

# 1 Entspiegelung von Optikelementen aus Kunststoffen mittels Plasma-IAD

Stefan Jakobs (mso jena Mikroschichtoptik GmbH)

## 1.1 Zielstellung

Die Entspiegelung der Grenzflächen von Linsen und anderen optischen Elementen ist für viele optische Systeme unverzichtbar. Auf der einen Seite würde sonst die Restreflexion unbeschichteter Flächen die Gesamttransmission bei mehrkomponentigen Systemen deutlich vermindern. Darüber hinaus wird aber auch die Entstehung von Störlicht oder Geisterbildern vermieden.

Für die Entspiegelung von Optikelementen aus Glas stehen bewährte Entspiegelungsschichtsysteme und Herstellungsverfahren zur Verfügung [PULKER99]. Eine besondere Herausforderung bei der Entspiegelung von Optikelementen aus Kunststoffen stellt deren Wärmeempfindlichkeit dar. Daher können konventionelle Aufdampftechnologien, bei denen die Schichtabscheidung bei Temperaturen von mindestens 300 °C erfolgt, nicht zum Einsatz kommen. Mit anderen Verfahren, die nicht mit einer derartigen Wärmebelastung verbunden sind, können häufig nur bestimmte Typen von Entspiegelungssystemen aufgebracht werden.

Eine spezielle Anforderung bei der Entspiegelung von Komponenten innovativer Optiksyste me stellen der häufig große Bereich von Einfallswinkeln und die oft kleinen Krümmungsradien der zu beschichtenden Fläche dar. Beide Faktoren müssen beim Design des Entspiegelungssystems besonders berücksichtigt werden.

Als Ausgangspunkt unserer Entwicklungsarbeiten diente das am Fraunhofer IOF Jena entwickelte Verfahren für den Entspiegelungstyp AR-hard [SCHULZ02]. Das zugrunde liegende Schichtdesign sollte so weiterentwickelt werden, dass es auch für große Einfallswinkel und stark gekrümmte Flächen angewendet werden kann. Das Aufbringen der Schichtsysteme erfolgte mittels der Plasmaionengestützten Schichtabscheidung (Plasma-IAD). Für die Entspiegelungsschichten war die Realisierung der berechneten Restreflexion und die Einhaltung der für Anwendungen im Automobilbereich typischen Anforderungen an nichtoptische Eigenschaften wie Haftfestigkeit und Klimabeständigkeit nachzuweisen.

## **1.2 Verfahren**

Plasma-IAD gehört zur Gruppe der physikalischen Aufdampfverfahren. Es ist dadurch gekennzeichnet, dass das Schichtwachstum durch ein beständiges Bombardement niederenergetischer Argon-Ionen aus einer Plasma-Quelle unterstützt wird [ZÖLLER94]. Der Ionenbeschuss wirkt dabei über der gesamten Fläche der Aufdampfkalotte. Infolge der Ionenstützung können auch bei niedrigen Temperaturen Schichten mit hoher Packungsdichte und langzeitstabilen optischen Eigenschaften erzeugt werden.

Die thermische Belastung während des Aufdampfprozesses resultiert im wesentlichen aus der Wärme, die beim Aufschmelzen und Verdampfen der Schichtmaterialien mittels Elektronenstrahl freigesetzt wird. Als Schichtmaterialien kommen  $\text{SiO}_2$  und  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  zum Einsatz. Aufgrund der höheren Verdampfungstemperatur wird die Wärmebelastung vorrangig durch die Gesamtmenge des verdampften  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  bestimmt. In Abhängigkeit von den verdampften Materialmengen kann die Prozesstemperatur bis ca.  $120\text{ }^\circ\text{C}$  ansteigen, jedoch liegt sie bei den für Entspiegelungsschichten typischen Schichtdicken in der Regel deutlich darunter.

Die im Aufdampfprozess erreichte Temperatur ist ein kritischer Prozessparameter, da die thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Schichtmaterialien und Kunststoffmaterialien relativ stark differieren. Hohe Prozesstemperaturen führen zu thermischen Druckspannungen nach dem Abkühlen der beschichteten Kunststoffteile. Diese addieren sich zu den intrinsischen Druckspannungen, die sich insbesondere für  $\text{SiO}_2$  aus dem ionengestützten Verfahren ergeben.

Besondere Anforderungen stellt das Aufbringen von optischen Schichten auf PMMA [SCHULZ01]. Die mit konventionellen Verfahren aufgetragenen Schichten sind in der Regel nicht haftfest. Bei dem von uns eingesetzten Verfahren wird die Haftfestigkeit der Beschichtung durch eine Plasma-Vorbehandlung erhöht.

## **1.3 Schichtdesign**

Entspiegelungsschichten vom Typ AR-hard sind durch einen sehr niedrigen Anteil des hochbrechenden Materials an der Gesamtschichtdicke gekennzeichnet (Tab. 1). Damit wird der Wärmeeintrag während des Aufdampfprozesses minimiert.

	SiO <sub>2</sub>	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	AR-hard VIS
Schichtzahl	5	4	9
Gesamtschichtdicke (nm)	1.072	48	1.120

Tab. 1: Schichtaufbau im Design AR-hard VIS für Breitbandentspiegelung im sichtbaren Spektralbereich.

Die resultierende spektrale Charakteristik zeigt einen breitbandigen Bereich mit gleichmäßig niedriger Restreflexion. Für kürzere und höhere Wellenlängen steigt die Reflexion relativ steil an (Abb. 2). Dies ist dann problematisch, wenn das Entspiegelungssystem auch bei schrägem Lichteinfall oder auf gekrümmten Oberflächen wirken soll. Während sich bei schrägem Einfall die optisch wirksame Schichtdicke verringert, reduziert sich beim Aufdampfen auf eine geneigte Fläche die physikalische Schichtdicke. In beiden Fällen verschiebt sich der Entspiegelungsbereich in Richtung kürzerer Wellenlängen und es kommt zu einer erhöhten Reflexion im roten Spektralbereich. Dabei kann die Restreflexion unbeschichteter Flächen auch deutlich überschritten werden. Zwar tritt dieser Effekt prinzipiell bei allen Mehrschicht-Entspiegelungen auf, jedoch ist er für Entspiegelungen vom Typ AR-hard besonders ausgeprägt.

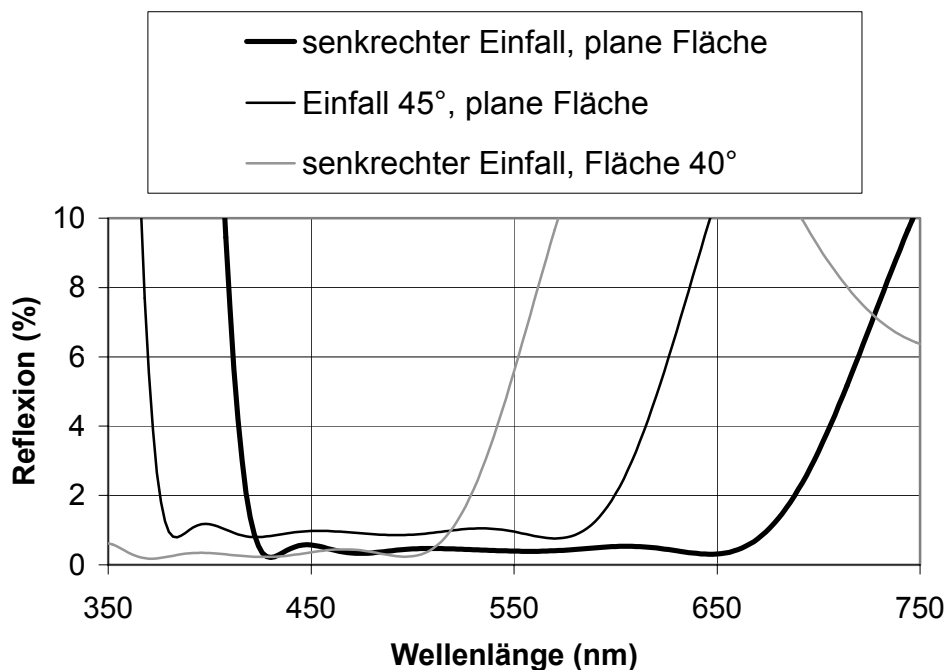


Abb. 2: Restreflexion für AR-hard VIS für senkrechten Lichteinfall auf plane Fläche sowie für Lichteinfall unter 45° und für Fläche mit Neigung 40°.

Ziel eines optimierten Schichtdesigns ist es, den Spektralbereich mit niedriger Reflexion so zu erweitern, dass er auch die spektrale Verschiebung bei schrägem Lichteinfall bzw. im Fall geneigter Oberfläche toleriert. Dabei soll auch bei hohen Einfallswinkeln bzw. stark geneigten Flächen die Restreflexion der unbeschichteten Fläche nicht überschritten werden. Zur Erreichung dieses Ziels muss zwangsläufig der Anteil des hochbrechenden Materials wieder erhöht werden. Dennoch wurde als zweites Optimierungsziel die Begrenzung der Schichtdicke für das hochbrechende Material aufrecht erhalten. Weiterhin muss für den senkrechten Lichteinfall auf die plane Fläche eine leicht erhöhte Restreflexion in Kauf genommen werden. Die im Schichtdesign erzielten Ergebnisse für den neuen Schichttyp AR-k VIS sind in Tabelle 2 und Abb. 3 zusammengefasst.

	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	<b>AR-k VIS</b>
Schichtzahl	8	7	15
Gesamtschichtdicke (nm)	787	264	1.051

Tab. 2: Schichtaufbau im Design AR-k VIS für Breitbandentspiegelung im sichtbaren Spektralbereich.

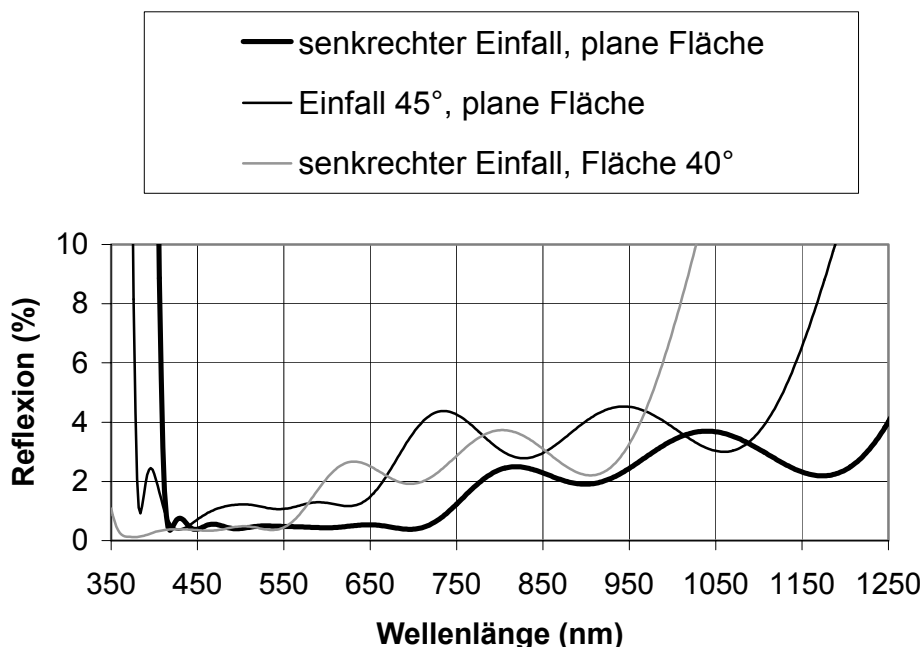


Abb. 3: Restreflexion für AR-k VIS für senkrechten Lichteinfall auf plane Fläche sowie für Lichteinfall unter 45° und für Fläche mit Neigung 40°.

Unter schrägem Lichteinfall bzw. auf geneigten Flächen wird zwar auch für das optimierte Entspiegelungssystem die Restreflexion im roten Spektralbereich etwas angehoben, jedoch wird eine deutliche Verbesserung gegenüber der unbeschichteten Fläche und gegenüber dem Schichttyp AR-hard erzielt.

Ein analoges Schichtsystem AR-k NIR wurde für die Entspiegelung im nahen Infrarot (800 - 1.000 nm) entwickelt. Mit der Verschiebung des Wellenlängenbereichs erhöhen sich zwangsläufig auch die physikalischen Schichtdicken (Tab. 3).

	SiO <sub>2</sub>	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	AR-k NIR
Schichtzahl	8	7	15
Gesamtschichtdicke (nm)	1.739	416	2.155

Tab. 3: Schichtaufbau im Design AR-k NIR für Breitbandentspiegelung im nahen Infrarot (800 - 1.000 nm).

Für die Entspiegelung des besonders wärmeempfindlichen PMMA wurde ein spezielles System AR-G VIS mit geringerem Anteil des hochbrechenden Materials entwickelt (Tab. 4).

	SiO <sub>2</sub>	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	AR-G VIS
Schichtzahl	5	4	9
Gesamtschichtdicke (nm)	653	104	757

Tab. 4: Schichtaufbau im Design AR-G VIS für Breitbandentspiegelung im sichtbaren Spektralbereich.

## 1.4 Charakterisierung von Entspiegelungsschichten

Die neu entwickelten Schichtsysteme wurden auf Proben aus den Kunststoffen PMMA, PC und COC (Cycloolefin-Copolymer) sowie auf Messgläsern aus B270 abgeschieden und geprüft.

### 1.4.1 Restreflexion

Die Messung der Restreflexion erfolgte mit dem Reflexionszubehör zum Spektralphotometer Lambda 900. Vermessen wurden Gläser aus B270 mit mattierter Rückseite. Die folgenden Abbildungen zeigen die Messergebnisse für die Restreflexion unter 0° und 45° sowie den Vergleich zur berechneten Restreflexion unter 0° auf Basis des Schichtdesigns.

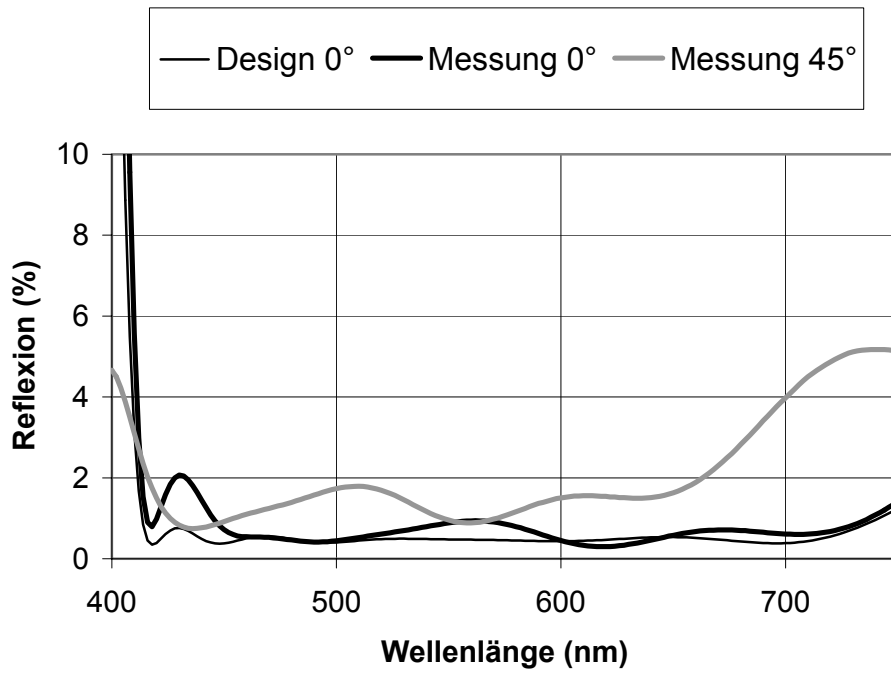


Abb. 4: Reflexion für das Schichtsystem AR-k VIS unter 0° und 45°

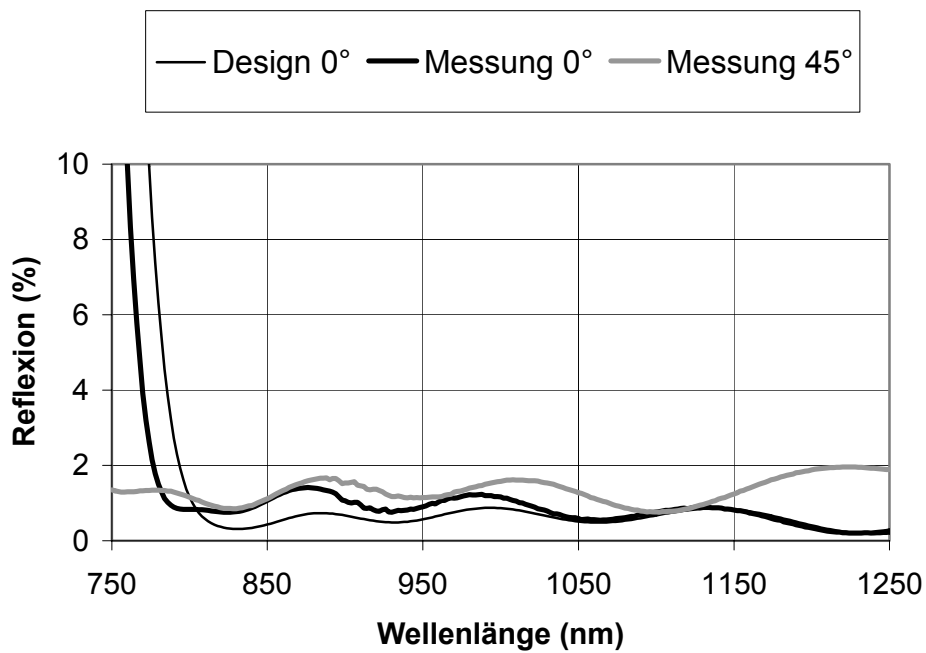


Abb. 5: Reflexion für das Schichtsystem AR-k NIR unter 0° und 45°

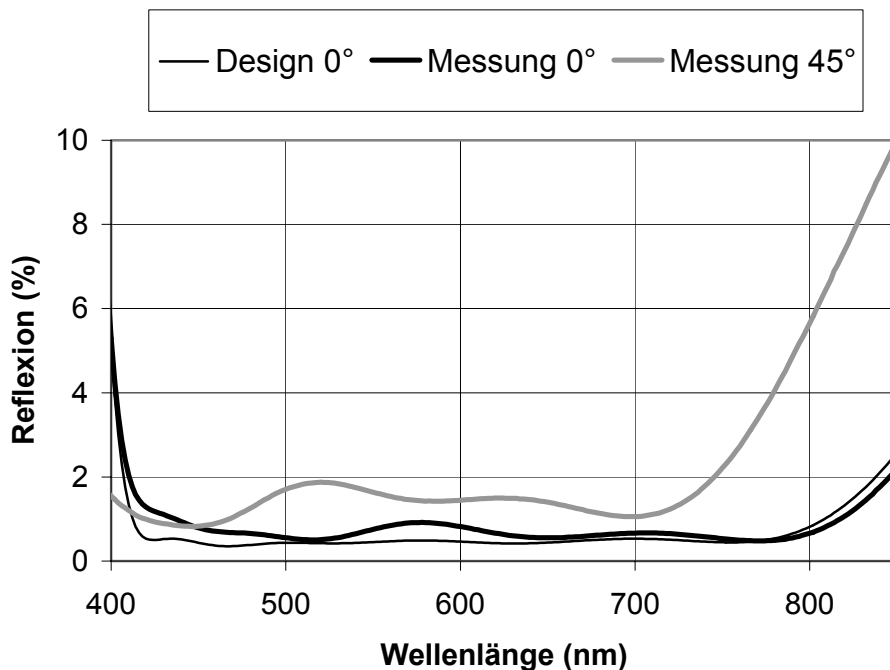


Abb. 6: Reflexion für das Schichtsystem AR-G VIS unter 0° und 45°

In allen drei Fällen liegt die gemessene Restreflexion unter 0° nah an dem berechneten Kurvenverlauf. Alle drei Systeme realisieren auch unter 45° eine gute Entspiegelung mit einer Restreflexion von ca. 1.5% im Mittel. Für eine unbeschichtete Grenzfläche liegt die Reflexion unter 45° bei ca. 5%.

### 1.4.2 Nichtoptische Eigenschaften

Geprüft wurden die Schichttypen AR-k VIS und AR-k NIR auf Proben aus PC und COC sowie der Schichttyp AR-G VIS auf Proben aus PMMA.

Die Prüfung der Haftfestigkeit erfolgte mittels Tapetest nach ISO 9211-4-02, Schärfegrad 02 (Abzug in ca. 1 s) und mittels Gitterschnitttest nach EN ISO 2409. Alle geprüften Schichttypen sind haftfest nach diesem Prüfverfahren.

Die Klimabeständigkeit wurde nach DIN ISO 9022-2 für folgende Beanspruchungsarten geprüft:

- a) 14 - Langsamer Temperaturwechsel, Schärfegrad 03  
(5 Zyklen, von 25 °C auf 70 °C)
- b) 16 - Feuchte Wärme, zyklisch, Schärfegrad 01  
(5 Zyklen von 23 °C, 85% r.F. auf 40 °C, 95% r.F.)

Die Schichttypen AR-k VIS und AR-k NIR auf PC und COC sind beständig gegenüber diesen Beanspruchungen. Der Schichttyp AR-G VIS auf PMMA zeigte Zugspannungsrisse nach dem Temperaturwechselltest. Diese sind nach unserer Auffassung auf die thermischen Spannungen zwischen Schicht- und Substratmaterial zurückzuführen.

### **1.5 Wirtschaftliche Verwertung**

mso jena ist auf die Entwicklung und Fertigung kundenspezifischer Interferenzschichtsysteme spezialisiert. Die innerhalb des Projekts entwickelten Entspiegelungssysteme erweitern nunmehr die Basis für mögliche Lösungen insbesondere bei großen Einfallswinkelbereichen und stark gekrümmten Flächen. Gegenwärtig werden entsprechende Schichtsysteme sowohl für Entspiegelungen auf Glas als auch auf Kunststoffen eingesetzt. Für die wirtschaftliche Fertigung großer Stückzahlen bestehen weitere Aufgaben in der effizienten Reinigung vor der Beschichtung, der Optimierung des Durchsatzes pro Fertigungscharge und in der Einzelteil-Prüfung nach der Beschichtung.

### **1.6 Zusammenfassung**

Typische Anwendungsfälle innovativer Optikelemente erfordern eine spezielle Anpassung des Designs von Interferenzschichtsystemen zur Grenzflächenentspiegelung. Insbesondere muss der Bereich möglicher Einfallswinkel und die Krümmung der zu beschichtenden Flächen berücksichtigt werden. Die von mso jena entwickelten Interferenzschichtsysteme erfüllen diese Anforderungen für die breitbandige Entspiegelung im sichtbaren bzw. im nahen infraroten Spektralbereich. Diese Systeme sind zur Abscheidung auf Kunststoffen geeignet und zeichnen sich auf den Materialien PC und COC durch eine gute Klimabeständigkeit aus.

### **1.7 Literaturverzeichnis**

- [PULKER99] H. K. Pulker, *Coatings on glass*, Elsevier, 2nd edition (1999)
- [SCHULZ02] U. Schulz, U. Schallenberg, N. Kaiser: *Antireflective coating design for plastic optics*, Appl. Opt. **41**, 3107-3110 (2002).
- [ZÖLLER94] A. Zöller et. al., *Plasma ion assisted deposition: A novel technique for the production of optical coatings*, SPIE **2253** (1994)
- [SCHULZ01] U. Schulz, P. Munzert, N. Kaiser, *Surface modification of PMMA by DC glow discharge and microwave plasma treatment for the improvement of coating adhesion*, Surf. Coat. Technol. **142-144**, 507-511 (2001)

