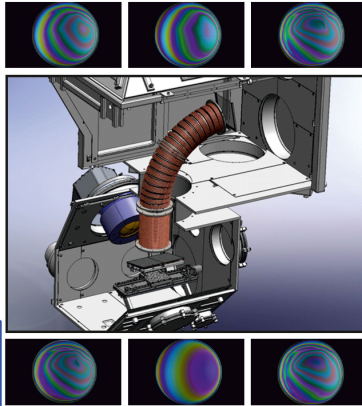




Sina Malobabic (Autor)
**Phasenseparierende Prozesse hochqualitativer
optischer Schichten**



Sina Malobabic

**Phasenseparierende Prozesse
hochqualitativer optischer Schichten**



Cuvillier Verlag Göttingen
Internationaler wissenschaftlicher Fachverlag

<https://cuvillier.de/de/shop/publications/7261>

Copyright:
Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen,
Germany
Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: info@cuvillier.de, Website: <https://cuvillier.de>

1 Einleitung

Die rasante Entwicklung von Laserstrahlquellen mit zunehmender Brillanz und immer höheren Leistungen stellt erhebliche Anforderungen an die Qualität der verwendeten optischen Komponenten. Um den dauerhaft zuverlässigen Einsatz dieser Komponenten zu garantieren und den Qualitätsanforderungen gerecht zu werden, bedarf es verlustarmer optischer Dünnschichtsysteme mit höchsten Reflektivitäten von stetig steigender Güte. Diese Systeme gewinnen weiterhin zunehmend an Bedeutung für wichtige Bereiche der Photonik und der Quantenoptik. Optische Komponenten höchster Qualität mit möglichst geringen optischen Verlusten sind insbesondere essenziell für Anwendungen bei der Herstellung laserstabiler Schichten mit minimaler Streuung im Hinblick auf die Entwicklung neuer Generationen von Einstein-Teleskopen sowie für eine gesteigerte Präzision optischer Uhren [1] [2]. Um wesentliche Impulse zu einer qualitativen Verbesserung optischer Eigenschaften dünner optischer Funktionsschichten zu setzen und so zum Fortschritt in den betroffenen Forschungsgebieten beizutragen, ist daher die Entwicklung und Anwendung neuartiger Beschichtungskonzepte erforderlich, mit denen Dünnschichtsysteme von höchster Qualität bereitgestellt werden können. Diese Problemstellung liefert den Ausgangspunkt für die vorliegende Arbeit.

Nach heutigem Stand der Wissenschaft und Technik stellen dielektrische Spiegel mit Gesamtverlusten im Bereich von wenigen ppm die Qualitätsspitze dar und können ausschließlich mit dem Ionenstrahlzerstäubungsverfahren (IBS-Verfahren) hergestellt werden [3] [4] [5]. In der Vergangenheit konnte das IBS-Verfahren bereits in verschiedenen Innovationsschritten weiterentwickelt werden, wie beispielsweise der Übergang von binären zu ternären Materialien. Aus technischer Sicht handelt es sich um einen weitgehend ausgereiften Prozess, der seine verfahrensspezifische Grenze offenbar erreicht hat und mit der angewandten Methodik nicht mehr nennenswert verbessert werden kann. Da auch unter Berücksichtigung aktueller Entwicklungsvorhaben nur noch inkrementelle Fortschritte beim IBS zu erwarten sind, ist in absehbarer Zeit kein signifikanter Qualitätssprung hin zu deutlich geringeren Verlusten im sub-ppm Bereich zu erwarten.

Aus theoretischen Überlegungen ist abzuleiten, dass dennoch ein erhebliches Optimierungspotenzial besteht: Eine vergleichende Analyse der Eigenschaften des Beschichtungsmaterials mit denen des Bulkmaterials an der Materialoberfläche offenbart, dass die Absorptionswerte des Bulkmaterials um mehrere Größenordnungen unter denen des Beschichtungsmaterials liegen.



1 Einleitung

Konsequenterweise sollte es möglich sein, das geringere Absorptionsverhalten des chemisch äquivalenten Bulkmaterials zu erreichen [6]. Um allerdings das Potenzial des IBS-Verfahrens besser auszuschöpfen und die Bereitstellung von dünnen Schichten mit verbesserten optischen Eigenschaften zu ermöglichen, ist eine fundamentale Änderung des IBS-Verfahrens erforderlich. Auf dieser These beruht die übergeordnete Zielstellung dieser Arbeit.

Die Qualität optischer Schichten hängt von den intrinsischen Eigenschaften der kondensierten Materialien sowie der im spezifischen Beschichtungsprozess realisierten Mikrostruktur ab [6]. Insgesamt wird die optische Qualität von Optiken maßgeblich durch ihre Oberflächenbeschaffenheit bestimmt. Obwohl es sich bei dem IBS-Verfahren um ein partikelfreies Beschichtungsverfahren handelt, stellt die Partikeldichte in den hergestellten Schichten im Rahmen der Entwicklung des Beschichtungsverfahrens eine erhebliche Grenze für viele Anwendungen in High-End-Optiken dar. Die Einlagerung von größeren Partikeln kann beispielsweise zu topologischen Unebenheiten in den Schichten führen. Diese können wiederum durch Absorption von Strahlungsenergie in der Schichtstruktur eine lokale thermische Überlastung herbeiführen, welche die Zerstörschwellenfestigkeit herabsetzen kann. Des Weiteren kann die Einlagerung von größeren Partikeln Streuung hervorrufen [6]. Solche Partikelkontaminationen können im Abscheideprozess durch Clusteremissionen hervorgerufen werden, die neben den abgestäubten Adatomen zusammen mit Elektronen, Ionen und Photonen als Nebenprodukt im Abscheideprozess entstehen [7] und zusätzlich durch bewegte mechanische Komponenten im Vakuum verstärkt werden. Um die optischen Eigenschaften von Funktionsschichten zu verbessern, gilt es daher, insbesondere die Einlagerung der Makropartikel in die Schichten zu unterbinden. Vergleichbare Ansätze einer Optimierung von Beschichtungsprozessen wurden bereits in der Literatur beschrieben, wo durch die Implementierung elektromagnetischer Felder im Bereich der Vacuum-Arc-Deposition (VAD) erfolgreich Separationseffekte herbeigeführt werden konnten. Dabei wurden insbesondere Makropartikel vom Plasma des Beschichtungsmaterials getrennt [8] [9]. Durch die Bereitstellung magnetischer Felder besteht die Möglichkeit, auf das geladene Beschichtungsmaterial Einfluss zu nehmen und insbesondere dessen Trajektorien gezielt zu beeinflussen. Während geladene Teilchen abhängig von dem Verhältnis ihrer Ladung zu ihrer Masse unterschiedlich stark abgelenkt werden, behalten ungeladene Partikel ihr parabolisches Bewegungsverhalten bei. Somit kann die Möglichkeit zur Manipulation der Flussrichtung des Plasmas

verwendet werden, um eine räumliche Trennung von verschiedenen im Plasma enthaltenen Komponenten zu realisieren.

Ein weiterer Ansatz zur Verbesserung der optischen Eigenschaften dünner optischer Funktionsschichten liegt in einer selektiven Beeinflussung der Energieeinträge durch Ionen und energetische Neutralteilchen. Die Beschichtung mit energiereichem Material führt durch Impulsübertrag dazu, dass die Beweglichkeit der aufwachsenden Atome ansteigt, was allgemein zu einer kompakteren Packungsdichte der Schichtstruktur führt und ein porenfreies Gefüge entstehen lässt [6]. Eine hohe Packungsdichte geht erfahrungsgemäß mit einem höheren Brechungsindex einher. Eine Beschleunigung bzw. Energieaufnahme des geladenen Beschichtungsmaterials kann durch das relativ schwache elektrische Feld entstehen, welches als Begleiterscheinung der Führung des Plasmas durch magnetische Felder entstehen kann [10] [11].

Im Rahmen dieser Arbeit wird in Anlehnung an dieses Konzept eine geeignete IBS-Anlage entwickelt und aufgebaut sowie ein auf elektromagnetischen Feldern basierender Separator implementiert, durch welchen das Beschichtungsmaterial vom Target zum Substrat geführt wird. Die elektromagnetischen Felder werden durch einen Solenoid bereitgestellt, der je nach Konfiguration sowohl lineare als auch gekrümmte axiale magnetische Felder zur Verfügung stellen kann.

Basierend auf einer sorgfältigen Betrachtung der theoretischen Grundlagen soll der praktische Nachweis der Plasmaführung erbracht werden. Dementsprechend beginnen die Ausführungen mit fundamentalen Untersuchungen des Plasmatransports. In diesem Zusammenhang wird die Transporteffizienz der linearen axialen Magnetfelder am Beispiel verschiedener hochbrechender und niedrigbrechender Beschichtungsmaterialien untersucht. Die Evaluation erfolgt hier über die Bestimmung der lateralen Verteilung des Beschichtungsmaterials auf Borofloatgläsern, die am Ende des Separators positioniert werden.

Ferner umfassen die grundlegenden Untersuchungen die Auswirkungen der magnetischen Felder auf die Zusammensetzung des Plasmas. Die räumliche Separation eines Komposits aus zwei Beschichtungsmaterialien wird in Abhängigkeit der Magnetfeldstärke sowie einer Konzentrationsänderung der Brechungsindizes in Abhängigkeit der Richtung des Magnetfeldes untersucht. Eine umfassende Charakterisierung des manipulierten Plasmas wird im Hinblick auf die Änderung im Beschichtungsprozess durchgeführt. Insbesondere wird die Energieverteilung des geladenen Beschichtungsmaterials mit Hilfe des



1 Einleitung

Gegenfeldanalysators bestimmt. Dabei ist die Bestimmung der Qualität der hergestellten Mehrschichtsysteme von großer Bedeutung. Weiterhin werden Analysen der Partikeldichte von Schichtsystemen, die mit dem durch Magnetfelder modifizierten Prozess erstellt werden, vorgenommen. Dabei werden vorqualifizierte Substrate unter Verwendungen verschiedener Konfigurationen des Separators beschichtet und hinsichtlich ihrer Partikelanzahl evaluiert. Abschließend werden Substrate, die unter Verwendung des herkömmlichen IBS-Verfahrens hergestellt wurden, mit den Ergebnissen des Verfahrens unter Hinzunahme der hier neu entwickelten und angewendeten Separatorkonzepte verglichen und klassifiziert.

2 Stand der Technik

Während die Anfänge moderner Beschichtungsprozesse in der Dünnschicht-technologie bis in die Mitte des vorletzten Jahrhunderts zurückverfolgt werden können, hat sich die Anwendung von Separationsmethoden erst in den 1940er Jahren durch das Voranschreiten der Vakuumtechnologie und den Materialwissenschaften etabliert [6]. Im Folgenden wird die Entwicklung der Separationsmethodik chronologisch dargestellt. Anschließend wird auf die beiden Beschichtungsverfahren „Cathodic Arc Deposition“ (CAD) und IBS gegenüberstellend eingegangen, um das Potential und die Hürden der Übertragbarkeit der Filtertechnik auch auf das IBS-Verfahren zu skizzieren und insbesondere in die Grundlagen des IBS einzuführen.

2.1 Ursprung der Separationsmethodik

Verschiedene Anwendungen in Technik, Medizin und Wissenschaft sind durch den Reinheitsgrad bereitgestellter Stoffe oder Komponenten limitiert, so dass das Interesse an der Anreicherung von möglichst reinen Stoffen daher traditionell groß ist. Bereits im Rahmen des Manhattan-Projektes im Jahre 1942 kam die so genannte „Calutron“ (**California-University-Cyclotron**) [12], eine nach dem Prinzip des Massenspektrometers arbeitende Anlage zur Anreicherung von Uran-Isotopen, zum Einsatz [13]. Dabei wurden verdampfte und ionisierte Proben in einem elektrischen Feld beschleunigt und durch magnetische Felder auf kreisförmige Bahnen gelenkt. Dieses Verfahren basiert auf der Erkenntnis, dass Trajektorien von bewegten Ladungen in einem magnetischen Feld in Abhängigkeit ihrer Masse unterschiedlich intensiv manipuliert werden können. Die in der Wechselwirkung von Teilchen mit magnetischen Feldern begründete individuelle Beeinflussbarkeit wurde genutzt, um die Trajektorien der zu trennenden Komponenten voneinander zu isolieren und so eine räumliche Separation herbeizuführen. Aufgrund des hohen Energiebedarfes wurden diese massenspektroskopischen Verfahren jedoch von energieeffizienteren mechanischen Verfahren wie u.a. der Gaszentrifuge ersetzt. Solche mechanisch betriebenen Zentrifugen sind in ihrer Rotationsgeschwindigkeit sowie durch Instabilitäten im Gasfluss begrenzt. Daher und nicht zuletzt auch aufgrund der hohen Wirkungsgrade elektromagnetischer Separationsverfahren wurden auch weiterhin elektromagnetische Massenseparationsverfahren erforscht [14]. Insbesondere stellten Smith et al. [15] im Jahr 1947 den radialen magnetischen Separator und Slepian



2 Stand der Technik

et al. [16] im Jahr 1958 die ionische Zentrifuge („*ionic centrifuge*“) vor [14]. Eine Renaissance und damit verbunden auch eine technologische Weiterentwicklung haben die elektromagnetischen Separationsverfahren mit der Entwicklung der Plasmazentrifuge erfahren, die erstmals im Jahr 1966 in Form von experimentellen Studien durch Bonnevier beschrieben wurde. Im Rahmen dieser Forschungen wurde anstatt eines neutralen Gases ein ionisiertes Gas durch ein von einem Magnetfeld durchströmtes Gefäß geleitet. Dabei wurden die ersten Nachweise zu einer Massenseparation in einem gepulsten rotierenden Plasma an Gasgemischen erbracht, welche dann durch theoretische Studien von Lehnert [17] ergänzt wurden. Da mit Hilfe von gekreuzten elektrischen und magnetischen Feldern höhere Winkelgeschwindigkeiten bzw. Rotationsgeschwindigkeiten [18] erreicht werden können, konnten so die Beschränkungen mechanischer Zentrifugen überwunden werden, wie beispielsweise die Wirkung großer Massenkräfte. Insofern werden die wesentlichen Prinzipien der Massenspektroskopie und mechanischer Zentrifugen kombiniert.

Der Wirkungsgrad der Plasmazentrifuge bestimmt sich nach dem Ionisierungsgrad des Plasmas. Zunächst wird der ionisierte Anteil des Plasmas, der durch die Plasmazentrifuge geleitet wird, direkt durch die magnetischen Felder beeinflusst. Dennoch versetzt der ionisierte Teil des Plasmas das gesamte Gemisch durch Kollisionsprozesse in Rotation [19]. Anfängliche Experimente scheiterten jedoch an einem zu schwach ionisierten Plasma, da die Rotation durch die Alfvén-Geschwindigkeit begrenzt ist [20]. In teilweise ionisiertem Plasma wird die Alfvén-Geschwindigkeit-Grenze erreicht, wenn die Rotationsenergie der Ionen die Ionisationsenergie der neutralen Atome erreicht hat. Denn dann geht jeder weitere Energieeintrag nicht mehr in das rotierende Plasma, sondern in erster Linie in die Ionisation der verbleibenden neutralen Atome. Ein bereits vollständig ionisiertes Plasma ist somit nicht limitiert [21]. Dagegen können mit einem annähernd voll ionisierten Plasma mit niedrigem Hintergrundgasdruck hohe Rotationsgeschwindigkeiten erreicht werden. Um eine hohe Geschwindigkeit der Driftrotation zu erreichen und aufrecht zu erhalten, die eine markante Separation erkennen lassen, war jedoch ein starkes Magnetfeld von ca. 0.4 T [22] [23] und folglich eine hohe elektrische Energiezufuhr notwendig.¹

¹ Bei dem teilweise ionisierten Plasma ist die Rotation jedoch nicht so hoch wie im vollständigen ionisierten Plasma, da die Rotation hier limitiert ist [23]

Dieses Konzept eines neuen Typus einer Plasmazentrifuge, der sogenannten Vacuum-Arc-Zentrifuge (VAC), bei dem das Plasma vollständig ionisiert ist, wurde im Jahr 1981 erstmals von Krishnan und Geva et al. vorgestellt. Dabei wurde das gepulste Plasma mit dem *Cathodic Arc Deposition* (CAD)–Prozess bereitgestellt. In dem Ausgangsexperiment wurde das Material von einer metallischen Kathode zunächst durch einen gepulsten CO₂-Laser verdampft und dann durch eine elektrische Entladung, die zwischen der Kathode und einem Anodengitter gezündet wird, ionisiert [24] [25].

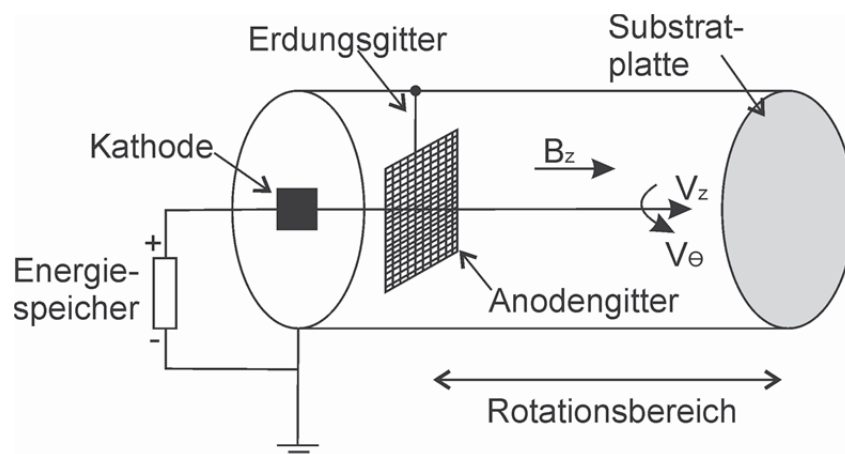


Abb. 2.1 Schematische Darstellung einer „Vacuum Arc“ Zentrifuge [24]

Anders als bei den vorher beschriebenen Zentrifugen wurde das so bereitgestellte vollionisierte, quasineutrale Plasma durch ein zylindrisches Gefäß geleitet, das von einem axialen Magnetfeld durchströmt wird. Bevor der Plasmastrom in das axiale Magnetfeld eintritt und sich noch zwischen der Kathode und Anode befindet, hat es eine radiale und eine axiale Komponente [24]. Im axialen magnetischen Feld wird das Plasma aufgrund der Wechselwirkung mit dem Magnetfeld und der Lorentzkraft magnetisiert und zu einem Plasmaschlauch kollimiert. **Abb. 2.1** zeigt den schematischen Aufbau einer VAC. Dabei wurde gezeigt, dass der Plasmaschlauch unter der Wechselwirkung mit einem starken externen axialen Magnetfeld rotiert. Diese azimuthale Rotation ist auf die $\vec{E} \times \vec{B}$ Drift zurückzuführen, die durch das axiale magnetische Feld und durch eine Ladungsseparation der Ionen und Elektronen generiert wird [26]. Weiterhin wurde beobachtet, dass die Komponenten mit höheren Massen grundsätzlich auf äußeren, weiter von der Zentralachse entfernten, Zyklotronbahnen rotieren [22] und so in Abhängigkeit von ihrer Masse räumlich separiert werden. Außerdem wird eine radiale zentrifugale Separation der konkret vorliegenden Ionen aufgrund ihrer unterschiedlichen

Masse-zu-Ladung-Verhältnissen, mithin aufgrund der konkreten Intensität der Beeinflussbarkeit der Teilchen, verursacht [26].

2.2 Filtermethoden im *Cathodic Arc Deposition*-Prozess

Die Plasmazentrifuge hat nicht nur die Separationstechnik revolutioniert, sondern fand auch Einzug in die Beschichtungstechnologie. Etablierte Beschichtungsverfahren wie insbesondere zunächst das CAD wurden durch die Implementierung von Filtertechniken ergänzt und optimiert, die auf elektromagnetischen Separationsmethoden basieren. Bei dem VAD-Beschichtungsverfahren handelt es sich um eine auf Plasma basierende Technik zur Herstellung von beispielsweise harten, amorphen Carbonschichten [27] [28] [29] [30], transparenten, leitenden Schichten [31] [32] [33], harten Mischschichten [34] und anderen Dünnschichtstrukturen.

In dem CAD-Prozess wird durch hohe Spannungsdifferenz zwischen nahegelegenen metallischen Elektroden ein durch Plasmaentladung entstehender Lichtbogen erzeugt [35]. Der sich entladene Strom konzentriert sich dabei auf einen 1-10 μm kleinen Brennpunkt auf der Kathode und hat meist nur eine Lebensdauer von ca. 10 ns bis 1 μs . Dabei liegen die Stromdichten in der Größenordnung von 10^6 bis 10^8 A cm^{-2} . Durch diesen explosiven Emissionsprozess auf der Kathode wird ein zum Teil aus Metallionen bestehendes Plasma generiert. Dieser Emissionsprozess bewirkt einen Materialabtrag und führt zu einer lokalen Erosion auf der Kathodenoberfläche. Neue benachbarte Brennpunkte bilden sich dann an den Rändern der hinterlassenen Krater, so dass der Brennpunkt sich zufällig über die Kathodenoberfläche bewegt [36] [37]. Bei einem typischen kathodischen Entladungsbogen mit mehreren hundert Ampere sind oft mehrere zehnte kathodische Brennpunkte gleichzeitig involviert [38]. Während des Materialabtrags durch den Lichtbogen wird das Beschichtungsmaterial zu großen Anteilen ionisiert [39]. Charakteristisch für das VAD ist daher, dass ein dichtes, fast vollkommen ionisiertes Metallplasma mit vielfach geladenen Ionen erzeugt wird [40]. Dieser positive Ionenstrom wird oft als konstantes Verhältnis zum Lichtbogenstrom angegeben; $I_{Ion} = \varepsilon \cdot I_{Bogen}$, mit typischen Werten von $\varepsilon = 0,06 - 0,12$.

Neben dem Plasma werden in dem Beschichtungsprozess jedoch auch mikrometergroße geschmolzene Tröpfchen des Beschichtungsmaterials, sogenannte Makropartikel, generiert. Die Größe der Makropartikel liegt zwischen $d = 0,2$ und $100 \mu\text{m}$, wobei die Verteilung der Größe mit e^{-d} abfällt,

d.h. mehr kleinere als größere Makropartikel vorliegen [41]. Diese schlagen sich auf dem Substrat nieder und verursachen Defekte in den Schichten, was die Funktionalität der hergestellten Schichten jedoch zunächst nicht tangiert, da die Qualität von derartigen Schutzbeschichtungen nicht oder nur unerheblich beeinträchtigt wird. Das Vorliegen der Makropartikel in harten TiN Beschichtungen kann im Gegenteil sogar von Vorteil sein, da davon ausgegangen werden kann, dass die metallischen Makropartikel Stress in den Schichten verhindern und so Rissen entgegenwirken, was sich beispielsweise bei Schneidwerkzeugen positiv auswirkt [41]. Korrosionsbeständige Cathodic Arc Beschichtungen, die die relevanten zivilen und militärischen Standards einhalten, verfügen sogar über einen hohen Gehalt an Makropartikeln [42]. Dahingegen ist die Anwendung von makropartikelkontaminierten Schichten in den Bereichen der Optik lediglich stark eingeschränkt möglich, da Makropartikel eine Ursache für die Herausbildung von Streuzentren darstellen und somit optische Verluste verursachen. Ebenso ist eine Anwendung makropartikelkontaminierter Schichten in der Elektronik ausgeschlossen, da die zur mikro-elektronischen Anwendung kommende Schichtdicke typischerweise zwischen 0.01 und 1 μm liegt und die submikrometrische laterale Verteilung der Makropartikel zu topologischen Unebenheiten führt [41]. Daher war eine Reduktion der Partikeldichte eines der Hauptanliegen zur Optimierung der VAD-Verfahren in den späten 1970er Jahren. Dabei wurden insbesondere zwei unterschiedliche Ansätze zur Reduzierung des Gehalts an Makropartikeln in den Schichten verfolgt. Ein Ansatz stellt auf die Verringerung der Makropartikelgeneration während des Beschichtungsprozesses ab. Um zu verhindern, dass Makropartikel überhaupt erst entstehen, wurden Forschungen hinsichtlich einer optimierten Inbetriebnahme der Kathode durchgeführt. In diesem Zusammenhang wurde beispielsweise festgestellt, dass die Anzahl der Makropartikel mit der Oberflächentemperatur der Kathode sowie mit dem Strom des Lichtbogens [43] zusammenhängt. Die Temperatur auf der Kathodenoberfläche während des Materialabtrags durch den Lichtbogen ist in der Regel höher als die Schmelztemperatur des Kathodenmaterials. Der Krater nach dem Abtrag des Materials verdoppelte sich laut Jüttner [44], als die Temperatur von Raumtemperatur bis 1200 K anstieg. Damit hängt die Erosionsrate der Makropartikel auch von der Menge des flüssigen Materials nahe des Abtragsorts ab. Ein effektives Kühlen der Kathodenoberfläche sowie die Kontrolle der Bewegung des Lichtbogensspots (vom stationären Kathoden-Spot zum bewegten Kathoden-Spot), waren somit Ansätze, der Makropartikelgeneration entgegenzuwirken [45]. Alternativ wurde dem Ansatz nachgegangen, die Makropartikel aus dem Plasmastrom



2 Stand der Technik

heraus zu separieren. Im Zuge dieser Untersuchungen verbreitete sich die Anwendung von Filtern zur Eliminierung von Makropartikeln [40] und ein neuer Forschungszweig der „*Filtered Vacuum Arc Deposition*“ (FVAD) entstand.

Während der Schwerpunkt der Forschungen zum FVAD auf grundlegenden Vorgängen des Plasmatransports im magnetisierten Filter sowie den Auswirkungen auf den Makropartikeltransport lag, gingen andere Gruppen verstärkt auf die Charakterisierung der durch FVAD produzierten Schichten ein [46]. Wiederum andere Gruppen konzentrierten sich auf unterschiedliche Methoden und Filterdesigns. Die zur Anwendung kommenden Designs der Filter variierten vor allem in ihren Formen. Dabei wurden beispielweise Forschungsarbeiten zum magnetischen Filtershutter oder dem rotierenden Blattfilter durchgeführt, bei dem die Frequenz der rotierenden Schaufeln an die langsame Geschwindigkeit der Makropartikel angepasst ist, so dass die beschleunigten schnellen Beschichtungsionen ungehindert den Rotor passieren können. Außerdem wurde der Möglichkeit nachgegangen, das Plasma mit dem „*Venetian Blind Filter*“, einem von Ryabchikov et al. [47] [48] [49] beschriebenen Blockungsfiler, zu reinigen. Dazu wird eine Reihe von stromdurchflossenen parallel zueinander ausgerichteten Lamellen in einem geeigneten Winkel zur Quelle zwischen Substrat und Quelle positioniert, um die Makropartikel abzufangen [50]. Dieser Ansatz, die Partikelanzahl im Plasma zu reduzieren, basiert auf der Unterbrechung der Sichtverbindung zwischen der jeweiligen Quelle des Beschichtungsmaterials und dem Substrat bei gleichzeitiger Manipulation der Trajektorien der geladenen Anteile des Plasmas mittels magnetischer Felder. Dadurch, dass die parallel zueinander stehenden Lamellen mit Strom durchflossen werden, werden die Flugbahnen geladener Teilchen, vorwiegend der Ionen und Elektronen, durch das entstehende magnetische Feld, dessen Flussrichtung parallel zu den Lamellen ausgerichtet ist, beeinflusst und diese entlang der Magnetfeldlinien durch den Filter geführt. Zwar können auch Makropartikel Ladungen aufweisen, aber ihr Masse-zu-Ladung-Verhältnis ist deutlich größer als das entsprechende Verhältnis der Elektronen und Ionen, was dazu führt, dass Makropartikel in der Regel nur geringfügige Änderungen des Bewegungsmusters erfahren. Auf diese Weise wird also eine räumliche Trennung der Trajektorien der Ionen und jener der Makropartikel bewirkt, da das Plasma umgelenkt wird, wohingegen die Makropartikel überwiegend in ihrer Flugbahn blockiert werden.

Eine ebenfalls effiziente und weitverbreitete Methode zur Umlenkung des Plasmastromes beruht auf dem Konzept der oben beschriebenen Plasma-zentrifuge, bei der axiale Magnetfelder bereitgestellt werden, in denen das