

Photonik

## BESCHICHTUNGEN

# Technologien zur Herstellung funktionaler Schichten für Laser-Anwendungen

**042** Martin Schacht,  
Laser Components GmbH, Olching

**B**eschichtete Oberflächen spielen bei der kommerziellen Lasertechnik schon seit ca. 30 Jahren eine herausragende Rolle. Es ist jedoch erst seit kurzem gelungen, funktionale Optiken zu entwickeln und herzustellen, an denen sich mehr verändert, als nur das Reflexions- oder Transmissionsverhalten in bestimmten Spektralbereichen. Immer mehr kommt es darauf an, durch Beschichtungsart und Substratwahl dem Endprodukt zusätzliche Eigenschaften zu verleihen.

Der folgende Beitrag erörtert Herstellungsverfahren von Beschichtungen für drei Laser-Einsatzbereiche: dielektrische Hochleistungsschichten, adaptive Optiken und schließlich Gradientenspiegel für instabile Resonatoren.

## 1 Dielektrische Laser-Hochleistungsschichten

### 1.1 Konventionelles Aufdampfen von Beschichtungen

In Hochvakuum-Aufdampfanlagen konventionell produzierte Beschichtungen werden durch die Grenzen einiger Prozessparameter in ihren Eigenschaften eingeschränkt. So spielt der End-, wie auch der Partialdruck in der Anlage eine entscheidende Rolle, da die mittlere freie Weglänge für die Stöchiometrie des amorphen Schichtpaketes auf der Substratoberfläche verantwortlich ist. Diese Drücke gilt es also zu optimieren, je nach Anforderungen an das Endprodukt. Die Oberflächenhaftung der auftreffenden Teilchen soll dagegen praktisch immer maximal sein. Die Haftung wird durch die kinetische Energie der auftreffenden Dampfteilchen und einzelnen Atome während ihrer Kondensation bestimmt.

Durch eine Substratheizung erhalten die Moleküle während der Kondensation zusätzliche Energie, was physikalisch die gleiche Wirkung hat, wie eine höhere Geschwindigkeit (kinetische Energie) in Richtung der Substratoberfläche. Die Beweglichkeit der aufgedampften Teilchen auf den Substraten ist während der Kondensationsphase eng mit der Substrattemperatur verknüpft und hat entscheidenden Einfluss auf die Mikrostruktur der resultierenden Schichten. Das hierzu von Movchan und Demchishin aufgestellte Dreizonenmodell [1] unterscheidet anhand der Substrattemperatur im Verhältnis zur Schmelztemperatur des Dielektrikums drei charakteristische Temperaturbereiche. Daraus ergibt sich als günstigste Temperatur diejenige, bei der sich die Dampfteilchen aufgrund ihrer Beweglichkeit bestmöglich an der Substratoberfläche anordnen können.

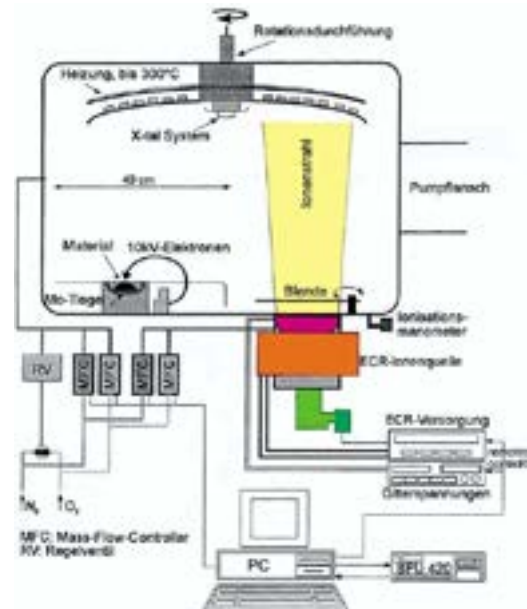
Die Erwärmung der Substrate auf optimale Temperatur, meist um ca. 300 °C, bewirkt darüber hinaus auch eine Beseitigung des von der Substratoberfläche durch Trocknen nicht zu entfernenden Restfeuchtigkeits-Films, was wiederum zu einer besseren Schichthaftung beiträgt.

Mit derart konventionell aufgedampften Schichten war es lange Zeit möglich, die Bedürfnisse der meisten Laser-Anwender zu befriedigen. Der Markt verlangte jedoch nach immer leistungsstärkeren Beschichtungen mit geringerer thermischer Drift. Dies war nur möglich, indem

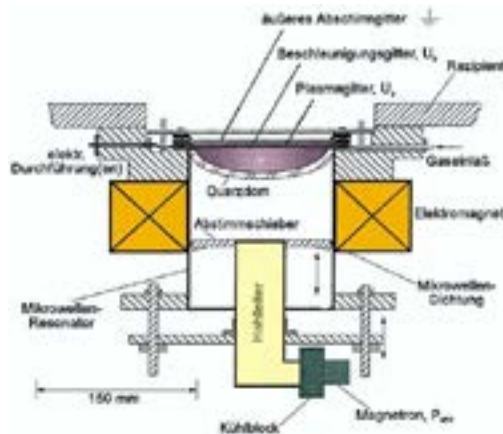
man die Schichten kompaktierte und somit die Anzahl eingelagerter  $H_2O$ -Restmoleküle minimierte, ohne gleichzeitig Störmoleküle einzulagern und die Stöchiometrie der Dampfteilchen zu verändern.

Störmoleküle sind meist metallische Verunreinigungen aus der Aufdampfquelle oder z. B. den Wandungen der Aufdampfanlage, die insbesondere bei starker Target-Anregung mit in den Aufdampfstrom gelangen und sich ebenfalls auf den Substratoberflächen ablagern können, was zu einer unerwünschten Erhöhung der Absorption in den Schichten führen kann.

Die Kompaktierung gelingt durch den Einsatz von IAD-Quellen (Ion Assisted Deposition), im Folgenden einfach als Ionenquellen bezeichnet. Dabei handelt es sich um Plasmaquellen, die den Aufdampfprozess unterstützen, indem sie den Selbstordnungsprozess der Teilchen in der entstehenden Schicht energetisch begünstigen. Bei der im Folgenden vorgestellten ECR-Quelle (Electron Cyclotron Resonance, **Bild 1**) handelt es sich ebenfalls um eine Ionenquellen zur Produktion von Laserhochleistungsschichten.



**Bild 1a:** Aufbau einer typischen Ionenstrahl-unterstützten Bedampfanlage



**Bild 1b:** Aufbau einer ECR-Ionenquelle (Electron Cyclotron Resonance)

## 1.2 Aufbau und Wirkungsweise von IAD- und ECR-Quellen

Beim konventionellen thermischen Aufdampfprozess wird die relativ geringe thermische Teilchen-Energie von nur ~0,1 eV schnell dissipiert, was zu porösen Schichten mit typischen Säulenstrukturen führt. Ein auf die Substratoberfläche auftreffendes Molekül wird an Ort und Stelle gebunden. Da keine weiteren thermischen Anregungsprozesse stattfinden, ist eine räumliche Umsetzung nicht mehr möglich [2].

Durch das IAD- und ECR-Verfahren erhalten die Teilchen auf dem Weg zum Substrat eine sehr viel höhere mittlere Geschwindigkeit, mit Teilchenenergien in der Größenordnung von 5–10 eV. Das energetische Potential der Teilchen hat das von Oberflächenbindungsenergien erreicht, wodurch Prozesse von Diffusion, Teilchenumlagerungen und Impulsübertrag möglich werden. Die höhere Beweglichkeit der Moleküle nach dem Auftreffen auf die Substratoberfläche resultiert in einer größeren Packungsdichte [3].

Ionenquellen der älteren IAD-Quellen Generation bedienten sich zur Energieübertragung eines Plasmas, zu dessen Anregung eine Gleichspannungsentladung zwischen einer Anode und einer Kathode erforderlich ist. Die Erosion des Kathodenfilaments durch Wechselwirkung mit dem Reaktivgas Sauerstoff und die daraus folgende Verunreinigung der Anlage und der Schichten mit dem Filamentmaterial (s. 1.1, Störmoleküle) sind entscheidende Nachteile einer solchen Anordnung.

Dagegen erzeugen ECR-Quellen der neueren (zweiten) Generation zur Plasmaanregung ein elektromagnetisches Wechselfeld, welches durch ein Magnetron generiert und über ein Hohlleitersystem durch eine Quarzhalbschale hindurch in den Prozessraum eingekoppelt wird. Nur mit einer solchen filamentlosen und auch metallfreien Anordnung gelingt es, Schichten herzustellen, die eine geringe Anreicherung von Störmolekülen aufweisen: ein großer Vorteil gegenüber vergleichbaren IAD-Quellen.

In ECR-Quellen erhalten wir eine Wechselfeld der Frequenz  $f$  durch die Zyklotron-Resonanzbedingung

$$\omega = 2\pi \cdot f = e \cdot B / m \quad (\text{Gleichung 1})$$

mit Elementarladung  $e$ , Elektronenmasse  $m$  und Magnetfeld  $B$ . Das Magnetfeld hat typisch eine Größenordnung von ca. 1000 G, bei Spulenströmen über 100 A. Die resultierende Resonanzfrequenz  $f$  wird normalerweise auf exakt 2,45 GHz eingestellt, denn hier liegt

ein HF-Bereich, der unter Entstörungsaspekten der Fernmeldetechnik zur industriellen Nutzung freigegeben ist. Diese Mikrowellen-Strahlung mit einer Wellenlänge von ca. 12 cm erreicht Leistungen bis ca. 600 W. Bei geeigneter Abstimmung arbeiten solche Quellen über einen längeren Zeitraum zuverlässig, konstant und nahezu wartungsfrei.

Es ist damit ebenfalls möglich, harte Schichten ohne Beheizen der Substrate zu erzeugen, was es möglich macht, z.B. Polycarbonat- oder Kunststoff-ummantelte Glas- und Saphirfasern zu beschichten. Es können auch sehr dicke Schichtpakete mit größerer Schichtanzahl aufgebaut werden, z.B. HR-Wechselschichtsysteme (hochreflektierende Spiegel) für den nahen bis mittleren IR-Bereich. Die im Laserzentrum Hannover gemessenen Zerstörschwellen erreichen dabei Werte von über 70 J/cm<sup>2</sup> bei  $\lambda = 1064 \text{ nm}$  und 10 ns Pulsdauer. Der technologische Stand der ionenunterstützten Prozesse insgesamt kann auch in Bezug auf die erreichte Schichtqualität als sehr hoch bewertet werden.

## 2 Beschichtungen für adaptive Laseroptiken

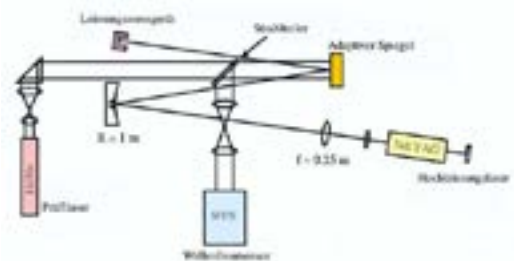
### 2.1 Anwendungsbereich

Mit der adaptiven Optik hat sich eine neue Technik herausgebildet, die der Verbesserung der Abbildungsgüte und der Erhöhung der Strahlqualität in zeitlich veränderlichen optischen Systemen dient. Dieses Ziel erreicht die adaptive Laseroptik durch eine Echtzeit-Korrektur zeitabhängiger Aberrationen, die vor allem durch Temperaturdrift entstehen. Hierzu bedient man sich deformierbarer Spiegel, die mittels elektromechanischer Stellements lokal so verformt werden, dass ein Ausgleichen der gemessenen Wellenfrontabweichungen erreicht wird [4]. Diese Art der Wellenfrontkompensation erlaubt es, dass sich die deutliche Verschlechterung der Strahlqualität vermeiden lässt, die mit einer Erhöhung der Verstärkung einhergeht. Es konnte eine Hochleistungslaseranlage (**Bild 2**) aufgebaut werden, deren Strahlqualität einem Einmodenlaser sehr nahe kommt.

### 2.2 Aufbau adaptiver Spiegel

Das Substratmaterial verformbarer Spiegel besteht typisch aus einer nur wenige Mikrometer starken und einen Quadratzentimeter großen geätzten Siliziumfolie, auf die eine Metallschicht und mehrere Schichten Dielektrika aufgebracht sind (**Bild 3**). Das Dielektrikum erhöht mit der Reflektivität auch die Zerstörschwelle. Die Spiegel werden mit Hilfe von piezoelektrischen Aktoren mit Arbeitsfrequenzen von mehreren Kilohertz verformt.

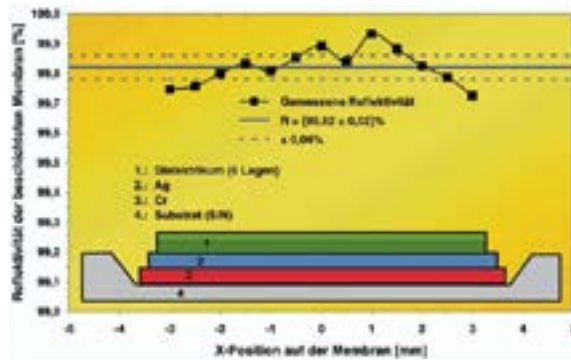
Adaptive Optiken sind nicht aus einer einzelnen, bahnbrechenden Erfindung entstanden, sondern wurden aufbauend auf vielen Einzelergebnissen im Laufe der Zeit entwickelt. Man kann sie auch als interdisziplinäres Arbeitsgebiet bezeichnen, da hier Kenntnisse und



**Bild 2:** Schematische Darstellung des Einsatzes eines Kompensationsspiegels zu Realisierung einer nahezu einmodigen Hochleistungslaseranlage (hier mit Nd:YAG-Laser)

Photonik

## BESCHICHTUNGEN



**Bild 3:** Piezoelektrisch deformierbare Folie als adaptiver Spiegel mit Arbeitsfrequenzen von mehreren kHz (unten eine Skizze der beschichteten Membran)

Techniken aus so unterschiedlichen Bereichen wie Optik, Elektronik und Werkstoffkunde miteinander verknüpft und für den Bau optischer Systeme nutzbar gemacht wurden [5].

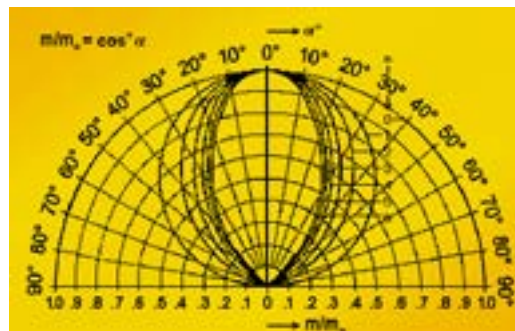
### 3 Gradientenspiegel (Gaußspiegel) für instabile Laser-Resonatoren

#### 3.1 Motivation

Die Strahlqualität eines Lasers wird im Wesentlichen durch den Resonator bestimmt. Mit stabilen Resonatoren können gute Strahlqualitäten durch Einschränkung der Anzahl möglicher transversaler Moden erreicht werden. Dies geschieht mittels Blenden und begrenzt mit dem Modenvolumen auch die Ausgangsleistung. Die Strahlqualität ist daher nur für einen geringen Eingangsleistungsbereich optimierbar. Bei instabilen Resonatoren lässt sich das Modenvolumen durch die Größe des Auskoppelspiegels festlegen. Die Strahlqualität hängt dann nicht mehr von der Pumpleistung ab, da bei variiert interner Linse zugleich Fokusradius und Fernfelddivergenz gegenläufig verändert werden.

#### 3.2 Funktionsweise

Die Strahlauskopplung geschieht um einen höher reflektierenden, kreisförmigen Fleck herum, der auf ein entspiegel-



**Bild 4:** Radialsymmetrische Dickenverteilung einer Schicht bei Rotation des Substrats während des Beschichtungsprozesses

tes Substrat aufgedampft wurde. Allerdings wären so zunächst Beugungsringe zu erwarten. Der sogenannte Dot kann aber auch mit einem nicht-konstanten Reflexionsgrad ausgeführt werden, der sich mit dem Fleckradius kontinuierlich verändert. Man spricht aufgrund des Übergangs auch von weichen Gauß-Reflexionsblenden oder Gradientenspiegeln, die das Entstehen von Beugungsringen vermeiden.

#### 3.3 Herstellung von Gauß-Reflexionsblenden

Zur Aufbringung derartiger Gradientenspiegelschichten müsste ein Substrat im Idealfall zentrisch über der aktiven Verdampfungsquelle angeordnet werden. Dies ist nicht möglich, da versucht wird, mehrere Substrate in einer Charge zu beschichten. Die Gradientenspiegel müssen deshalb während des Beschichtens eine Doppelrotation ausführen: Diese „Planetenbewegung“ setzt sich aus dem Umlauf des Substrates im Rezipienten und seiner Eigenrotation zusammen. Der Umlauf im Rezipienten ist auch bei der Herstellung

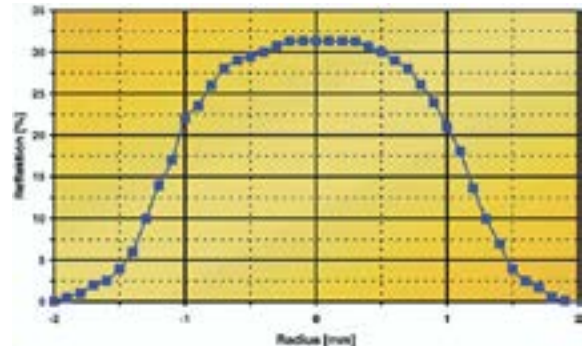
ebener Schichten wichtig für eine gleichförmige Massenbelegung bei allen Substraten. Die Eigenrotation des Substrates bei der Aufbringung von radial dickenvariierter Schichten bewirkt eine gemäß **Bild 4** radialsymmetrische Dickenverteilung hinter der abschattenden Blende [6].

Das Reflexionsprofil  $R$  errechnet sich nach der folgenden, allgemein gültigen Gleichung für einen gaußförmigen Verlauf :

$$R(r) = R_0 \cdot (1 + \exp(-2r/w))^n \quad (\text{Gleichung 2})$$

$R(r)$  Reflexion in Abhängigkeit des Radius

$R_0$  Mittenreflexion



**Bild 5:** Beispiel eines gemessenen Reflexionsprofils mit Gauß-Fit



**Bild 6:** Messanordnung zu Bild 5

w  $1/e^2$ -Radius der Intensitätsreflexion  
r Radius  
n Gauß – Ordnungsexponent

**Bild 5** zeigt ein gemessenes Reflexionsprofil, das mit einem Nd:YAG Laser bei  $\lambda = 1064$  nm gemessen wurde. Dazu wurde der Laserstrahl mit einem Strahlteiler in einen Mess- und einen Referenzstrahl aufgeteilt und der Messstrahl mit einer kurzbrennweitigen Linse fokussiert. Der zu vermessende Spiegel wurde auf einen Stelltisch montiert (**Bild 6**) und durch den Fokus bewegt. Das vom Gradientenspiegel transmittierte Licht wurde mit einer großflächigen PIN-Photodiode aufgefangen.

### Zusammenfassung

Mit ECR-Quellen erzeugte Hochleistungsschichten in Resonatoroptik und Strahlführung ermöglichen den Aufbau noch leistungsstärkerer Lasersysteme, was vielfach ganz neue Anwendungsmöglichkeiten eröffnet. Adaptive Optiken, z.B. in Einchip-Technik als Mikrospiegelelemente hergestellt, haben in Verbindung mit der Faseroptik das Potential, die zukünftige elektrooptische Steuerungs- und Regeltechnik zu revolutionieren. Und mit neuen Gradientenspiegeln kommt auch dem lange Zeit zu unrecht vernachlässigten instabilen Resonator wieder größere Bedeutung zu.

### Danksagung

Mein besonderer Dank gilt dem Laserzentrum in Hannover, hier Herrn Dr. D. Ristau, sowie Herrn Prof. Dr. H. Weber, eh. LMTB Berlin, und Herrn Dr. H. Albrecht, LMTB Berlin.

### Literaturhinweise:

- [1] J. Kolbe, H. Welling: Entwicklung eines Ionenstrahl-Beschichtungsverfahrens zur Herstellung absorptions- und streuarmer dielektrischer Schichten für den UV- und VUV-Bereich, 13 N 5408, 1990
- [2] A. Starke: Herstellung und Analyse von Siliziumoxinitridschichten für Laseranwendungen, D83, LMTB, 1994
- [3] Kennedy M., Ristau D., Niederwald H.: S 1998 Ion beam assisted deposition of  $MgF_2$  and  $YbF_3$  films, Thin Solid Films, vol. 333, 1998, 191-195
- [4] Robert K. Tyson: Principles of Adaptive Optics, Academic Press, 1997
- [5] Vdovin G., Kugler N., Schacht M.: Membrane deformable mirrors under cw laser load. SPIE Denver, 1999
- [6] G. Bostanjoglo: Nah- und Fernfeldverteilungen instabiler optischer Laserresonatoren mit apodisierten Reflektoren, LMTB, 1995

### Ansprechpartner:

Martin Schacht {Portrait}  
Leiter Produktion und F&E  
Optische Dünne Schichten,  
LWL- und Filterkonfiguration  
Laser Components GmbH  
Werner-von-Siemens-Str. 15  
82140 Olching  
Tel. 08142/2864-29, Fax 08142/2864-11  
eMail: m.schacht@lasercomponents.com  
Internet: www.lasercomponents.com

