzuordnen, und nimmt dafür Differenzen der Schichtdicke in Kauf, die sowohl zwischen verschiedenen Stellen desselben Substrates als auch zwischen gleichen Stellen verschiedener Substrate auftreten können. Diese Differenzen auf ein akzeptables Mass zu reduzieren, ist eine stets wiederkehrende Aufgabe.

Die bei der Beschichtung von Substraten mittels einer Dampfquelle vorliegende geometrische Anordnung und die dabei zu berücksichtigenden Winkel und Distanzen sind in Fig. 1 der anliegenden Zeichnung schematisch dargestellt;

Ferner zeigt Figur 2 Niveaulinien der Beschichtung planer Substrate;

Figur 3 ein Beispiel einer Beschichtungsanordnung gemäss Erfindung;

Figur 4 die für die Konstruktion einer Korrekturblende massgebenden gemoetrischen Grössen;

Figur 5 Profile gleichförmiger Beschichtungen konkaver und konvexer Substrate.

Am einfachsten legt man die Substrate, wie Figur 1 zeigt, in Zentrierbohrungen einer kugelig gewölbten Scheibe (H), auch «Kalotte» genannt, so dass alle Substrat-Pole (P_0, P_1, P_2 usw.) gleichen Abstand vom gemeinsamen Schnittpunkt (S) der Substrat-Achsen (A_0, A_1, A_2 usw.) haben, und lässt sie im Hochvakuumrezipienten um eine vertikale, durch Pol und Krümmungsmittelpunkt der Kalotte führende Achse (A_0) rotieren.

Unter «Substrat-Pol» ist hier der Mittelpunkt der zu beschichtenden Fläche, unter «Substrat-Achse» die auf dem Substrat-Pol errichtete Senkrechte zu verstehen.

Befindet sich die Dampfquelle (O), die beispielsweise ein «Schiffchen» aus Tantal-Blech sein kann, das mit Magnesiumfluorid gefüllt und durch elektrischen Strom erhitzt wird, im Schnittpunkt (S) der Substrat-Achsen, dann kondensiert der im Hochvakuum verdampfte Stoff auf den Substraten als dünne Schicht, deren Dicke infolge der von Punkt zu Punkt sich verändernden Einflussgrössen, wie Emissions-Winkel φ , Abstand r und Einfallswinkel Θ , erhebliche Unterschiede aufweist. Auf dem in Figur 1 als Beispiel massstabgerecht dargestellten planen Substrat P_1 entspricht die Schichtdicke am äusseren Rand bloss etwa 87 % und am inneren Rand etwa 96 % der Schichtdicke am Pol P_0 . Diese Beschichtung ist in Figur 2a in der Form einer Höhenkarte mit Hilfe von Niveau-Linien dargestellt, wobei die Zahlen das Verhältnis der Niveau-Höhe zur Schichtdicke am Pol P_0 angeben. Noch grössere Abweichungen hat die Beschichtung eines Substrats in der Position P_2 .

Die systematischen Abweichungen nehmen ab, wenn man die Dampfquelle im Schnittpunkt der Substrat-Achsen zwar beibehält, aber den Winkel α_1 , den die Substrat-Achse A_1 mit der Rotations-Achse A_0 bildet, verkleinert und den Abstand R_p von der Dampfquelle (O) vergrössert. Diese Massnahmen sind jedoch wegen ungenügender Ausnützung des Dampfstrahlkegels und zu hohen Herstellkosten unwirtschaftlich.

Demgegenüber pflegt man häufig die Dampfquelle in demjenigen Abstand von der Rotations-Achse (A_0) anzuordnen, in welchem die systematischen Abweichungen ein Minimum annehmen, wie beispielsweise im Punkt O' in Figur 1. Dabei bleiben meist unerwünschte systematische Abweichungen zurück. Besonders störend empfunden wird die Unsymmetrie der Beschichtung von Substraten, welche in grösserem Abstand von der Dampfquelle angeordnet sind.

Einen höheren Grad an Symmetrie kann man jedoch erzielen, wenn man nach bekannten Regeln der 2-dimensionalen Parameter-Optimierung von der Position P_1 ausgehend den Abstand des Substrat-Pols von der Dampfquelle verkürzt und zugleich den Abstand des Schnittpunktes der Substrat-Achse mit Rotations-Achse von der Dampfquelle verlängert bis schliesslich der Substrat-Pol (P_1') die gleiche Schichtdicke wie der Pol P_0 aufweist und zugleich den Mittelpunkt einer Niveau-Linie bildet. Als Beispiel sind die auf einem planen Substrat in der optimalen Position P_1' erhaltenen Niveau-Linien in Figur 2b dargestellt. Da die Substrat-Pole (P_1', P_2' usw.) nicht mehr gleiche Abstände vom Schnittpunkt der Substrat-Achsen haben, sind Halterungen (H') in der Form abgestufter Kugelzonen erforderlich, die jeweils auf Dampfquelle und Hauptkrümmungsradius der Substrate abgestimmt werden müssen, wodurch hohe Herstellungskosten entstehen. Ausserdem wird die Ungleichheit der Beschichtung von Substraten, die auf verschiedenen Kreisbahnen umlaufen, häufig als störend empfunden.

Wünscht man hingegen kreiskörmige Niveau-Linien mit dem Mittelpunkt im Substrat-Pol, die bei den bisher besprochenen Anordnungen streng genommen nur auf einem Substrat in der Position P_0 auftreten können, dann lässt man jedes Substrat um die eigene Achse rotieren, wobei die Beschichtung von Substra-

ten, die zusätzlich auf einer gemeinsamen Kreisbahn umlaufen, stets auch untereinander gleich sind. Hierfür sind aber Planetengetriebe oder andere Umlaufrädergetriebe notwendig, deren Herstellung kostspielig und deren Betrieb unter den beim Aufdampfen herrschenden Verhältnissen nicht unproblematisch ist. Da der Dampfstrahlkegel von den auf einer einzigen Kreisbahn umlaufenden Substraten nur ungenügend ausgenützt wird, ergeben sich sehr hohe Herstellungskosten.

Diese Beschichtungen haben jedoch die besondere Eigenschaft, durch kreisförmige Niveau-Linien mit dem Mittelpunkt im Substrat-Pol darstellbar und untereinander gleich zu sein. Sie wird in den weiteren Ausführungen als «Gleichförmigkeit» bezeichnet. Obzwar sie an sich nur selten zum Ziel genommen wird, entsteht sie jedoch häufig, wenn eigentlich Gleichmässigkeit der Beschichtung, d. h. überall gleiche Schichtdicke, mit der oben beschriebenen Einrichtung, die durch zusätzliche Kreisbahnen, Justiervorrichtungen, Blenden oder weitere Rotations-Achsen ergänzt werden kann, zwar angestrebt aber nicht völlig erreicht wird.

Aus der Erkenntnis, dass Gleichförmigkeit der Beschichtung unter den bisherigen Voraussetzungen entweder nicht mit befriedigender Genauigkeit oder nicht mit befriedigender Wirtschaftlichkeit erzielt werden kann, stellte sich die Aufgabe, alle Bedingungen aufzusuchen, unter welchen gleichförmige Beschichtungen sowohl mit höchster Genauigkeit als auch mit geringstem Aufwand an Arbeit und Hilfsmitteln herstellbar sind.

Diese Aufgabe wird durch die Merkmale aus Patentanspruch 1 gelöst. Sie besteht in der Auswahl einer bestimmten Kombination von qualitativen Faktoren, wie Dampfquelle, rotierende Substrat-Halterung, rotierende Korrektur-Blende und von quantitativen Faktoren, wie Positionen der Dampfquelle, der Substrate, der Korrektur-Blende, der Rotations-Achsen und der Verlauf der Umrisslinie der Korrektur-Blende. Teilkombinationen dieser Faktoren sind zwar schon früher vorgeschlagen und teilweise auch verwendet worden. Sie befriedigen jedoch nicht, denn sobald auch nur ein Faktor unberücksichtigt bleibt, ist nicht mehr Gleichförmigkeit der Beschichtung gewährleistet. Beispielsweise ist Gleichförmigkeit der Beschichtung von Rotationsflächen durch Anwendung von Korrektur-Blenden nicht mehr erzielbar, wenn sich die Dampfquelle in der (sub-)optimalen Position O' oder die Substrate in den (sub-)optimalen Positionen P_1' oder P_2' in Figur 1 befinden, und zwar auch dann, wenn man noch weitere Einstellgrössen bei der Optimierung dazunimmt. Die Lösung einer multi-dimensionalen Optimierungsaufgabe erfordert nämlich nach der Veränderung auch nur eines Faktors eine völlig neue Einstellung aller anderen Faktoren.

Das Beschichten von Substraten nach der Lehre aus Patentanspruch 1 zeichnet sich neben hoher Genauigkeit auch durch besonders geringen Aufwand an Material und Arbeit für die Anfertigung von Hilfsmitteln aus. Die Anwendung dieser Lehre beschränkt sich daher nicht auf spezielle Zwecke, für welche Gleichförmigkeit der Beschichtung ausdrücklich gewünscht wird, sondern erstreckt sich auch auf jene Fälle, in welchen ein Zielkonflikt zwischen möglichst hoher Gleichmässigkeit und möglichst geringen Herstellungskosten zugunsten der letzteren entschieden wird.

Nachfolgend wird zur Erläuterung der Erfindung ein Ausführungsbeispiel anhand der Aufbauskizze in Figur 3 beschrieben:

Legt man kreisrunde Substrate (1) in Zentrierbohrungen einer Kalotte (2), dann ergeben sich zwangsläufig Substrat-Positionen, welche die Bedingungen a und b des Patentanspruchs 1 mit der Masshaltigkeit entsprechender Genauigkeit erfüllen. Für eckige Substrate benötigt man geeignete runde Fassungen. Substrat-Fassungen können aber auch kalottenförmig aneinander geheftet oder zwischen parallelkreisförmig angeordneten und auf meridionalen Rippen abgestützten Ringen befestigt werden.

Die erwähnte Kalotte (2) sitzt zentrisch auf einem Drehring (3a), dessen Rotations-Achse (A_0) durch den Krümmungsmittel-

punkt (S) der Kalotte hindurchführt und Bedingung c erfüllt. Eine Lücke in der Mitte der Kalotte bietet Platz für einen Messfühler (M) zur Steuerung der Beschichtung.

Die Achse dieses Drehrings kommt mit der Achse eines zweiten Drehrings (3b), der zur Befestigung von Korrektur-Blenden (4a, b) dient, zur Deckung und erfüllt Bedingung d. Kalotte und Korrektur-Blende rotieren gegenläufig.

Die Drehringe (3a, b) für Substrat-Halterung und Blende(n) werden von je 3 festen Lauf- und Antriebsrollen (5) getragen, deren Achsen sich in einem Punkt auf der Rotations-Achse (A_0) schneiden. Um für genaue Beschichtungen Laufunruhe zu vermeiden, ist zu beachten, dass der Drehring (3) auf der unteren Stirnfläche mit einer Führungsrille versehen ist und auf jeder der beiden stark gerundeten Rollen (5a, b) mit beiden Borden der Rollbahn aufliegt, während die dritte, schmalere Rolle (5c) nur einen Druckpunkt hat. Dadurch zentriert sich der Drehring von selbst.

Die Wellen (7) der Lauf- und Antriebsrollen können, wie Figur 3 zeigt, durch die Wand eines schachtförmigen Abschnittes (8) des Hochvakuum-Rezipienten hindurchgeführt werden, der gehoben, gesenkt und seitlich ausgeschwenkt werden kann, so dass Substrate, Korrektur-Blende und Dampfquelle leicht zugänglich sind.

Die Dampfquelle (O) ist in Figur 3 nahe beim Krümmungsmittelpunkt (S) der Kalotte angeordnet und erfüllt die Bedingung e.

Ferner ist in Figur 3 die Verwirklichung der Bedingung f daran zu erkennen, dass die Korrektur-Blenden, von welchen die eine (4a) kugelig gewölbt und die andere (4b) zylindrisch gebogen ist, sich unmittelbar vor der Kalotte (2) befinden.

Korrektur-Blenden lassen sich nicht als geometrische Gebilde definieren, die mit jeder beliebigen Dampfquelle eine gleichförmige Beschichtung der Substrate ergeben, weil die Richtungsabhängigkeit der Strahlungsstärke von Dampfquelle zu Dampfquelle unterschiedlich sein kann. Nach der Lehre aus Patentanspruch 1 (Bedingung g) ist für die Erzielung einer gleichförmigen Beschichtung immer notwendig, denjenigen Umriss der Korrektur-Blende aufzusuchen, mit welcher auf einer Kugelfläche, auf der alle Substrat-Pole liegen, eine gleichmässige Beschichtung entsteht. Der optimale Umriss der Korrektur-Blende kann durch sequentielle Suchmethoden in der Regel rascher gefunden werden als durch willkürliches Herumprobieren. Diese Suchmethoden sind jedoch kompliziert und werden noch dadurch erschwert, dass neben systematischen Abweichungen auch unvermeidliche zufällige Abweichungen in vergleichbarer Grösse störend in Erscheinung treten, die auf Zufallsschwankungen der Strahlungsstärke der Dampfquelle in verschiedenen Richtungen des Raumes sowie auf Messfehler zurückzuführen sind.

Der Umriss der Korrektur-Blende ist jedoch unter den Bedingungen a, b, c, d und e des Patentanspruchs 1 auf besonders einfache Weise auch explizit darstellbar, wie die weiteren Ausführungen anhand der Figur 4 zeigen werden.

Wird ein Kugel-Koordinaten-System im Schnittpunkt (S) der Substrat-Achsen errichtet, dessen x-Achse sich mit der Rotations-Achse (A_0) deckt, dann lässt sich der Umriss der Korrektur-Blende durch die Bewegung eines Leitstrahles beschreiben, der vom Ursprung (O) des Koordinaten-Systems ausgeht und längs des Randes der Korrektur-Blende gleitet. Bei einem Umlauf des Leitstrahls (L) rund um die Blende nimmt der Winkel φ , den der Leitstrahl mit der x-Achse bildet, gleiche Zahlenwerte an jeweils zwei Punkten an (wenn man vom Knickpunkt absieht). In diesen beiden Punkten bilden die Projektionen des Leitstrahls auf die zur x-Achse senkrechte z,y-Ebene jeweils die Schenkel eines Winkels, dessen Scheitel auf der x-Achse liegt. Das Äussere wird als Öffnungswinkel ω bezeichnet.

Ist die Bedingung g des Patentanspruchs 1 erfüllt, dann nimmt der Öffnungswinkel ω bei jedem gegebenen Wert von φ bestimmte Zahlenwerte an. Um diese Zahlenwerte zu berechnen

ist notwendig, dass empirische Zahlenwerte der Strahlungsstärke I_0 in der durch verschiedene Werte von φ definierten Richtung angegeben werden, welche von der betreffenden Dampfquelle unter Weglassung von der Blende dargeboten wird. Diese lassen sich auf folgende einfache Weise experimentell bestimmen.

Die Strahlungsstärke I_0 ist unter den Bedingungen a, b, c und e des Patentanspruchs 1 stets mit hinreichender Genauigkeit direkt proportional zur Schichtdicke auf den Polen von Substraten, deren Achsen verschiedene Winkel α mit der Rotations-Achse (A_0) einschliessen. Man beschichtet daher am besten plane Substrate in verschiedenen Positionen (P_1, P_2 usw.) in einem Arbeitsgang unter Weglassung von der Blende aber unter sonst gleichen Bedingungen, misst die Schichtdicke auf den Substrat-Polen sowie den von Substrat-Achse (A_1, A_2 usw.) und Rotations-Achse (A_0) gebildeten Winkel $\alpha = \varphi$ und stellt schliesslich die der Strahlungsstärke proportionalen Messwerte der Schichtdicke in Abhängigkeit vom Richtungs-Kosinus $\cos \varphi$ in einem rechtwinkligen Koordinatennetz mit logarithmischer Teilung dar. Die Messpunkte liegen dann meistens nahezu auf einer Geraden, deren Richtungskoeffizient als Emissions-Exponent $k = d \log I_0 / d \log \cos \varphi$ bezeichnet wird. In der Regel findet man Zahlenwerte $k > 1$.

Da die Verteilung der Strahlungsstärke nicht nur von Dampfquelle zu Dampfquelle sondern auch von Aufdampfung zu Aufdampfung Unterschiede aufweisen kann, sind Mittelwerte von mehreren Messungen an Substraten, die in genügend kleinen Abständen über das ausnützbare Intervall von φ verteilt sind, zweckmässig.

Anhand der graphischen Darstellung ergibt sich zu jedem beliebigen Zahlenwert $\{\varphi\}$ ein zur Strahlungsstärke proportionaler Zahlenwert $\{I\}_\varphi$, aus dem man z. B. nach der Lehre aus Patentanspruch 6 einen bestimmten Zahlenwert $\{\omega\}_\varphi$ des Öffnungswinkels gewinnt. Für die willkürliche Konstante $\{\omega\}_\varphi \cdot \{I\}_\varphi$ wählt man einen möglichst grossen Betrag, um unnötige Verluste an Material, Energie und Zeit beim Aufdampfen zu vermeiden, z. B. das Produkt aus der kleinsten Strahlungsstärke $I_{\min}$ und dem grösstmöglichen Öffnungswinkel $\omega_{\max}$ im nutzbaren Intervall von φ .

Es ist vorteilhaft aber nicht zwingend, die Korrektur-Blende symmetrisch in bezug auf eine meridionale Ebene zu gestalten und den halben Betrag $|\omega|/2$ des Öffnungswinkels an die Schnittlinie der Symmetrie-Ebene x,y beidseitig anzutragen, wie Beispiele in Figur 3 und 4 zeigen. Die Zahlenwerte $\pm \omega/2$ als Funktion von φ beschreiben auf einer beliebigen Fläche die Umrisslinie einer Korrektur-Blende, mit welcher Gleichförmigkeit der Beschichtung erzielt wird, sofern natürlich auch alle anderen Bedingungen des Patentanspruchs 1 sich erfüllen.

Die Bedingung f des Patentanspruchs 1 lässt sich am besten verwirklichen durch Ausschneiden der Blende aus einer kugelig gewölbten Scheibe und durch Anordnen des Krümmungsmittelpunktes im Schnittpunkt (S) der Substrat-Achsen.

Für die Konstruktion der Umrisslinie auf einer Kugelfläche sind im Vergleich zu Kugel-Koordinaten φ, ω die in Figur 4a eingezeichneten Sehnen

$$m = R_s \cdot \sqrt{2(1 - \cos \varphi)}$$

und

$$p = 2R_s \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \varphi} \cdot \cos \omega / 4$$

besser geeignet. Zunächst werden auf der sphärischen Scheibe mit dem Hauptkrümmungsradius R_s der Pol auf der Rotations-Achse und der Meridian der Symmetrie-Ebene x,y, markiert. Hierauf wird mit einem Zirkel, dessen Öffnungsweite auf die Sehne m eingestellt ist, ein Parallelkreis um den Pol beschrieben. Dann wird die Öffnungsweite des Zirkels auf die Sehne p eingestellt und um den Schnittpunkt des Parallelkreises mit dem Meridian der Symmetrie-Ebene ein Kreisbogen geschlagen, der

den Parallelkreis in zwei Punkten schneidet, die als Stützpunkte für die Konstruktion der Umrisslinie dienen.

Die sphärische Korrektur-Blende wird mittels einer zylinderröhrigen Stange (6a in Figur 3) am Drehring (3b) in der Weise befestigt, dass der Krümmungsmittelpunkt mit dem Schnittpunkt (S) der Substrat-Achsen zusammenfällt.

Im Gegensatz zu sphärischen Korrektur-Blenden, deren Formung verhältnismässig aufwendig ist, kann man zylindrische Korrektur-Blenden aus biegsamem Blech jederzeit leicht herstellen.

Für die Konstruktion der Umrisslinie einer zylindrischen Korrektur-Blende mit dem vorgesehenen Biegeradius R_z errichtet man auf einem ebenen Blech anhand der Figur 4b in dem Punkt, durch welchen die Rotations-Achse führt, ein rechtwinkliges Koordinaten-System. Vermittels Koordinaten-Transformation wird die der Bogenlänge γ in der Symmetrie-Ebene x,y, entsprechende Abszisse

$$R_z \cdot \gamma = R_z \cdot \arctan(\tan \varphi \cdot \cos \omega / 2)$$

und die dem Abstand von der Symmetrie-Ebene x,y entsprechende Ordinate

$$z = \pm R_z \cdot \tan \omega / 2 \cdot \sin \gamma$$

eines jeden Stützpunktes der Umrisslinie abgesteckt.

Die zylindrische Korrektur-Blende wird an einem kreisbogenförmig bearbeiteten Spant (6b in Figur 3), der den Biegeradius R_z der Blende bestimmt, angeschraubt und am Drehring (3b) in der Weise befestigt, dass die Zylinder-Achse z und die Rotations-Achse (A_0) sich im Schnittpunkt (S) der Substrat-Achsen senkrecht schneiden.

Dem Vorteil leichter Herstellbarkeit steht aber manchmal der Nachteil gegenüber, dass der Abstand zwischen der zylindrischen Korrektur-Blende und der Kalotte stellenweise zu gross ist und die Korrektur deshalb nicht mehr genügend genau ist, vor allem bei Korrekturen grosser Abweichungen und bei grossem Abstand der Dampfquelle vom Schnittpunkt der Substrat-Achsen.

Es ist daher vorteilhaft, eine zylindrische und eine sphärische Korrektur-Blende, wie Figur 3 zeigt, auf einem Drehring (3b) gegenüberliegend zu befestigen und synchron rotieren zu lassen. Wird nämlich der Hauptanteil der Korrektur von der (breiteren) sphärischen Blende übernommen, dann lassen sich kleine Abweichungen, die verhältnismässig häufig sind, mit Hilfe der schmälere zylindrischen Blende ohne Einbusse an Genauigkeit korrigieren.

Die beiden Korrektur-Blenden kann man leicht konstruieren, wenn die Umrisslinie der sphärischen Grob-Korrektur-Blende explizit durch eine Formel definiert ist. Besonders geeignet ist die Formel für die Definition durch die Winkel φ und ω_s :

$$\omega_s = 2 \pi \cdot \left(\frac{\cos \varphi_{\max}}{\cos \varphi} \right)^k$$

oder die Formel für die Definition durch die Sehnen m und p:

$$p = 2m \cdot \sqrt{1 - (m^2 / 4 R_s^2)} \cdot \cos \left[\frac{\pi}{2} \cdot \left(\frac{\cos \varphi_{\max}}{1 - (m^2 / 2 R_s^2)} \right)^k \right]$$

In den beiden Formeln bedeuten $\varphi_{\max}$ die obere Grenze des ausnützaren Intervalls von φ und k den bereits erwähnten Emissions-Exponent. Ein genaue Anpassung an den empirischen

Zahlenwert von k ist jedoch nicht notwendig und auch nicht ratsam, damit die zylindrische Fein-Korrektur-Blende nicht zu schmal und zu schwach wird.

Für eine rasche Anpassung an verschiedene Dampfquellen ist es praktisch, einen zwar grob abgestuften, dafür aber sehr genau bearbeiteten Satz sphärischer Grob-Korrektur-Blenden vorrätig zu haben, beispielsweise mit den Exponenten $k = 1, 2, 3, 4$. Man wählt dann jeweils diejenige Blende, welche dem empirischen Emissions-Exponent k_a am nächsten ist.

Für die Konstruktion der zylindrischen Fein-Korrektur-Blende wird die unter Weglassung von beiden Blenden dargebotene Strahlungsstärke I_0 gemäss der vorangegangenen Darlegung ermittelt und als Funktion des Richtungs-Kosinus $\cos \varphi$ dargestellt. Nach der Lehre aus Patentanspruch 6 bestimmt man zu jedem Zahlenwert der Strahlungsstärke I_0 zunächst den Öffnungswinkel ω zwischen beiden Blenden und berechnet daraus den Öffnungswinkel ω_z der zylindrischen Fein-Korrektur-Blende nach der Formel (vgl. Figur 3):

$$\omega_z = 2 \pi + \omega - \omega_s$$

Ist der Öffnungswinkel ω_s der sphärischen Grob-Korrektur-Blende durch die vorangegangenen Formeln definiert, dann erhält man aus Zahlenwerten der unter Weglassung von beiden Blenden dargebotenen Strahlungsstärke I_0 :

$$\omega_z = 2 \pi \cdot \left[1 + \frac{I_{\min}}{I_0} - \left(\frac{\cos \varphi_{\max}}{\cos \varphi} \right)^k \right],$$

wenn $I_{\min}$ den niedrigsten Wert der Strahlungsstärke im ausnützaren Intervall von φ bedeutet.

Wird hingegen die Strahlungsstärke I_s unter Verwendung von der sphärischen Grob-Korrektur-Blende aber unter Weglassung von der zylindrischen Fein-Korrektur-Blende gemessen, dann berechnet man den Öffnungswinkel ω_z der anzupassenden zylindrischen Fein-Korrektur-Blende nach der Formel:

$$\omega_z = 2 \pi \cdot \left[1 - \frac{I_s - I_{\min}}{I_s} - \left(\frac{\cos \varphi_{\max}}{\cos \varphi} \right)^k \right]$$

Für die Transformation der Koordinaten φ, ω_z in die Koordinaten $R_z \cdot \gamma, z$ gelten die bereits weiter oben angegebenen Formeln.

Selbstverständlich sind auch ebene Korrektur-Blenden anwendbar, bei welchen sich aber der erwähnte Nachteil zylindrischer Blenden in noch höherem Masse auswirkt.

Der technische Erfolg der Erfindung ist aus folgenden experimentellen Ergebnissen des Aufdampfens von Magnesiumfluorid aus einem Tantal-Schiffchen zu ersehen:

Ohne Korrektur-Blende entsprach die systematische Abweichung der Strahlungsstärke im Intervall von $\varphi = 3^\circ$ bis $\varphi = 26^\circ$ etwa $\pm 10\%$, wobei die Richtungsabhängigkeit der Strahlungsstärke annähernd durch eine Potenz $k = 2,3$ des Richtungs-Kosinus darstellbar war. Die zufällige Abweichung der Strahlungsstärke entsprach während 10 aufeinanderfolgenden Aufdampfungen im Mittel etwa $\pm 0,08\%$. Mit einer Anordnung nach Patentanspruch 1 bis 10, deren zylindrische Fein-Korrektur-Blende in der zuletzt beschriebenen Weise ohne jede zusätzliche Korrektur konstruiert wurde, entsprach die systematische Abweichung der Strahlungsstärke im gleichen Intervall von φ weniger als $\pm 0,1\%$. Dies bedeutet eine Herabsetzung systematischer Abweichungen auf weniger als 1/100. Auf den in Figur 1

massstabgerecht dargestellten planen Substraten (P_1, P_2) wurde eine völlig gleichförmige Beschichtung erhalten, die in Figur 2c mit Hilfe von Niveau-Linien dargestellt ist.

Das Schichtprofil, das man mit einer Anordnung nach Patentanspruch 1 auf planen Substraten erhält, lässt sich berechnen nach der Formel

$$s = \frac{1}{R_p^2 \cdot (1 + b^2/R_p^2)^{3/2}},$$

wenn s das Verhältnis zur Schichtdicke auf den Substrat-Polen, b den Abstand des Flächenproduktes vom Substrat-Pol und R_p den Abstand der Substrat-Pole vom Schnittpunkt der Substrat-Achsen bedeutet.

Für die gleichförmige Beschichtung sphärischer Substrate gilt:

$$s = \frac{1 - \frac{R + R_p}{R_p} \cdot (1 - \cos \beta)}{\left[1 + 2 \frac{R}{R_p} \cdot \frac{R + R_p}{R_p} \cdot (1 - \cos \beta) \right]^{3/2}}$$

wobei β die Poldistanz des Flächenpunktes und R den Hauptkrümmungsradius der Substrate bedeutet, der verabredungsgemäss bei konvexen Substraten eine positive, bei konkaven Substraten eine negative Zahl ist.

Überraschenderweise erhält man eine beinahe gleichmässige Beschichtung konkaver Substrate nicht nur im Falle $R = -R_p$, sondern auch, wenn der Betrag von R nur ein wenig grösser als $R_p/3$ ist. In diesem Falle ist in der Poldistanz β_1 , gegeben durch die Formel

$$\cos \beta_1 = 1 - \frac{1 - 12R^2/R_p^2 + \sqrt{(1 - 12R^2/R_p^2)^2 - 64(1 + 3R/R_p) \cdot R^3/R_p^3}}{16(1 + R/R_p) \cdot R^3/R_p^3}$$

die Schichtdicke genau gleich wie auf den Substrat-Polen und nimmt nach innen zu und nach aussen ab. Es können jedoch 5- bis 9mal so viele Substrate im Strahlenkegel untergebracht werden als im Falle $R = -R_p$.

Im offenen Intervall zwischen $R = -R_p$ und $R = -R_p/3$ nimmt die Schichtdicke mit wachsender Poldistanz β etwas zu, was manchmal erwünscht ist, bei allen anderen sphärischen und planen Substraten nimmt sie ab. Bei $R = -2R_p/3$ ist die Zunahme am grössten.

Dies veranschaulicht Figur 5 an mehreren axialen Schnitten durch gleichförmige Beschichtungen von Substraten mit verschiedenen Hauptkrümmungsradien R , deren Verhältnis zum Abstand R_p vom Schnittpunkt der Substrat-Achsen rechts angegeben ist. Die Abszissenwerte bezeichnen den relativen Abstand der Flächenpunkte vom Substrat-Pol (ausgedrückt durch den Bogen $\beta \cdot R/R_p$) und die Ordinaten-Werte die relative Schichtdicke.

Nimmt man demgegenüber Gleichmässigkeit der Beschichtung von beliebigen sphärischen Substraten zum Ziel, die um eine gemeinsame Achse (A_0) rotieren, dann ist notwendig, dass die Krümmungsmittelpunkte der Substrate stets mit dem Schnittpunkt der Substrat-Achsen zusammenfallen, also die Hauptkrümmungsradien der Kalotten und Korrektur-Blenden stets

den jeweiligen Substraten angepasst werden. Daraus ergibt sich – trotz Wegfall der Bedingung c – häufig ein grosser Mehraufwand an Arbeit und Material gegenüber der universellen (für die Beschichtung beliebiger Rotations-Flächen geeigneten) Anordnung nach Patentanspruch 1, so dass man einer Gleichförmigkeit der Beschichtung gern den Vorrang gibt. Ausserdem ist auf asphärischen Rotations-Flächen, die bloss um eine gemeinsame Achse rotieren, zwar Gleichförmigkeit aber im Prinzip keine Gleichmässigkeit der Beschichtung erzielbar.

Die Lehre aus Patentanspruch 1 ist selbstverständlich auch auf Substrate anwendbar, die in verschiedenen Kugelzonen angeordnet sind.

Betreffend die oben erwähnte Strahlungsstärke soll bemerkt werden:

Ähnlich wie in der Lichttechnik ist das Verhältnis Dampfmenge/Raumwinkel für die von einer bestimmten Dampfquelle in einer bestimmten Richtung im Verlauf des Beschichtens ausgesandten Dampfstrahlung charakteristisch und wird daher als «Strahlungsstärke» bezeichnet.

Um Zahlenwerte, die der Strahlungsstärke proportional sind, aus der in einem Arbeitsgang erfolgten Beschichtung von Substraten zu gewinnen, kann man von folgenden Voraussetzungen ausgehen:

– Die Schichtdicke s sei direkt proportional zur Bestrahlungsstärke des Substrats (Teilchenfluss je Flächeneinheit des Substrats).

– Die Bestrahlungsstärke sei direkt proportional zum Richtungskosinus $\cos \Theta$ des einfallenden Dampfstrahls (analog dem Ersten LAMBERT'schen Gesetz der Lichttechnik).

– Die Bestrahlungsstärke sei ferner umgekehrt proportional zum Quadrat des Abstands r von der Dampfquelle (analog dem quadratischen Abstandsgesetz der Lichttechnik).

– Die Bestrahlungsstärke sei schliesslich auch direkt proportional zur Strahlungsstärke der Dampfquelle in der durch den Flächenpunkt der Beschichtung gegebenen Richtung im Raum.

Zwecks Darstellung der Richtungsabhängigkeit der Strahlungsstärke einer Dampfquelle misst man also von mehreren Punkten der Substrate die Schichtdicke s , den Abstand r der Dampfquelle, den Richtungskosinus $\cos \Theta$ des einfallenden Dampfstrahls und den Richtungskosinus $\cos \varphi$ des austretenden Dampfstrahls, bildet den Quotienten $s \cdot r^2 / \cos \Theta$, welcher der Strahlungsstärke der Dampfquelle proportional ist, und stellt ihn in Abhängigkeit von $\cos \varphi$ dar.

Für Substrate, deren Anordnung die Bedingungen a, b, c und e des Patentanspruchs 1 erfüllt und deren Achsen mit der Rotations-Achse verschiedene Winkel α bilden, gilt jedoch mit hinreichender Genauigkeit

$$\cos \Theta = 1, \quad r = \text{const.} \quad \text{und} \quad \varphi = \alpha,$$

so dass man die Schichtdicke auf den Substrat-Polen als proportional zur Strahlungsstärke betrachten und unmittelbar als Funktion von $\cos \alpha$ in ein Koordinatennetz eintragen kann.

Literatur:

- 55 M. Knudsen, Annalen d. Physik 48 (1915) 1113–1121
- K. G. Günther, Z. f. angewandte Physik 9 (1957) 550–556
- K. H. Behrndt, Trans. 10th Vacuum Symposium (1963) 379–384
- US-Patentschrift 3 598 083 (1969)
- B. S. Ramrasad et al., Thin Solid Films 15 (1973) 55–64
- 60 CH-Patentschrift 606 479 (1973)
- R. P. Netherfield et al., Applied Optics 13 (1974) 2685–2688
- H. Bollinger et al., Vakuum-Technik 26 (1977) 202–209
- F-Patentschrift 7 704 398 (1977)
- D-Offenlegungsschrift 2 815 704 (1978)
- 65 K. Steinfelder et al., Vakuum-Technik 28 (1979) 48–54.

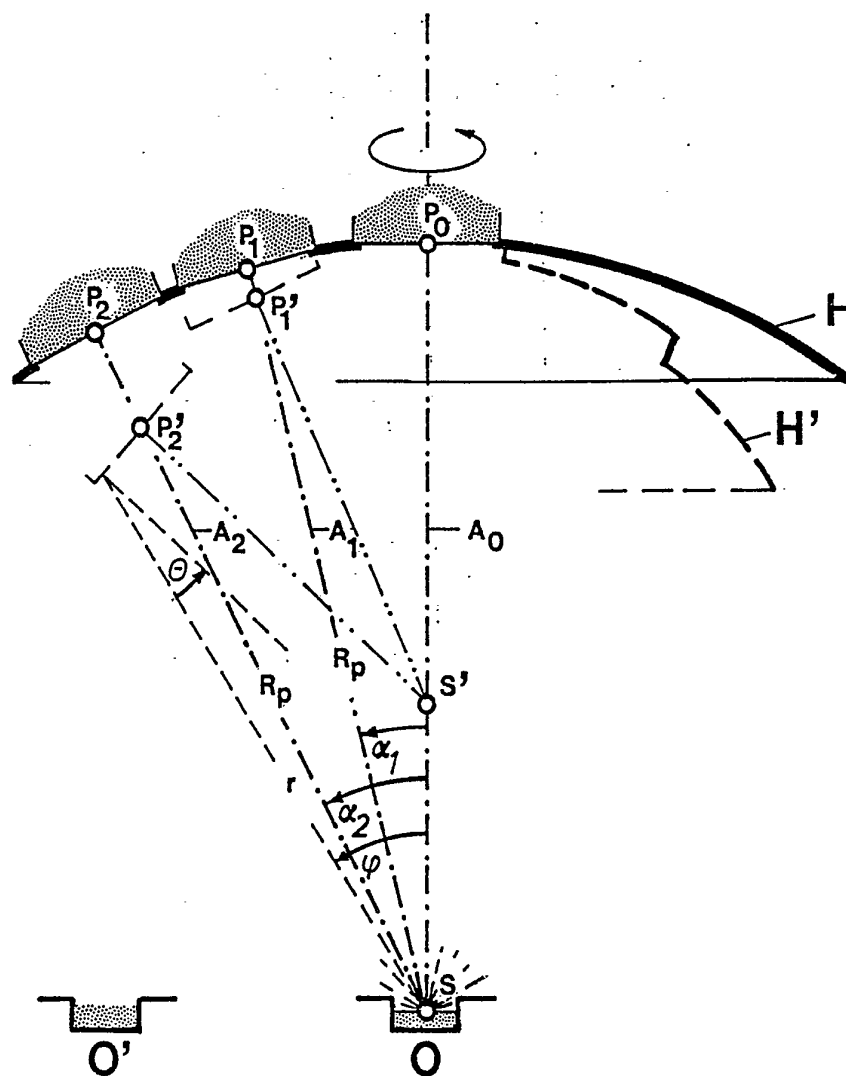
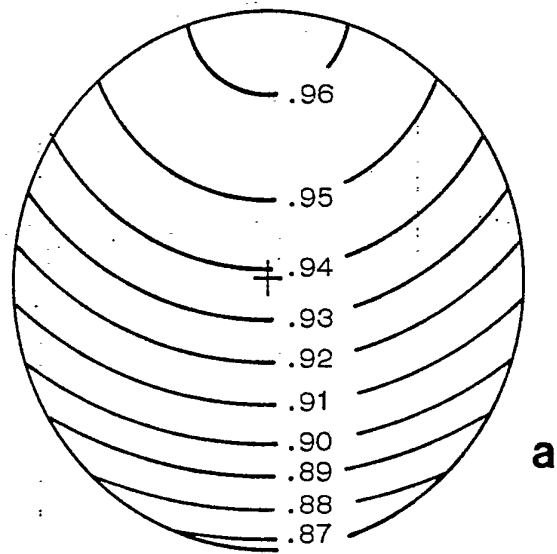
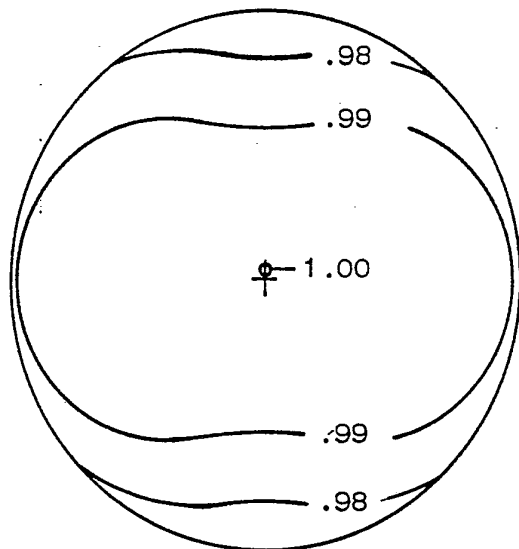


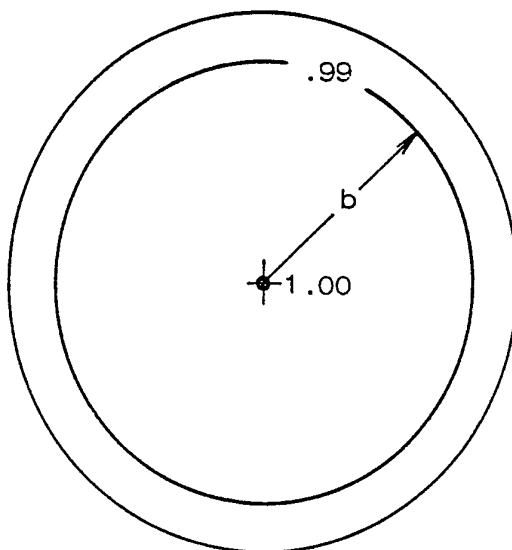
Fig.1



a



b



c

Fig.2

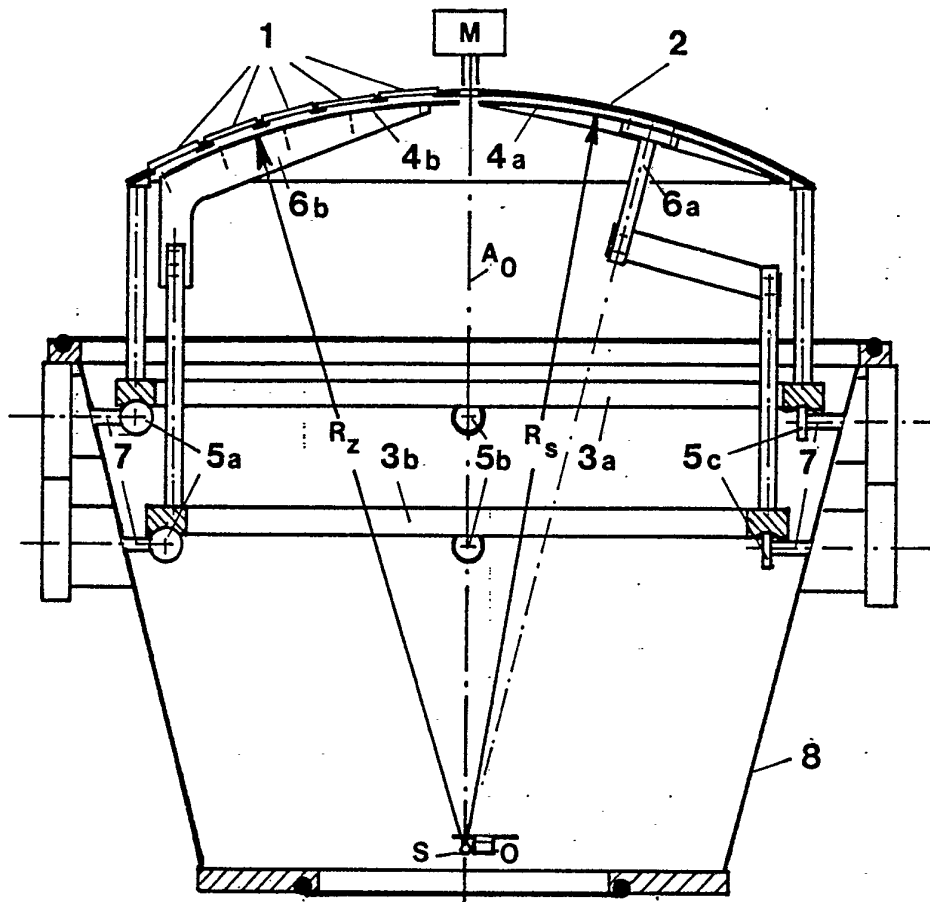
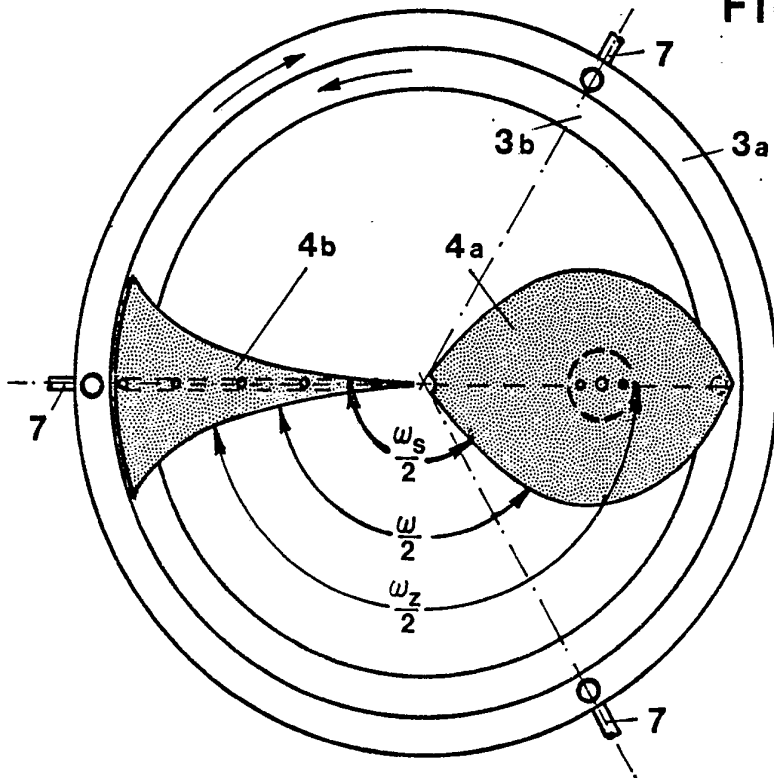
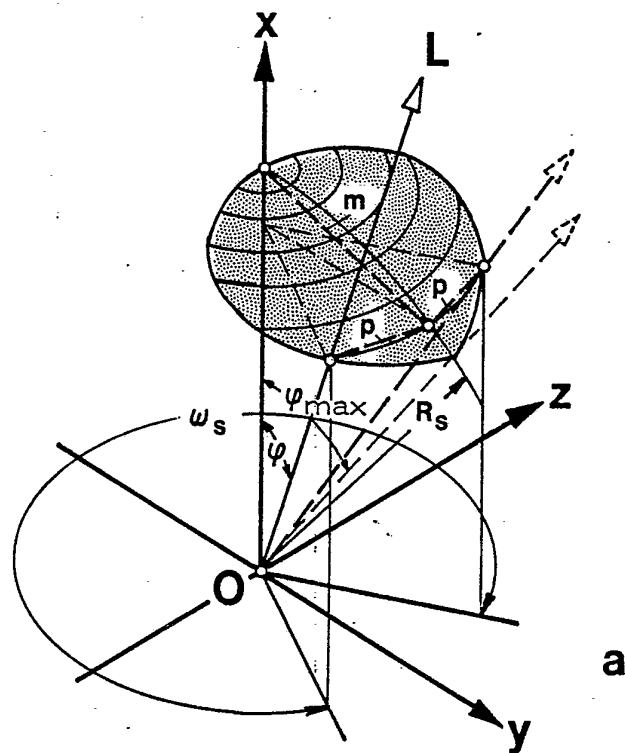


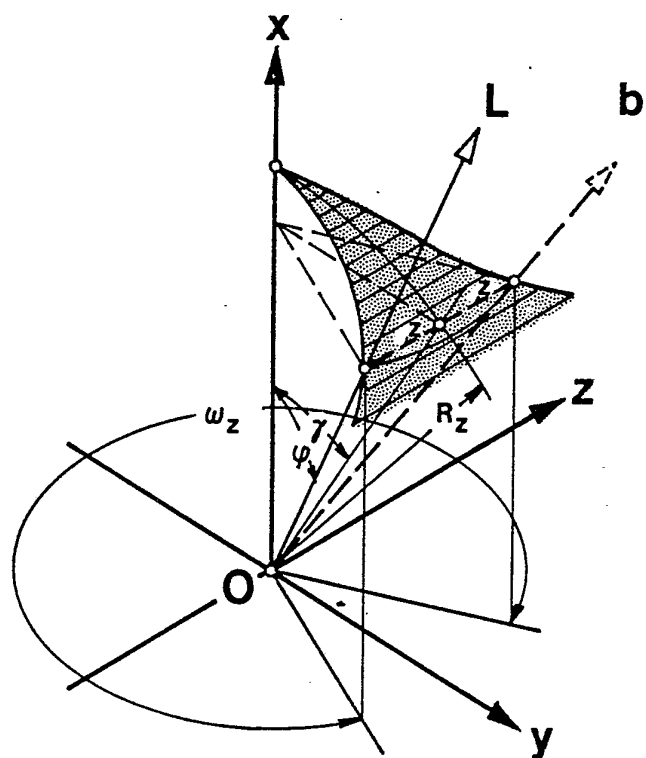
Fig. 3





a

Fig.4



b

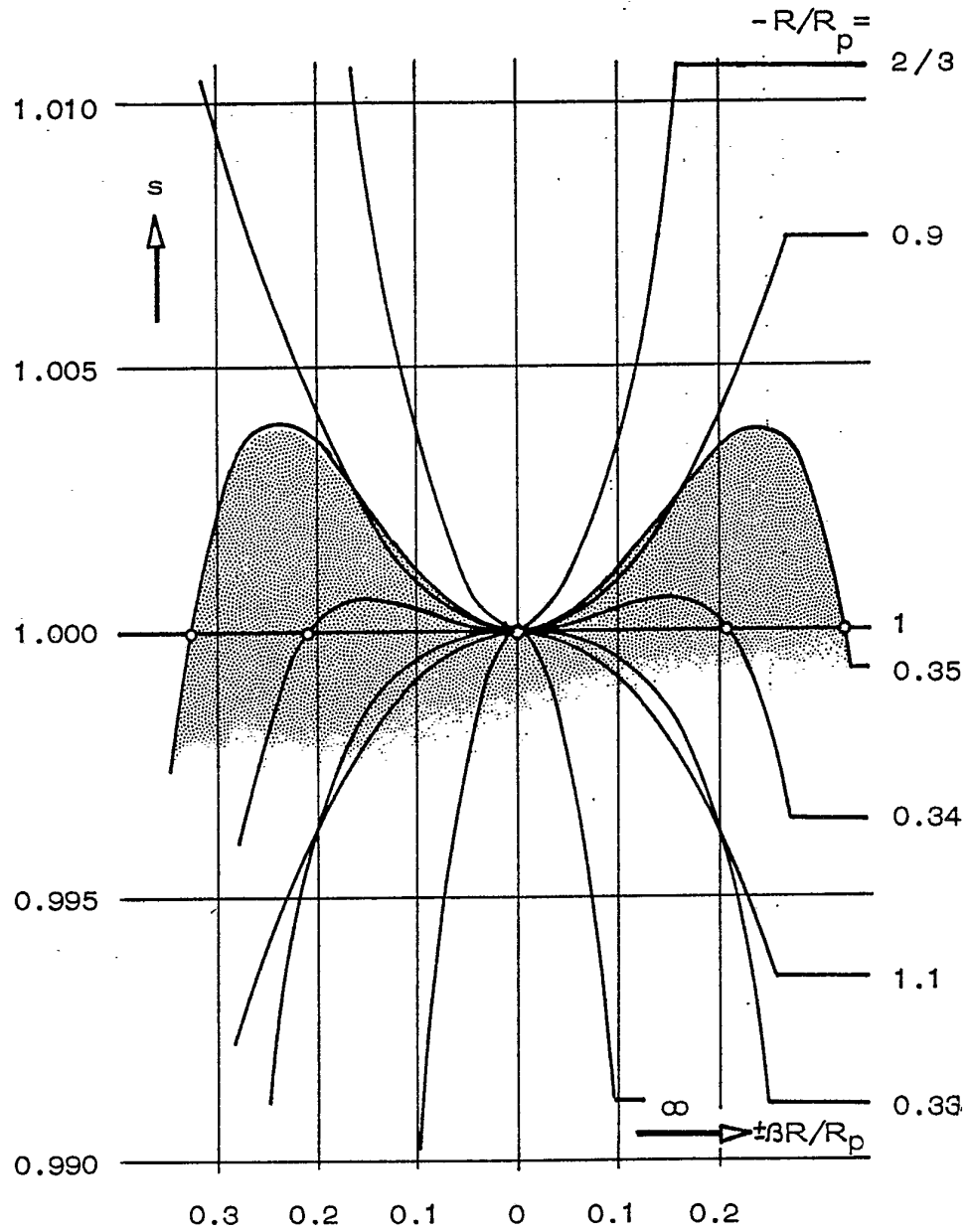


Fig.5