

# Technik und Anwendungen optischer Schichten: Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft

Amber Czajkowski, Edmund Optics Inc., Pennsburg, PA, USA

**Die Beschichtungstechnik hat sich ungemein weiterentwickelt, seit vor über 70 Jahren die erste einschichtige optische Interferenzbeschichtung vorgestellt wurde. Heute gehören das Abscheiden aus der Dampfphase, IBS und APRS zu den bevorzugten Verfahren zur Dünnschicht-Herstellung. Dieser Beitrag erörtert die Unterschiede zwischen den verschiedenen Beschichtungstechniken und ihren Anwendungen.**

Die Entwicklung innovativer Verfahren und kosteneffizienter Fertigungsprozesse für hochpräzise und widerstandsfähige dünne Schichten wird durch steigende Anforderungen aus Anwendungsfeldern wie Biophotonik, Militär- und Lasertechnik ständig voran getrieben. Der vorliegende Fachaufsatz beschreibt die Evolution der optischen Beschichtungstechniken und der Anwendungen, für die sie am Besten geeignet sind.

## 1 Beschichtungs-Grundwissen

Der Design- und Entwicklungsprozess dünner Schichten ist erheblich ausgereifter als zur Zeit der Erfindung des ersten Verfahrens für einlagige Antireflexionsbeschichtungen. Realisiert und patentiert wurde es 1935 von Alexander Smakula, der für Carl Zeiss in Jena arbeitete. Bei dieser ersten praktikablen Methode zur Abscheidung dünner Schichten wurde mittels Vakuumtechnik eine Fluorverbindung auf eine Glaslinse aufgebracht, um ungünstige Reflexionseigenschaften des Glases zu eliminieren. Smakulas Beitrag zu optischen Interferenzschichten verbesserte nicht nur erheblich die Leistungsfähigkeit vieler optischer Geräte, sondern entfachte auch neues wissenschaftliches Interesse, die Dünnschichttechnik weiter zu erforschen.

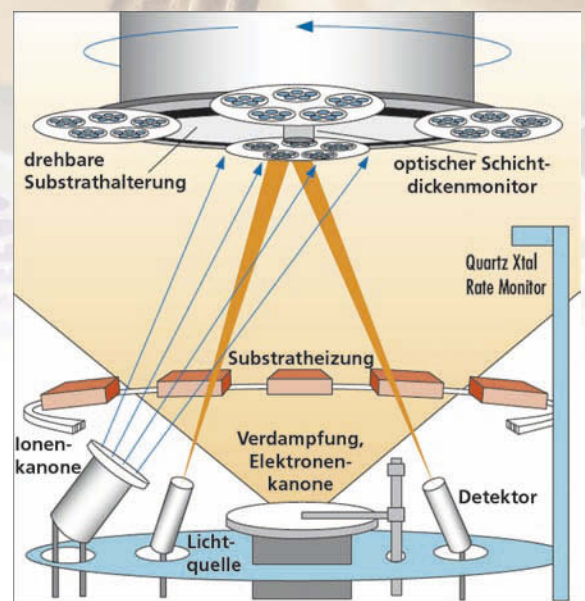
Damals waren Kameraobjektive die wichtigste Anwendung dünner Schichten; seither hat sich die optische Beschichtungsindustrie zum Zulieferer eines sehr diversifizierten globalen Marktes mit einem jährlichen Volumen von rund 1,5 Mrd. € entwickelt. Einlagige Fluoridschichten haben sich in komplexe mehrlagige, multifunktionale Designs gewandelt. Dennoch unterliegt die Herstellung optischer Schichten hoher Qualität nach wie vor drei Voraussetzungen:

- 1.) ein gutes theoretisches Design,
- 2.) hochwertige Materialien, und vor Allem
- 3.) ein geeigneter Beschichtungsprozess.

Die industrielle Erfolgsgeschichte basiert ganz auf einem tiefen Verständnis dieser entscheidenden Zutaten, die jede für sich fundierte Forschung und Entwicklung erfordert.

Fortschritte in der Software und Computertechnik haben eine Vielzahl sehr leistungsfähiger Dünnschicht-Designprogramme hervorgebracht, die anspruchsvolle Dünnschicht-Gleichungen berechnen und theoretische Lösungen für komplizierte Anwendungsprobleme liefern können. Die Materialwissenschaften haben darüber hinaus erheblich zu den Design- und Fertigungsprozessen beigetragen. Die Materialauswahl ist oft ein mühsamer Vorgang, denn die Anzahl optischer Materialien, die für Beschichtungsanwendungen geeignet sind, ist recht begrenzt; dennoch hängt hiervon ganz wesentlich die Machbarkeit einer Schichterstellung ab. Jedes theoretische Design wäre praktisch nutzlos, wenn es auf Materialien beruht, die nicht effizient abgeschieden werden können.

Verfahren wie die Abscheidung aus der Dampfphase, das Ionenstrahl-Zerstäuben (ion-beam sputtering, IBS) und reaktives Plasmazerstäuben (advanced plasma reactive sputtering, APRS) gehören zu den bevorzugten und verbreitet eingesetzten Produktionsverfahren für dünne Schichten. Im Folgenden untersuchen wir diese Methoden auf ihre technischen Unterschiede, auf ihre Fertigungseffizienz, Produkteigenschaften, Kosten und



**Bild 1:** Für IAD-Beschichtungen bei 200–300°C wird der Kammerdruck typischerweise auf unter  $10,7 \cdot 10^{-6}$  mbar eingestellt

die Anwendungen oder Märkte, für die sie am Besten geeignet sind.

## 2 Abscheidung aus der Dampfphase

### 2.1 Technik

Das erste effiziente Verfahren zur Erzeugung dünner Beschichtungen war die Dampfabscheidung oder das Aufdampfen, ein thermischer Prozess, in dem Ausgangsmaterialien entweder durch Widerstandsheizen oder Elektronenstrahl-Beschuss in die Gasphase überführt werden. Dies geschieht in einer Vakuumkammer bei einem Druck von ca.  $1,5\text{--}130 \cdot 10^{-6}$  mbar, je nach Art der Beschichtung. Die verdampften Materialien kondensieren und haften dann auf Substraten, die auf Kalotten mit Planetengetriebe in der Kammer rotieren, um eine homogene Beschichtung zu erreichen. Die resultierenden Schichten sind in der Regel porös mit säulenartigen Mikrostrukturen, und sie zeigen bei Temperatur- oder Feuchtigkeits-Änderungen spektrale Verschiebungen, sofern der Beschichtungsprozess nicht durch Ionenstrahlgestützte

Beschichtung (ion assisted deposition, IAD) ergänzt wird. Bei dieser Prozessvariante (**Bild 1**) sorgt ein zusätzlicher Beschuss mit schnellen Ionen für dichter gepackte Schichten mit geringerer innerer Spannung und besserer Haftung am Substrat.

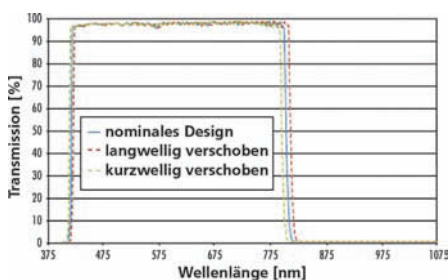
## 2.2 Leistungsfähigkeit

Dampfabscheidungsprozesse verursachen relativ geringe Betriebskosten und sind mit vielen Materialien von Dielektrika bis zu Metallen kompatibel. Außerdem schafft die Geometrie der Vakuumkammer einen erheblichen Abstand zwischen der Materialquelle und den Optiken, was selbst bei komplex geformten und stark gekrümmten optischen Komponenten zu einer erhöhten Beschichtungshomogenität führt.

Dennoch ist der Herstellungsprozess oft wenig zuverlässig, da er stark vom Einfluss des Bedienpersonals abhängt und im Vergleich zu anderen Verfahren einer größeren Anzahl zufälliger und systematischer Fehler unterliegt. Bedingt wird dies vor Allem durch Variationen bei Prozessparametern wie Dampfverteilung, Abscheidungsrate, Vakuumdruck, Temperatur und so weiter. Fehler werden dabei von Schicht zu Schicht größer, und es kommt zu Abweichungen in den spektralen Charakteristiken. Bei oftmals nicht voll genutzter Kapazität in einer Dampfabscheidungskammer dauert ein voller Beschichtungsdurchlauf auch länger: er kostet je nach Design manchmal bis zu doppelt so viel Zeit wie alternative APRS-Prozesse. Da Kapazität, Ausbeute und Fertigungs-Taktzeiten bedampfter Komponenten alle wesentlich in die Gesamtkosten eingehen, sind diese oft suboptimal.

## 2.3 Anwendungen

Die Abscheidung aus der Dampfphase ist gut geeignet zum Beschichten von Spiegeln und für die meisten Antireflexionsschicht-Designs, die relativ geringe Anforderungen



**Bild 2:** Nach der Abscheidung können die Schichten – hier bei 800nm-Hochleistungs-Kurzpassfiltern – gegenläufige spektrale Verschiebungen zeigen, wenn sie wechselnden Temperaturen oder Feuchtigkeit ausgesetzt werden. Bei dichteren Schichten ist dieser Effekt deutlich reduziert

stellen. Das Verfahren eignet sich auch für verschiedene Kantenfilter-, Strahlteiler- und Kerbfilter- (notch filter) Designs mit wenigen Schichten und minimaler Designkomplexität; sobald die Spezifikationen aber zu streng werden, ist die präzise Erfüllung der Anforderungen stark eingeschränkt. Daher ist das Aufdampfen ungünstig für Präzisionsfilter, die aus > 100 Schichten bestehen können. Filter mit mäßiger Komplexität lassen sich zwar fertigen, aber dafür sind oft mehrere Vorversuche erforderlich, was zu längeren Entwicklungszeiten führt. Anspruchsvollere Filterspezifikationen erfordern eine andere Fertigungsmethode.

## 3 Ionenstrahl-Zerstäuben

### 3.1 Technik

Die Technik des Ionenstrahl-Zerstäubens (ion-beam sputtering, IBS) kam in den 1970er Jahren auf und erlaubt die Umsetzung hoch präziser theoretischer Designs mit beeindruckender Genauigkeit. Bei diesem Prozess werden mit einer Ionenkanone energiereiche Ionen generiert, die in einem elektrischen Feld auf bis zu mehrere 10 eV beschleunigt werden. Wenn diese auf das Material-Target treffen, kommt es durch Übertragung kinetischer Energie zu einer Kaskade von Kollisionen, die Material aus dem Target auswirft oder „absputtet“. Die zerstäubten Partikel können ballistisch vom Target zum Substrat fliegen, wo sie energiereich auftreffen und zu einer Abscheidung führen. Alternativ können die Partikel bei höherem Gasdruck (typisch inertes Argon-Gas) mit den Gasatomen in der Kammer kollidieren und dann einem unbestimmten Weg folgen. Sie kondensieren dann thermisch auf dem Substrat, was eine niederenergetische Abscheidung ermöglicht. Beide Aufwuchsprozesse resultieren in harten, dichten Schichten.

### 3.2 Leistungsfähigkeit

Mit IBS wird die höchste Beschichtungsqualität erreicht. Die optischen Schichten weisen sehr geringe Verluste auf, sind stabil und frei von spektralen Verschiebungen (**Bild 2**). Die Nachteile liegen in den hohen Gerätekosten: pro Maschine sind Anfangsinvestitionen von über 500 000 € erforderlich, und der optimale Betrieb der Ionenquelle verlangt einen hohen Wartungsaufwand. Weitere Nachteile sind geringe Abscheidungsraten und somit lange Produktionszyklen sowie relativ niedrige Beschichtungskapazitäten, was ebenfalls zu hohen Stückkosten führt.

### 3.3 Anwendungen

Wegen ihrer erstrebenswerten Charakteristik war IBS in den 1990er Jahren die führende Technik bei der Entwick-

lung schmalbandiger Filter für das dichte Wellenlängen-Multiplexing (DWDM). Hierbei transmittieren Bandpassfilter schmale Segmente und unterdrücken umliegende Wellenlängen. Ähnliche Verfahren werden heute für biomedizinische, militärische und lasertechnische Anwendungen genutzt, bei denen Bandpass- und Kerbfilter mit engen Toleranzen dazu dienen, bestimmte Spektralbereiche durchzulassen oder zu blocken. IBS erfüllt diese hohen Anforderungen, allerdings scheidet das Verfahren oft aus Kostengründen als Mitbewerber aus.

## 4 Reaktives Plasmazerstäuben

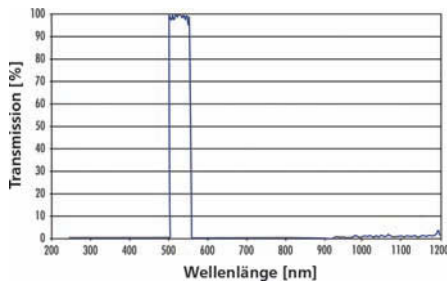
### 4.1 Technik

Dank jüngster Fortschritte in der Zerstäubungstechnik haben sich Beschichtungsanlagen als vielversprechend erwiesen, die bei deutlich niedrigeren Kosten viel von der Regelbarkeit und den Charakteristiken von IBS-Schichten bieten. Ein Beispiel ist das reaktive Plasmazerstäuben (advanced plasma reactive sputtering, APRS); hier hat insbesondere das kommerzielle APRS-System „Helios“ der Leybold Optics GmbH, Alzenau, die Beschichtungsindustrie nahezu umgewälzt. APRS ermöglicht komplexe Schichtdesigns aus abwechselnd hoch und niedrig brechenden Target-Materialien. In einem einzigen Durchgang können über 200 Schichten bei kurzen Produktionszyklen abgeschieden werden.

Die mit APRS-Anlagen demonstrierten hoch präzisen Beschichtungsergebnisse sind neuen Entwicklungen beim Plasmazerstäuben zuzuschreiben, bei dem zwei Doppel-Magnetron-Quellen im Mittelfrequenzbereich eingesetzt werden (**Bild 3**). Die Materialoxidation ist abgeschlossen, sobald die Substrate ein Sauerstoffplasma



**Bild 3:** Die APRS-Plattform ermöglicht hochgenaue, schnelle, effiziente, kostengünstige und kundenspezifische Filterbeschichtungen für breite Anwendungsbereiche

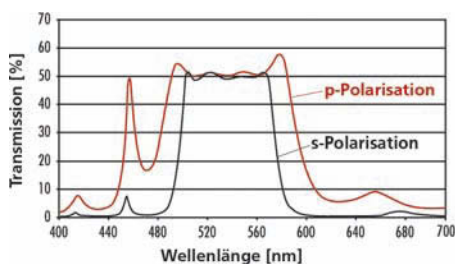


**Bild 4:** Für die meisten heutigen Fluorophore existieren maßgeschneiderte optische Hochleistungs-Bandpassfilter mit  $OD > 6$  im Sperrbereich und hoher Transmission im Durchlassbereich, hier z.B. um 531 nm

passieren, das entlang des Rotationspfades des Drehtellers angeordnet ist, von dem die Substrate getragen werden. Da das Zerstäuben und der abschließende Oxidationsprozess getrennt sind, unterliegen die Targets keinen Ladungsaufbaueffekten, die bei der Sputter-Beschichtung von Metalloxid-Schichten problematisch sein können. Die Abscheidungsrate ( $\sim 0,5$  nm/s) liegt nahe der von Aufdampfprozessen und ist gut regelbar, was zu gut vorhersagbaren Schichten mit erhöhter Wiederholbarkeit führt. Da aber die Energie des APRS-Beschichtungsverfahrens viel größer als beim Aufdampfen ist (20–30 eV gegenüber 1 eV), resultieren dichtere und stabilere Schichten ohne spektrale Verschiebungen.

## 4.2 Leistungsfähigkeit

Bei höherem Durchsatz ergibt die APRS-Technik umweltbeständigere Beschichtungen als die Dampfabscheidung, und das bei schnellerer Umsetzung und besserer Reproduzierbarkeit komplexer Designs. Die Kosten pro beschichtetem Teil sind vergleichbar mit der Dampfabscheidung und erheblich niedriger als beim IBS-Verfahren. APRS eignet sich für die effiziente Umsetzung schwierig herstellbarer Beschichtungsdesigns mit hoher Präzision, hoher optischer Dichte, hoher Transmission und steilen Kanten. Diese Eigenschaften sind entscheidend für die Erschließung neuer Märkte.



**Bild 5:** Die Präzision des APRS-Systems zeigt sich z.B. im Vergleich des theoretischen Designs (links) mit den gemessenen Spektraldaten (rechts) eines nicht-polarisierenden planaren Strahlteilers bei 532 nm

## 4.3 Anwendungen

Einsatzmöglichkeiten dieser Technik umfassen den gesamten Bereich von Filterdesigns wie Kurzpass, Langpass, Laserlinien-Bandpass, Fluoreszenz-Bandpass, dichroitische und Kerbfilter. Einige dieser anspruchsvollen Filter werden im Folgenden besprochen, mit Hinweisen auf typische Anwendungen in interessanten Wachstumsmärkten.

- Präzisions-Bandpassfilter werden für biomedizinische, lasertechnische und militärische Anwendungen gefertigt. In der Biophotonik besteht zunehmender Bedarf an hochgenauen Fluoreszenzfiltern mit diskreter Trennung von Anregungs- und Emissionswellenlängen. Diese Filter mit typisch 100–200 Schichten in einem Mehrkavitäten-Design bieten einen spektral scharfen Übergang von einer hohen Transmission im Passband zu einer hohen Dämpfung etwa mit einer optischen Dichte  $OD > 6$ . Dies ergibt ein Signal/Rausch-Verhältnis und Transmissions-/Blockungs-Verhältnis von über  $10^6:1$  (Bild 4). Eine Spezifikation für einen Fluoreszenzfilter kann z.B. lauten:  $OD > 6$ , Transmission  $> 90\%$  und Kantensteilheit  $< 0,5\%$  über einen  $< 5$  nm bis  $> 50$  nm Bandpass (FWHM).
- Leistungsfähige Kantenfilter werden in den unterschiedlichsten Anwendungen von der Astronomie bis hin zur Raman-Spektroskopie eingesetzt. Sie sind dafür ausgelegt, bestimmte Wellenlängen in langwelligen oder kurzwelligen Bereichen zu isolieren. Derartige Filter erreichen leicht optische Dichten  $> 6$  mit  $> 95\%$  Transmission im Passband. Die spektrale Kanten toleranz liegt bei Abweichungen  $< 1\%$  und kann in Sonderfällen auf  $< 0,2\%$  verschärft werden.
- Kerbfilter sind schmalbandige Reflektoren die zur Reflexion bestimmter und möglicherweise schädlicher Laserwellenlängen dienen, während sie eine hohe Transmission außerhalb dieses Bandes beibehalten, z.B. für sichtbares Licht. Beschichtungen dieser Art sind nützlich für anspruchsvolle Bildschirm-Anwendungen oder Nachtsichtgeräte, die bestimmte Laser-Wellenlängen unterdrücken müssen. Mit

APRS lassen sich Dünnschicht-Kerbfilter-Designs realisieren, die  $< 5\%$  Welligkeit (Ripple) und  $OD > 6$  bei der Mittenwellenlänge aufweisen, vergleichbar mit der Leistungsfähigkeit von Rugate-Filtern.

- Mehrschichtsysteme mit verstärkter Polarisationsbeeinflussung lassen sich auf Anrieb so herstellen, dass die gemessenen Eigenschaften mit dem theoretischen Design nahezu identisch sind. Typische Anwendungen sind Strahlteiler, die den p- und s-Polarisationszustand so verändern, dass sie je nach Anwendung transmittieren, reflektieren oder depolarisieren (Bild 5). Bei letzterem kann für eine gegebene Wellenlänge und einen Einfallswinkel der Unterschied zwischen p- und s-Polarisation auf 5% genau eingestellt werden.

## 5 Technologie-Ausblick

Auf längere Sicht ist anzunehmen, dass APRS ein bevorzugtes Fertigungsverfahren für hoch präzise Filter bleiben wird, mit dem Potential, sich von den Kosten her auch Marktanteile bei einfacheren Beschichtungsanwendungen zu erschließen. Erforscht wird weiterhin die Erschließung einer gepulsten Hochleistungs-Magnetron-Zerstäubungstechnik (high-power impulse magnetron sputtering, HIPIMS oder HPPMS), weil diese eine besonders gute Schichtadhäsion sowie eine extreme Beständigkeit gegenüber aggressiven Medien und hohen Temperaturen verspricht. Dieser Prozess nutzt ebenfalls eine Vakuumtechnik auf Basis des Zerstäubungsprinzips, wobei aber das Target mit viel höheren Leistungsdichten (im Bereich von  $\text{kW}/\text{cm}^2$ ) innerhalb sehr kurzer Pulse von 50–200  $\mu\text{s}$  aufgeheizt wird. Eine weitere vielversprechende Technik ist die zielgerichtete Dampfabscheidung (directed vapor deposition, DVD), wobei der Transport der Dampfatome von der Quelle zum Substrat präzise gesteuert wird. Dieses Verfahren generiert im Vergleich zu klassischen Aufdampftechniken höhere Abscheidungsraten und kürzere Prozessdauern. Allerdings ist noch weitere Entwicklungsarbeit erforderlich, um diese Technik für relevante Einsatzbereiche optischer Schichten anwenden zu können.

## 6 Fazit

Während optische Anwendungen in den Biowissenschaften, im militärischen Bereich und in der laseroptischen Industrie zunehmen, gehen die Anforderungen an optische Schichten zu immer komplexeren Designs mit engeren Toleranzen. Jede der vorgestellten Beschichtungstechniken hat ihre eigenen Vor- und Nachteile (s. Tabelle 1).

Beschichtungstechniken	Aufdampfen	IBS	APRS
<b>Eigenschaften</b>			
Investitions- und Betriebskosten	++	-	+
Aufnahmefähigkeit (Materialien, Optik-Formen)	++	(-)	-
Beschichtungskapazität	(-)	-	+
Prozesszuverlässigkeit und Design-Wiederholbarkeit	(-)	+	++
Spektrale Präzision und Toleranzierbarkeit	--	+(+)	++
Schichtstabilität (spektral und mechanisch / Haftung)	-	++	++
Prozessdauer	-	--	+
<b>Anwendungen</b>			
Antireflexions- (AR-) Beschichtungen	++	+	+
Spiegelschichten	+	+	-
Hochpräzise Bandpass- und Kerbfilter	--	+	++
Kantenfilter	-	+(+)	++
Polarisationsbeeinflussende Mehrschichtsysteme	-	+(+)	++
Eng toleranzierte Spezifikationen & Designs > 100 Schichten	--	+(+)	++
+ vorteilhaft, - nachteilig, () neutral / variabel je nach Prozessparameter			

**Tabelle 1: Ein Vergleich von Beschichtungstechniken und -anwendungen zeigt, dass keine Einzeltechnik alle Anforderungen erfüllt. Für optimale Ergebnisse muss eine Beschichtungsmethode nach ihren Möglichkeiten und der beabsichtigten Anwendung ausgewählt werden**

Es wurde gezeigt, dass die Dampfabscheidung gut für AR- und Spiegelschichten geeignet ist, solange die Designkomplexität nicht die Kosten zu sehr in die Höhe treibt. Ein Vorteil, den das Aufdampfen gegenüber APRS hat, ist die Fähigkeit, kompliziert geformte Optiken zu beschichten; allerdings machen Ungenauigkeiten durch zufällige und systematische Fehler das Aufdampfen zu unzuverlässig für Anforderungen höherer Präzision. Das IBS-Verfahren ist sehr genau und daher besonders vorteilhaft bei engen Spezifikationen, aber die hohen Investitions- und Betriebskosten lassen es für einige Hauptanwendungen ausscheiden. Aus Kosten- und Präzisionsgründen eignet sich die APRS-Beschichtungstechnik oft besser als die anderen diskutierten Methoden. In einer wettbewerbsorientierten Industrie ist dies ausschlaggebend – hohe Leistungsfähigkeit einer Optik bei geringeren Kosten.

Übersetzung: J. Kuppe

## Literaturhinweise

- [1] A. Thelen, Milestones in Optical Coating Technology, Proc. of SPIE Vol.5963, 2005
- [2] P.W. Baumeister, Optical Coating Technology, SPIE Press, Bellingham, Washington, 2004
- [3] I. MacMillan, Helios Advanced Capability, Power-Point presentation, Apr. 2009
- [4] H.A. Macleod, Optical Thin Films, from Optical Sciences (OPTI575) class notes, Thin Film Center Inc., Spring 2008
- [5] I. MacMillan, Optical Fabrication: Advances in sputtering benefit coating costs, Laser Focus World, Apr. 2009, [www.laserfocusworld.com/articles/358143](http://www.laserfocusworld.com/articles/358143)

- [6] R. Jaeger, Film Deposition, Introduction to Micro-electronic Fabrication, Upper Saddle River, Prentice Hall (2002)
- [7] A. Jaunzens, Versatile coatings all fresh optical properties, OLE, Feb. 2009
- [8] Directed Vapor Technologies, Inc., Coating Technology for Future, Charlottesville, VA, [www.directvapor.com](http://www.directvapor.com)

## Ansprechpartner:

Amber Czajkowski  
Thin-films Engineer  
Edmund Optics Inc.  
Manufacturing Department  
601 Montgomery Ave.  
Pennsburg, PA 18073,  
USA

Tel. +1/215/679-6272  
Fax +1/856/573-6295  
eMail: [aczajkowski@edmundoptics.com](mailto:aczajkowski@edmundoptics.com)  
Internet: [www.edmundoptics.com](http://www.edmundoptics.com)



Martin Weinacht  
Vertriebsleiter  
Edmund Optics GmbH  
Zur Giesserei 19-27  
D-76227 Karlsruhe  
Tel. 0721/6273730  
Fax 0721/6273750  
eMail:

[mweinacht@edmundoptics.de](mailto:mweinacht@edmundoptics.de)

