

## WK+ fo<sup>+</sup> [freeform optics plus]

Förderung der 2. Phase im Rahmen des Programms  
„Innovative regionale Wachstumskerne“  
des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF)



Verbundprojekt:  
„Technologieplattform VIS Freiformoptik“

## Sachbericht TP 8

### „Leistungsstabile optische Schichten für Freiformoptiken (fo+FreiformBeschichtung)“

**Verbundpartner:** **Optics Balzers Jena GmbH**  
Otto-Eppenstein-Straße Nr. 2  
07745 Jena

**Projektleiter:** Dr. Stefan Jakobs  
Tel. +49 3641 352932  
Fax +49 3641 352935  
[stefan.jakobs@materion.com](mailto:stefan.jakobs@materion.com)

Jena, 31.01.2023

Stefan  
Jakobs  
Stefan Jakobs

Digitally signed by  
Stefan Jakobs  
Date: 2023.03.20  
15:01:57 +01'00'

## Ausführliche Darstellung der durchgeführten Arbeiten

### 1. Hochreflektierende Schichtsysteme für die Abscheidung auf Freiform-Oberflächen

Dünne optische Schichten nehmen eine Schlüsselrolle bei der Führung von Licht in einem optischen System ein. So muss die Beschichtung für Anwendungsfälle mit hohen Anforderungen an die Übertragungsqualität Verluste im Lichtweg durch Absorption, Streuung oder unerwünschte Transmission bzw. Reflexion an Grenzflächen vermeiden. Bei der Verwendung von Lichtquellen mit hoher Energiedichte (z.B. Laser) müssen die Schichten darüber hinaus eine hinreichende Leistungsstabilität mit hoher Zuverlässigkeit erreichen.

In freiformoptischen Systemen und speziell in den gewählten Demonstrator-Anwendungen werden zusätzliche Anforderungen an die Funktionalität optischer Schichten gestellt. Die Beobachtung oder Bestrahlung über einen weiten Winkelbereich führt zu entsprechenden Anforderungen an die Winkeltoleranz der spektralen Charakteristik optischer Schichten. Zudem muss bei schrägem Lichteinfall die dem Wirkungsprinzip optischer Schichten innewohnende Polarisationsabhängigkeit berücksichtigt und so weit wie möglich minimiert werden.

Freiformflächen sind definitionsgemäß nicht plan. Bei PVD-Verfahren zum Aufbringen optischer Schichten, wie dem Elektronenstrahlverdampfen oder dem Sputtern, führt dies typischerweise zu einem inhomogenen Schichtdickenverlauf. Damit sich dieser Schichtdickenverlauf nicht signifikant auf die geforderten Reflexions- und Transmissionseigenschaften auswirkt, müssen besondere Vorkehrungen im Schichtdesign (d.h. bei der Berechnung des Schichtaufbaus) getroffen werden.

Im Rahmen des Projekts wurde detailliert untersucht, wie diese Anforderungen durch Schichtaufbauten unter Einschluss einer Metallschicht im Vergleich zu Schichtaufbauten aus rein dielektrischen Materialien erfüllt werden können.

Die entsprechenden Untersuchungen wurden zunächst an ausgewählten Modell-Schichtsystemen durchgeführt. Die Modell-Schichtsysteme wurden umfassend hinsichtlich ihrer spektralen Eigenschaften, der Mikrorauheit, der Oberflächendefekte und der Laserzerstörschwelle charakterisiert. Im Ergebnis wurden Schlussfolgerungen für die Auswahl von Beschichtungsprozess und Schichtdesign für die Verspiegelung von Demonstratoren im Verbundvorhaben gezogen. Die dabei erreichten Eigenschaften sollen im Rahmen des Schlussberichts für diese Demonstrator-Beschichtungen dargestellt werden.

Die spektrale Charakteristik wurde auf das Optik-Design des Demonstrators D1 (Projektpartner asphericon) abgestimmt:

R>99,5% @  $\lambda = 532 \text{ nm}$ , Einfallswinkel  $60^\circ$ ,  
für Mittelwert aus s- und p-Polarisation

Für eine Variante der Demonstratorbeschichtung wurde die Anforderung an die Reflexion erhöht auf

R>99,5% @  $\lambda = 532 \text{ nm}$ , Einfallswinkel  $60^\circ$ ,  
für Mittelwert aus s- und p-Polarisation

Folgende Schichtaufbauten wurden für die Demonstratoren ausgewählt (neben der Schichtfolge ist die Gesamtschichtdicke angegeben):

d1	Rein dielektrisches Schichtsystem (Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> / SiO <sub>2</sub> ) <sup>11</sup>	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 2,05 µm	R > 99,5%
d2	Metall-dielektrisches Schichtsystem Al / (SiO <sub>2</sub> / Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) <sup>6</sup>	1,13 µm	R > 99,5%
d3	Metall-dielektrisches Schichtsystem Al / (SiO <sub>2</sub> / Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) <sup>10</sup>	1,85 µm	R > 99,9%

Für die Demonstratoren wurde das Beschichtungsverfahren PARMs (Plasma-gestütztes reaktives Magnetronputtern) eingesetzt. Damit können alle Materialien (Al, SiO<sub>2</sub>, Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) mit einer Technologie abgeschieden werden.

Für alle 3 Schichtdesigns zeigen Messungen der spektralen Reflexion eine sehr gute Übereinstimmung mit den aus dem Schichtdesign berechneten Zielwerten. Für den Einfallswinkel von 60° ist die maximale Reflexion und die spektrale Breite des Reflexionsbandes abhängig von der Polarisation. Die Schichtaufbauten mit Al als erster Schicht (d2, d3) zeigen ein breiteres Reflexionsband im Vergleich zum rein dielektrischen Schichtaufbau (d1).

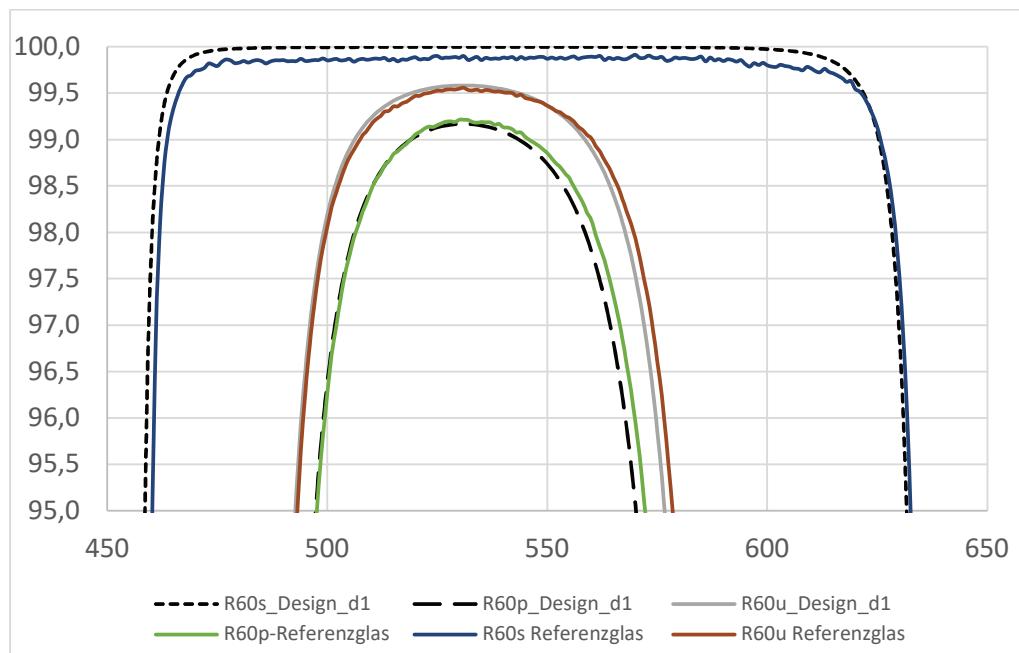
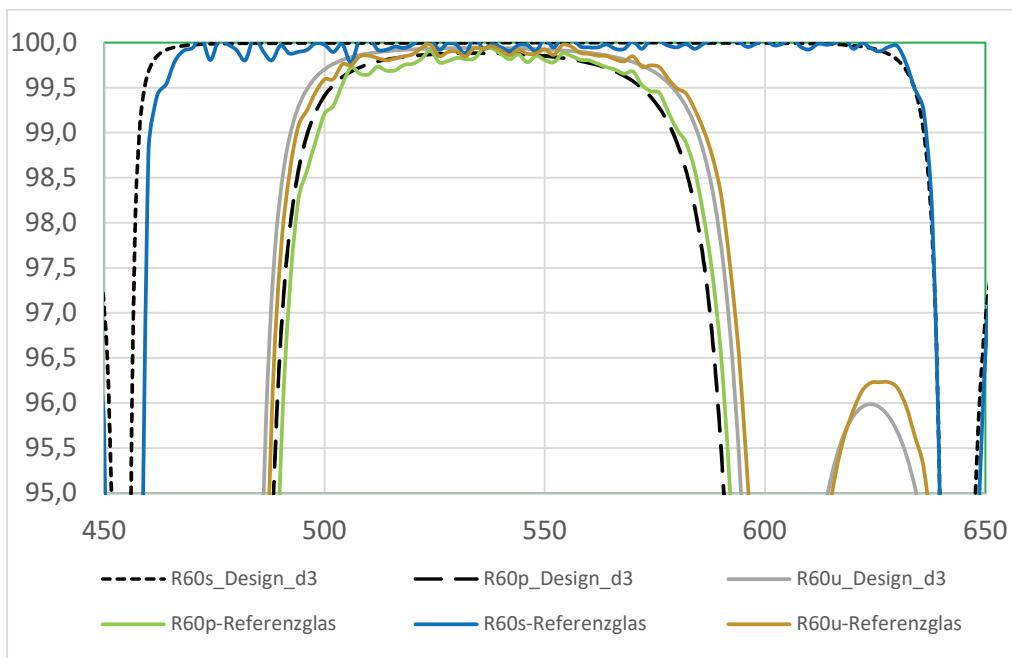


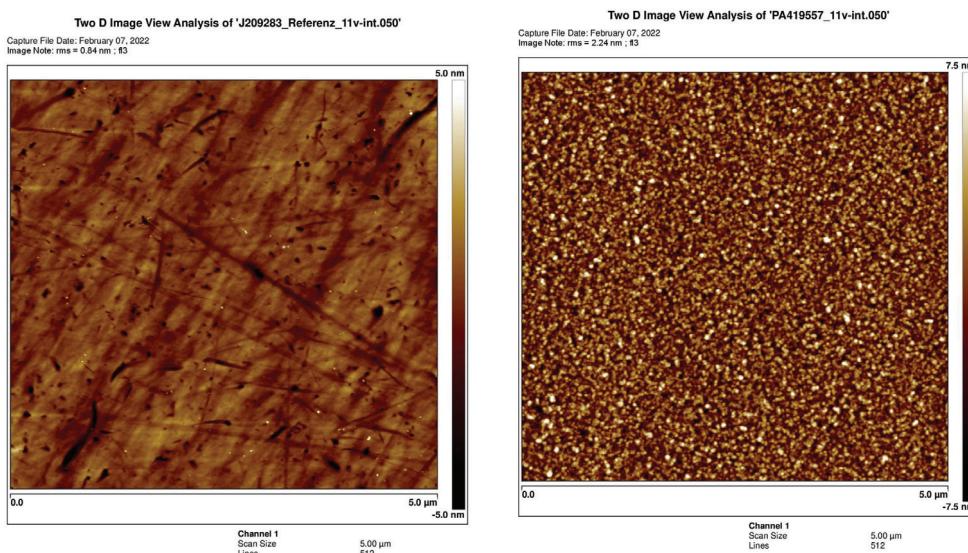
Abb. 1: Spektrale Reflexion, Design- und Messwerte für Schichtaufbau d1



**Abb. 2:** Spektrale Reflexion, Design- und Messwerte für Schichtaufbau d3

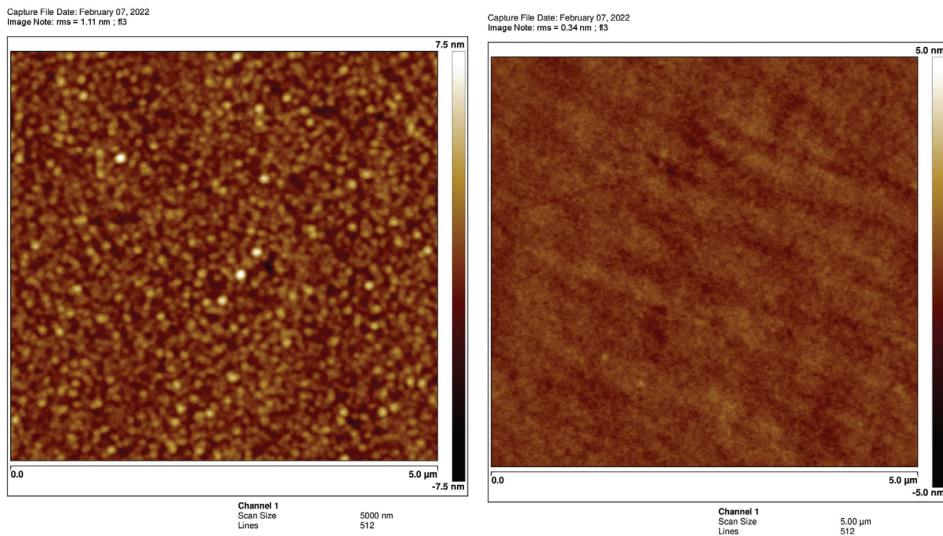
Der metall-dielektrische Schichtaufbau zeigt damit eine höhere Toleranz gegenüber dem Lichteinfallswinkel und der Oberflächenneigung als die rein dielektrische Schicht.

Eine Untersuchung der Mikrorauheit mittels AFM (Rasterkraft-Mikroskop) zeigt zunächst, dass die in den Schichtaufbauten d2 und d3 verwendete Al-Schicht eine ausgeprägte Mikrostruktur aufweist. Damit werden die typischen Polierspuren auf der Substratoberfläche überschrieben.



**Abb. 3:** Mikrostruktur des Substrats (Referenzglas, links) und einer Al-Schicht mit dünner SiO<sub>2</sub>-Auflage (rechts).

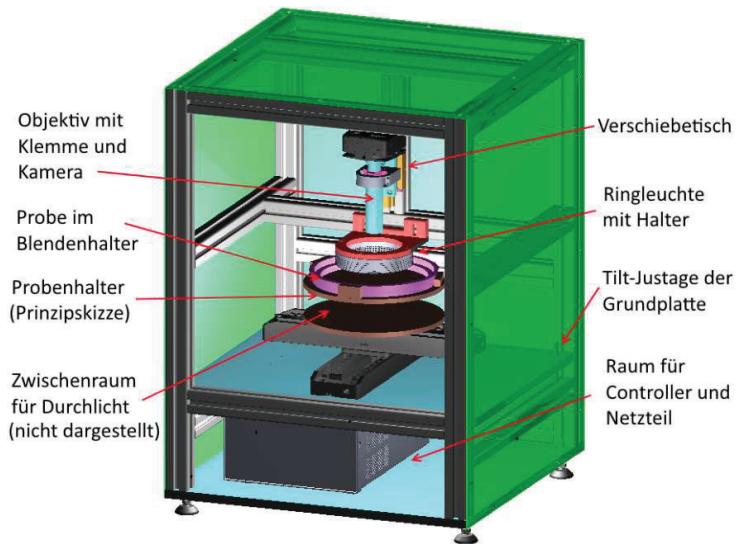
Nach dem Aufbringen der dielektrischen Schichtsysteme wird diese Mikrostruktur wieder partiell ausgeglichen (Abb. 4, links). Beim rein dielektrischen Schichtsystem ohne Al-Unterlage werden auch die Polierspuren weitgehend geglättet (Abb. 4, rechts).



**Abb. 4:** Mikrostruktur des Schichtaufbaus d3 (links) und des Schichtaufbaus d1 (rechts).

In jedem Fall überwiegen in der vorgefundenen Mikrostruktur Elemente mit einer lateralen Ausdehnung, die zu klein ist, um zu wesentlichen Streuverlusten im sichtbaren Spektralbereich beizutragen.

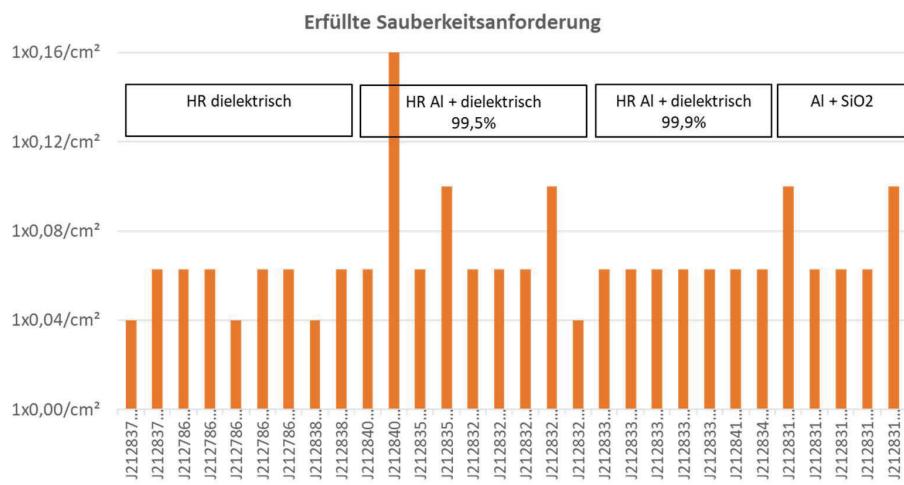
Für die Charakterisierung von Oberflächenfehlern wurden im Rahmen des Vorhabens ein Messsystem (Abb. 5), eine Definition für 4 typische Defekttypen und ein darauf basierender Auswertealgorithmus für Messdaten entwickelt. Im Ergebnis können Oberflächenfehler anhand von 4 Kennzahlen umfassend beschrieben werden. Es ist ebenso möglich, aus den Messdaten die Klassifikation der Oberflächenfehler nach DIN ISO 10110-7 vorzunehmen.



**Abb. 5:** Schema für den Defektmessplatz. Das Sichtfeld beträgt  $9 \times 12 \text{ mm}^2$ , die Auflösung  $3.5 \mu\text{m}$

Das Messsystem wurde an den Modell-Schichtsystemen der ersten Projektphase erprobt und dann für die Charakterisierung der Demonstrator-Beschichtungen eingesetzt.

Proben der Designtypen d1 bis d3 wurden einer Kategorie gemäß der DIN ISO 10110-7 zugeordnet. Es wurden keine systematischen Unterschiede zwischen den Schichtaufbauten gefunden. In den meisten Fällen wird die Kategorie 5/1x0,063 erreicht.



**Abb. 5:** Klassifizierung der beschichteten Referenzgläser entsprechend der Oberflächenfehler nach DIN ISO 10110

## 2. Schichtentwicklung für hohe Leistungsstabilität

Die Absorption innerhalb des dielektrischen Schichtmaterials ist der wichtigste die Leistungsfähigkeit für Laseranwendungen limitierende Faktor. Der Schlüssel zur Minimierung der Absorption ist dabei die genaue Kenntnis der Materialeigenschaften und ihrer Abhängigkeit von der Prozessführung. Auf dieser Basis können Absorptionseffekte zuverlässig schon in der Phase des Schichtdesign abgeschätzt und minimiert werden.

Gleichzeitig ist es nur so möglich, bei der Bewertung fertig beschichteter Substrate die Schicht-Absorption von anderen Effekten, die die erwünschte spektrale Charakteristik negativ beeinflussen, wie Substratabsorption, Kontamination an Oberflächen, Streuung aufgrund von Partikeln und Oberflächenrauhigkeit sowie im Prozess aufgetretene Schichtdickenabweichungen zuverlässig zu unterscheiden.

Übliche Verfahren zur Messung der Absorption beruhen auf der aus der Absorption direkt resultierenden Erwärmung des Schichtmaterials. Daher stellen sie enge, in der Praxis oft schwer erfüllbare Anforderungen an die nutzbaren Proben, z.B hinsichtlich der Probengeometrie, sind oft nur für wenige diskrete Wellenlängen, in denen hinreichend leistungsfähige Lasersysteme vorhanden sind, verfügbar, und erfordern aufgrund der notwendigen Kalibration hohen Aufwand in der Durchführung.

Daher wurde im Rahmen der Arbeiten versucht, die Schichtabsorption alternativ aus spektralphotometrischen Messungen zu ermitteln. Diese Methode hat grundsätzlich eine erheblich geringere Sensitivität (500 ppm gegenüber ca 10 ppm detektierbare Absorption), erlaubt aber im Gegenzug eine Messung über einen kontinuierlichen Wellenlängenbereich. Darüber hinaus sind Messungen mit beliebiger Polarisation und unter verschiedenen Einfallswinkeln problemlos umsetzbar.

Die Herausforderung besteht dann darin, sicherzustellen, dass die Absorption der dominante Verlustprozess unter den gegebenen Messbedingungen ist. Hierzu wurden zunächst Substrate mit einer hohen Oberflächenqualität (< 5 Å RMS Rauhigkeit) ausgewählt. Vorversuche haben dann gezeigt, dass für den hier im Vordergrund stehenden PARMS-Beschichtungsprozess unter geeigneten Bedingungen die Rauigkeit der Schichten nicht größer wird als die initiale Substratrauhigkeit. Unter diesen Bedingungen wurden für die betrachteten Schichtsysteme die gesamten Streulichtverluste (TIS) rechnerisch abgeschätzt, was auf TIS < 100 ppm führt. Eine Literaturrecherche zeigte, dass weitere Verluste, etwa durch Substratabsorption oder Fluoreszenz, im betrachteten Wellenlängenbereich > 200 nm noch deutlich darunter liegen. Auf diese Weise ist es gerechtfertigt, in guter Näherung den gesamten gemessenen Intensitätsverlust als Schichtabsorption zu interpretieren:

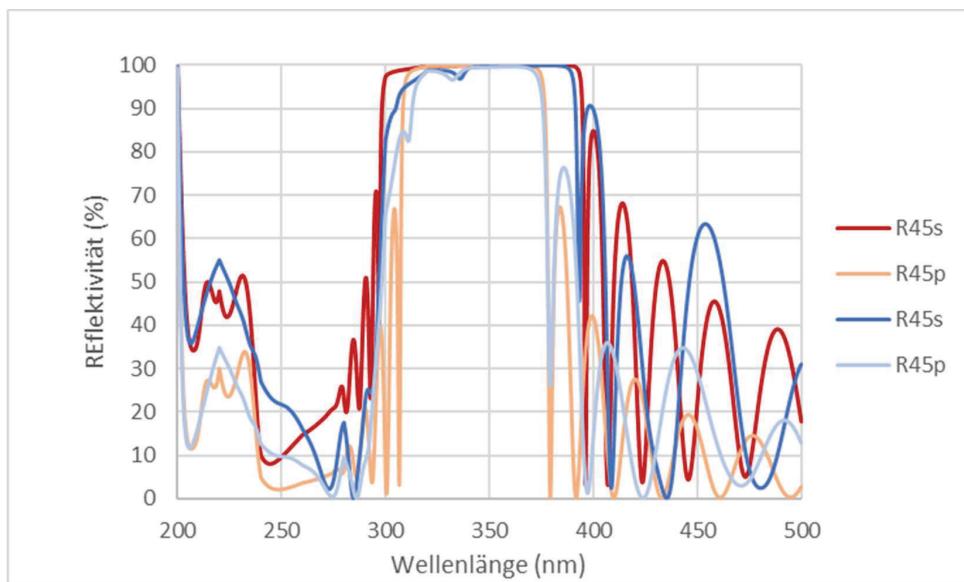
$$A \approx 100\% - (T + R)$$

Hierdurch fallen die ermittelten Werte im Zweifelsfall zu pessimistisch aus. Speziell für hoch-reflektierende Schichten kann T << 100 ppm (OD4-Blockung) leicht erreicht werden, wodurch man in diesem Fall allein aus der Messung der Reflexion auf die Absorption schließen kann, so dass sich der Messaufwand noch einmal erheblich reduzieren lässt.

Für ionengestützte Aufdampfprozesse zeigt sich, dass unabhängig von der Substratqualität die Schichtrauhigkeit für komplexere Schichtsysteme deutlich höher ist, so dass hier ein Vernachlässigen des Streulichts nicht mehr gerechtfertigt erscheint. Da die direkte Streulichtmessung unter vergleichbaren Messbedingungen extrem aufwändig ist, wurde darauf verzichtet, die weiteren Untersuchungen konzentrierten sich daher auf den PARMS-Prozess.

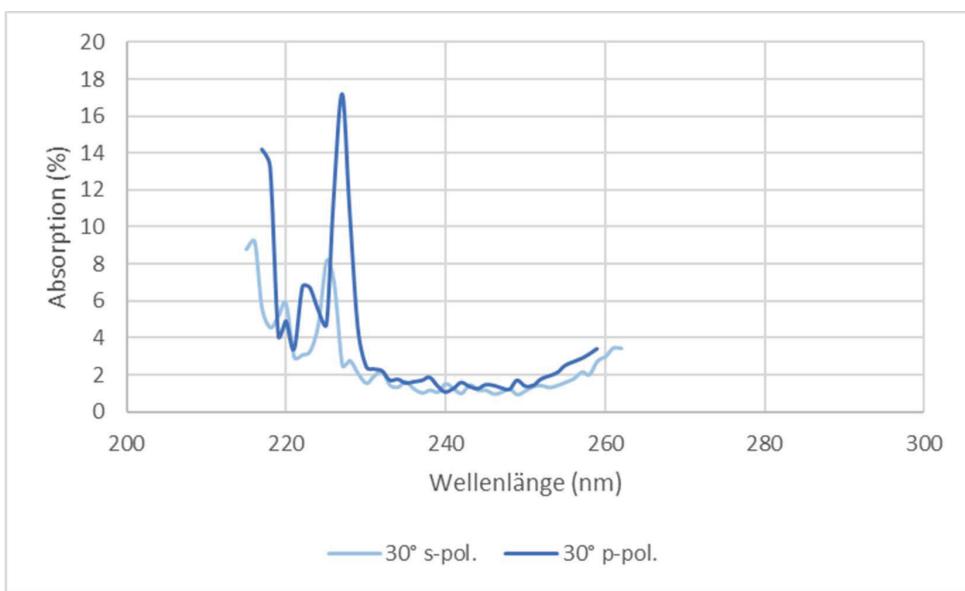
Um sicherzustellen, dass die o.g. Bedingungen realisiert werden, wurden spezielle hochreflektierende Schichtdesigns erarbeitet, die im Vergleich mit Standard-Spiegeln eine

absichtsvoll erhöhte Absorption zeigen. Hierfür wird die interne Mehrfachreflexion im Schichtsystem dahingehend optimiert, dass das Licht einen möglichst langen Weg im Schichtmaterial zurücklegt. Dieses Vorgehen hat es erlaubt, die effektive Sensitivität der Methode noch einmal deutlich zu steigern, da es sich letztlich um die Messung von Materialkonstanten handelt, für die es immer sinnvoll ist, sie in einem System zu messen, in dem sie sich möglichst stark auswirken.

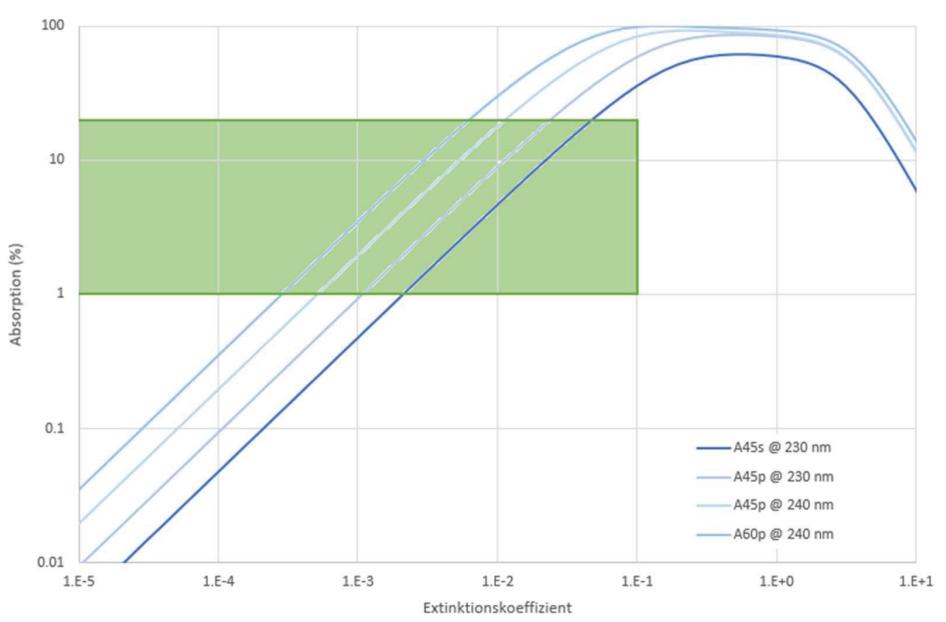


**Abb. 6:** Beispiel-Schichtdesign eines Spiegels mit erhöhter Absorptions-Sensitivität (blaue Kurven, für Reflexion unter  $45^\circ$  Einfallswinkel s- und p-polarisiert) im Vergleich zu einem Standard-HR-Design (rote Kurven)

Für die Analyse wurden dann Winkel- und Wellenlängenbereiche ausgewählt, in denen jeweils eine möglichst hohe Sensitivität erreicht wird. In diesen Bereichen wurde dann aus den Messdaten ein Absorptionswert anhand obiger Formel bestimmt, wie in Abbildung 2 zu sehen.



**Abb. 6:** Aus Messdaten abgeleitete Absorptionswerte, hier anhand eines Spiegels mit Hafniumdioxid als hochbrechendem Schichtmaterial und einen Messwinkel von 30°. Bei kürzeren Wellenlängen wird die Absorption zu hoch, um sinnvolle Extinktionswerte zu ermitteln, während bei längeren Wellenlängen die Transmission nicht mehr vernachlässigbar ist. Designbedingte Absorptionspeaks wie hier um 227 nm zu sehen, können, je nachdem wie hoch sie ausfallen, ggf. auch zu nicht zusammenhängenden nutzbaren Wellenlängenbereichen führen.



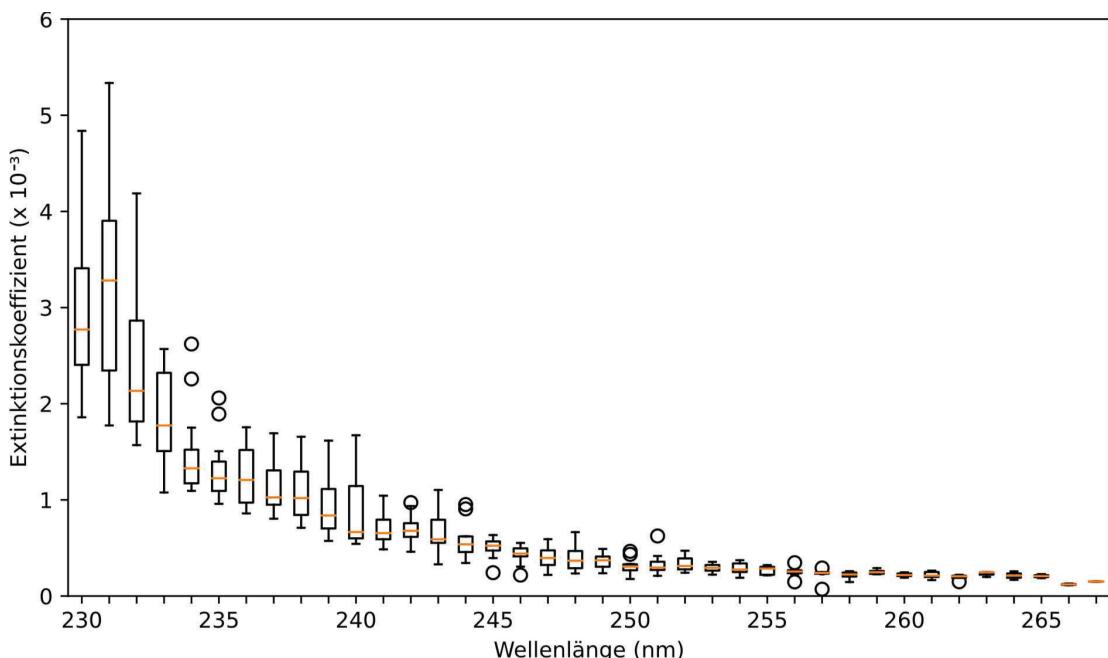
**Abb. 7:** Zusammenhang zwischen messbarer Absorption und Extinktion für einen Spiegel mit hochbrechendem Schichtmaterial Hafniumdioxid. Man sieht die starke Abhängigkeit von Wellenlänge, Einfallsinkel und Polarisierung, die sich aus dem Schichtdesign ergibt. Innerhalb des grün hervorgehobenen Bereichs sind Extinktionswerte sinnvoll bestimmbar, während bei geringerer Absorption die Messgenauigkeit, bei höherer Absorption die abnehmende Kurvensteilheit (Sensitivität) und bei Extinktionen oberhalb etwas 0.1 die Nicht-Monotonie der Kurven limitierend wirken.

Anhand des bekannten Schichtdesigns kann dann für jede Wellenlänge individuell auf den Imaginäranteil des Brechwerts (Extinktionswert) zurück gerechnet werden, wie in Abbildung 3 zu sehen.

Dabei ergeben sich Konsistenz-Bedingungen durch Vergleich der unabhängig abgeleiteten Brechwerte

- aus mehreren Messungen an einer Probe unter verschiedenen Winkeln und bei unterschiedlicher Polarisation
- aus Messung an mehreren gleichartigen Proben bei gleichen Bedingungen
- für unterschiedliche Schichtdesigns

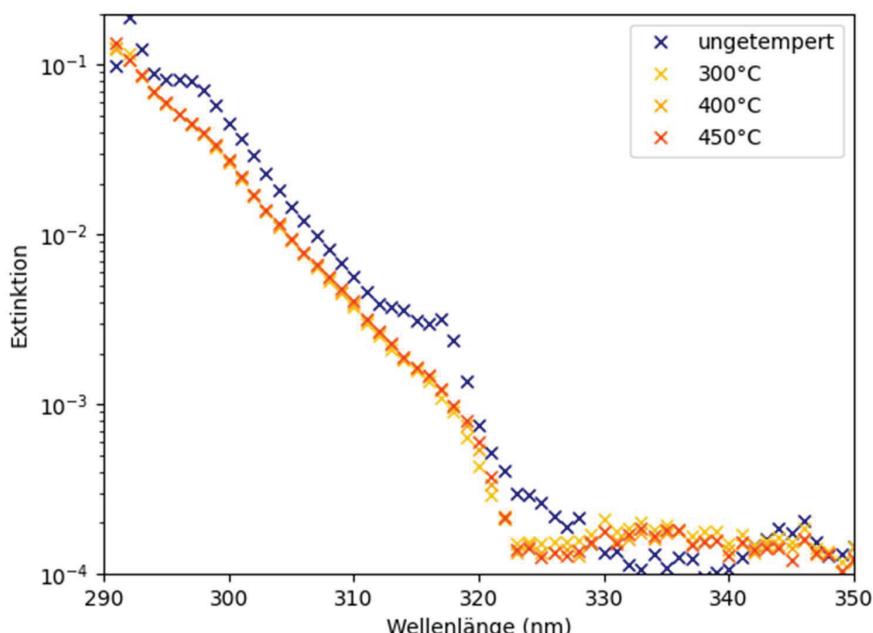
Die so abgeleiteten Extinktionswerte zeigen die folgenden Abbildungen für den Fall von  $\text{HfO}_2$  als hochbrechendem Schichtmaterial, unter der Annahme, dass im betrachteten Spektralbereich die Absorptionsverluste des hochbrechenden gegenüber dem niedrigbrechenden Material aufgrund der größeren Nähe zur Bandkante dominant sind.



**Abb. 8:** Verlauf der Extinktion von  $\text{HfO}_2$ , bestimmt anhand mehrerer Messungen an einer einzelnen Probe. Der größte Unsicherheitsfaktor besteht in der spektralen Lagetoleranz, diese ist unabhängig bestimmt- und korrigierbar.

In einem Folgeschritt wurde versucht, aus dem Vergleich zweier unterschiedlicher Schichtdesigns auch Absorptionswerte für das niedrigbrechende Material abzuleiten. Allerdings zeigt sich, dass diese Werte in den meisten Fällen tatsächlich zu gering für eine zuverlässige Bestimmung mit der genutzten Methodik sind.

Der Einfluss von Temperprozessen nach Abschluss des Beschichtungsprozesses wurde untersucht. Es wurde ein deutlicher Einfluss auf das Absorptionsverhalten der Schichtsysteme gezeigt. Dieser sättigt allerdings bei ausreichend hohen Temperaturen (etwa 300°C für den Fall von Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> als hochbrechendem Schichtmaterial) und schlägt vermutlich bei zu hohen Temperaturen aufgrund von Rekristallisationsprozessen sogar ins Gegenteil um, letzteres konnte nicht experimentell beobachtet werden, da die erreichbare Temperatur im vorhandenen Temperofen dazu nicht ausreicht.



**Abb. 9:** Veränderung der gemessenen Extinktionswerte durch Temperprozess im Anschluss an die Beschichtung am Beispiel von Tantalpentoxid als hochbrechendem Schichtmaterial.

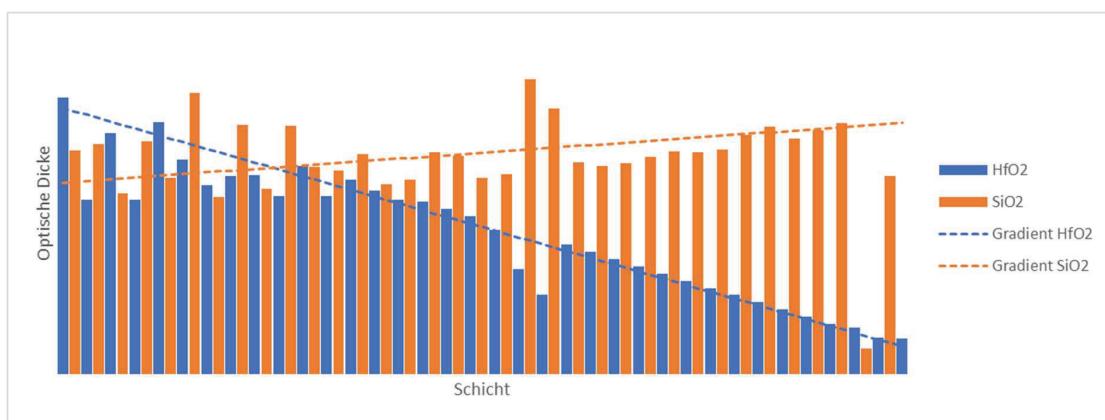
Auf Basis der so bestimmten Material- und Prozesseigenschaften wurde schließlich eine breitbandig hochreflektierende Demonstrator-Komponente entworfen. Hierfür wurde eine Spezifikation von R > 97% im Wellenlängenbereich 250 - 370 nm angestrebt.

Der Schlüssel zu einer breitbandigen Reflexionswirkung bei geringer Absorption besteht in einem Design-Ansatz mit gegenläufigen, unterschiedlich ausgeprägten Schichtdicken-Gradienten für das hoch- und niedrigbrechende Material. Auf diese Weise wird eine Reflexion der absorptionsanfälligeren kurzwelligeren Anteile des Spektrums schon in den äußersten Schichten erreicht, gleichzeitig wird für die längerwelligen Anteile eine hohe Reflexionswirkung mit relativ wenigen Schichtpaaren erreicht.

Dieser Design-Ansatz wurde dann mittels eines angepassten Levenberg-Marquardt-Algorithmus auf die Reflexion als alleinige Zielfunktion optimiert. Dies ist in diesem Fall zielführend, weil Erhöhung der Reflexion und Verringerung der Absorption hier miteinander

verknüpft sind, die Transmission bleibt bei diesem Ansatz immer über den gesamten Spektralbereich gering.

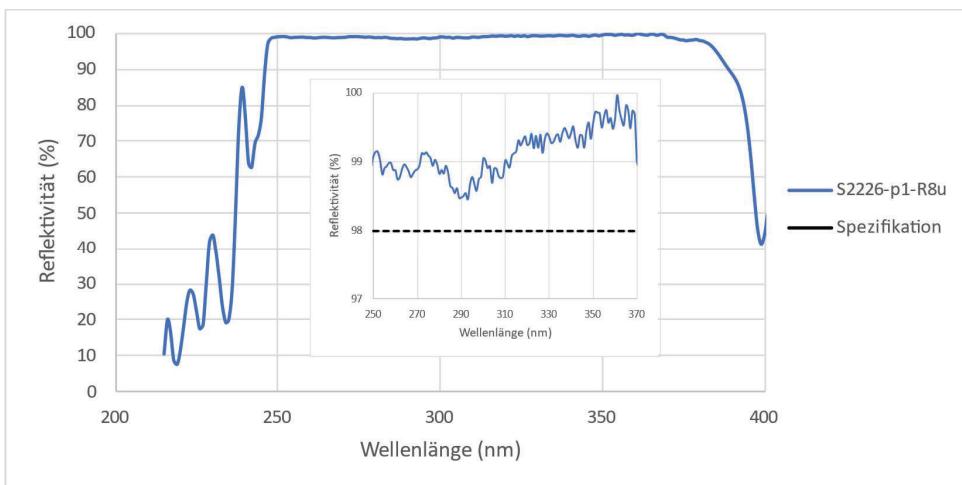
Ein Vergleich der mit einem solchen Designansatz gewonnenen Schichtsysteme für Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> und HfO<sub>2</sub> als hochbrechende Schichtmaterialien zeigt, dass trotz der bei größeren Wellenlängen liegenden Bandkante von Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> für die Zielstellung beide Materialien ähnlich geeignet sind. Im Fall des Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> wird eine vergleichbare Reflexionswirkung bereits durch ein erheblich dünneres Schichtsystem erzielt wird. Diese geringere Dicke des Schichtsystems führt dann im Mittel über den betrachteten Spektralbereich auch zu einer geringeren Absorption als dies mit dem als Material schwächer absorbierenden HfO<sub>2</sub> der Fall ist. Diese Abwägung zwischen weniger stark absorbierendem Material einerseits und geringerem Schichtdickenbedarf dank höherer Brechzahl andererseits muss in jedem Szenario individuell getroffen werden. Dies unterstreicht die Bedeutung des Schichtdesigns bei der Entwicklung absorptionsarmer hochreflektierender Komponenten. Das folgende Bild zeigt den grundsätzlichen Designansatz und das finale Schichtdesign mit HfO<sub>2</sub> nach Optimierung:



**Abb. 10:** Optimierte Schichtdesign (Balken) und prinzipieller Ansatz mit konjugierten Gradienten (gestrichelte Linien) für Breitbandspiegel mit hochbrechendem Schichtmaterial HfO<sub>2</sub>

Das so entwickelte Schichtdesign wurde mittels PARMS-PVD abgeschieden. Im Anschluss wurde aufgrund der vorherigen Erkenntnisse zur Absorptionsminimierung ein Temperprozess bei 300°C durchgeführt.

Die folgende Abbildung zeigt die erreichte spektrale Performance nach dem Temper-Prozess, im Vergleich zur Ausgangs-Spezifikation. Dies zeigt, dass auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse zu Materialgrößen, Prozessführung und in Kombination mit einem angepassten Schichtdesign anspruchsvolle breitbandige hochreflektierende Komponenten umsetzbar sind.



**Abb. 11:** Gemessener Reflexionsverlauf an UV-Breitbandspiegel . Die Ausschnitts-Vergrößerung zeigt, dass die Zielspezifikation klar übertroffen wurde, im Mittel über den Spektralbereich wurden sogar 99% Reflektivität erreicht.

### 3. Verifikation der Leistungsstabilität

Aus den Untersuchungen an Modell-Schichtsystemen wurde im Projektverlauf die folgenden Erkenntnisse für die Beschichtung des Demonstrators D1 gewonnen:

Nachgewiesen wurde eine Laserzerstörschwelle im Bereich zwischen 1 und 6 J/cm<sup>2</sup> bei 532 nm, womit die Zielspezifikation erfüllt wird. Davon ausgenommen sind metall-dielektrische Schichtsysteme mit Silber als metallischer Komponente. Dies ist mit hoher Wahrscheinlichkeit eine Folge der höheren Anzahl von Oberflächendefekten.

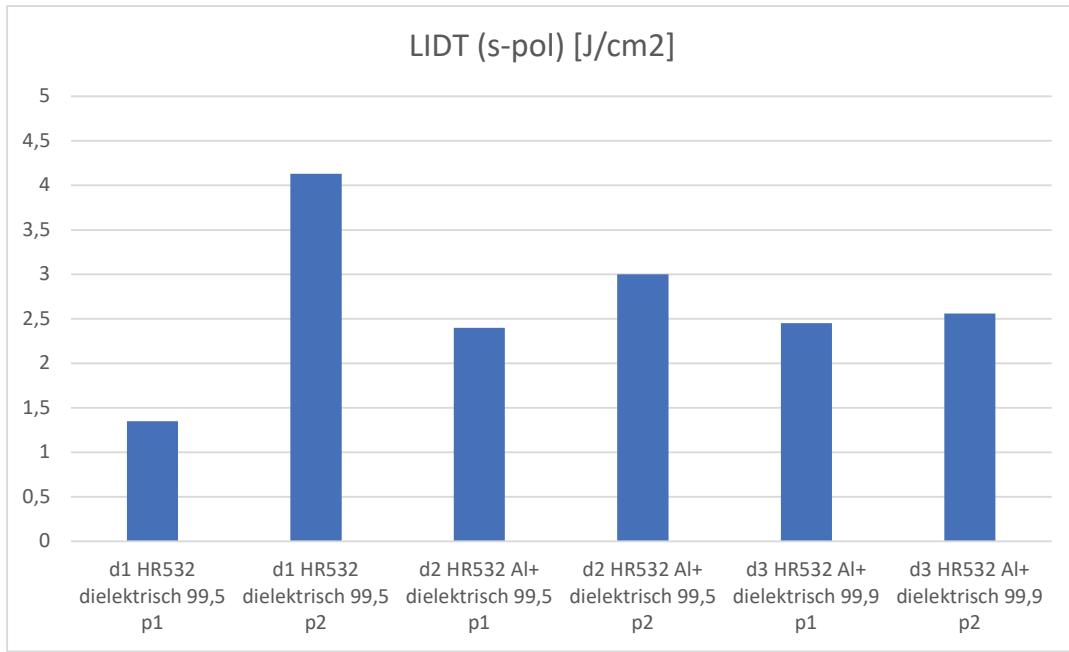
Die höchsten Laserzerstörschwellen werden mit den rein dielektrischen Schichtsystemen erreicht. Für die gesputterten Schichtsysteme hat die Mikrorauheit der Oberfläche (P4-Politur versus Standardpolitur) einen signifikanten Einfluss auf die Laserzerstörschwelle. Für das mittels Elektronenstrahlverdampfung aufgebrachte dielektrische Schichtsystem ist dagegen kein Einfluss der Oberflächenpolitur nachweisbar. Eine mögliche Erklärung dafür ist, dass die Mikrorauheit der Oberfläche hier durch die Mikrorauheit des Schichtsystems „überschrieben“ wird.

Auf Basis der Voruntersuchungen wurde für die Demonstrator-Beschichtung das plasma-gestützte Magnetronspinnen als Beschichtungsverfahren ausgewählt. Die HR-Schichtsysteme wurden für einen Einfallsinkel von 60° optimiert. Bei diesem Einfallsinkel ist die Eindringtiefe in das Schichtsystem für p-polarisiertes Licht deutlich höher als für s-polarisiertes Licht, so dass eine Abhängigkeit der LIDT vom Polarisationszustand zu erwarten ist.

Die Prüfung der Laserzerstörschwelle (LIDT) wurde an einem externen Messplatz (Fa. Lidaris) unter den Anwendungsbedingungen (Einfallsinkel 60°, s-pol., p-pol.) vorgenommen. Als LIDT definiert wird dabei die höchste Intensität für die die extrapolierte Wahrscheinlichkeit einer Schichtzerstörung bei 0 liegt.

Da die Demonstratoren selbst nicht direkt am Messplatz untersucht werden können, wurden Referenzproben aus Quarzglas im selben Beschichtungsprozess hergestellt und charakterisiert. Nach den vorhergehenden Untersuchungen mittels Rasterkraftmikroskopie ist die Mikrorauheit dieser Referenzproben niedriger als die der Freiform-Demonstratoren.

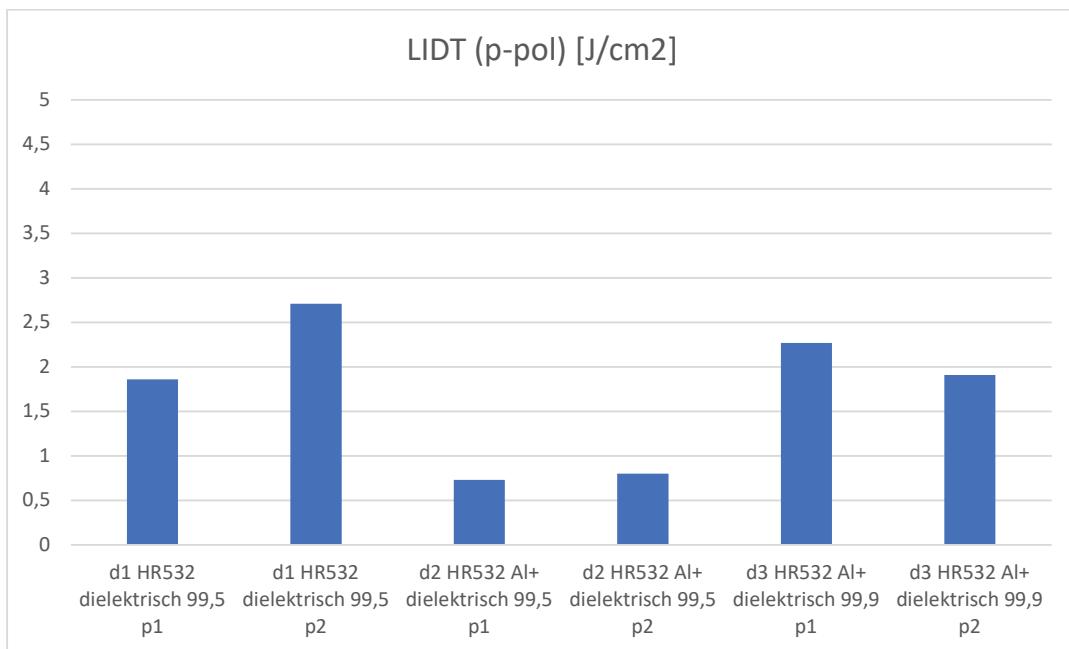
Bei Einstrahlung von s-polarisiertem Licht gibt es nur geringe Unterschiede der LIDT für die 3 verschiedenen Schichtaufbauten. Der niedrige Wert für eine der beiden Proben mit rein dielektrischem Schichtsystem (d1) wird als Ausreißer infolge eines Oberflächendefekts interpretiert.



**Abb. 12:** LIDT-Messung an jeweils 2 Proben für die Schichtaufbauten d1 – d3 (s-Polarisation)

Bei der Bestimmung der LIDT für p-polarisiertes Licht ergeben sich erwartungsgemäß durchgehend niedrigere Werte. Insbesondere für den Schichtaufbau d2 wird dann die Al-Schicht infolge ihrer Absorption zum Auslöser der Schicht-Zerstörung.

Ungeachtet der graduellen Unterschiede in der erreichten LIDT kann festgestellt werden, dass alle 3 untersuchten Schichtaufbauten prinzipiell für den Einsatz im Demonstrator D1 geeignet sind.



**Abb. 13:** LIDT-Messung an jeweils 2 Proben für die Schichtaufbauten d1 – d3 (p-Polarisation)

#### 4. Aufwendungen für die Projektarbeiten

Der bei weitem überwiegende Anteil der Projektaufwendungen entfiel auf Personalkosten für wissenschaftliche Mitarbeiter, Ingenieure für die Prozessentwicklung und für Mess- und Prüfverfahren und für Facharbeiter für die Bedienung von Beschichtungsanlagen und Mess- und Prüfgeräten. Der Leiter des Teilprojekts war mit der Koordinierung des KTP4 (Beschichtung) betraut und vertrat das Unternehmen in den Arbeitsgruppen Strategie und Forschung & Entwicklung sowie im Lenkungskreis des Wachstumskerns.

Der Gesamtaufwand für Personal überschritt mit 766.145 EUR geringfügig den bewilligten Betrag von 758.982 EUR.

Materialkosten fielen in Form von Schichtmaterial an, das als Granulat, Pressling oder Sputtertarget eingesetzt wird und den Ausgangsstoff zur Herstellung der optischen Schichten im Beschichtungsprozess bildet. Dabei kamen Siliziumoxid ( $\text{SiO}_2$ ) und Tantaloxid ( $\text{Ta}_2\text{O}_5$ ) im Aufdampfprozess und Silizium, Hafnium und Tantal im Sputterprozess jeweils in hochreiner Form zum Einsatz. Als Metalle wurden Silber und Aluminium verwendet. Die Gesamtkosten zur Beschaffung dieser Materialien beliefen sich auf 23.558 EUR (bewilligt 24.000 EUR).

Als Fremdleistungen bezogen wurde die Prüfung der Laserzerstörschwelle unter verschiedenen Bestrahlungsbedingungen in einem Prüflabor. Außerdem wurden Komponenten der Beschichtungsanlagen bei einem Dienstleister mit einem speziellen Verfahren aufbereitet, welches eine defektfreie Schichtbildung unterstützt. Die Aufwendungen für diese Fremdleistungen beliefen sich auf insgesamt 42.140 EUR (bewilligt 40.276 EUR).

Der Gesamtaufwand für die Projektarbeiten lag bei 831.843 EUR und damit um ca. 8.600 EUR über den Aufwendungen, die dem Zuwendungsbescheid zugrunde lagen. Der Mehraufwand wurde durch einen erhöhten Eigenanteil abgedeckt.

Alle genannten Aufwendungen waren zur Erfüllung der geplanten Arbeiten notwendig und angemessen. Zwischen einzelnen Arbeitspaketen kam es zu Verschiebungen der Personalaufwände gegenüber der ursprünglichen Planung, die jedoch im Gesamtbild wieder ausgeglichen wurden. Die Materialien und Fremdleistungen wurden nur in dem zur Erfüllung der Projektziele notwendigen Umfang eingesetzt.

## 5. Verwertung der Projektergebnisse nach Projektabschluss

Wesentliche Ergebnisse, die unserem Unternehmen für eine künftige Verwertung zur Verfügung stehen sind:

- die quantitative Bestimmung der Laserzerstörschwelle für rein dielektrische und metall-dielektrische hochreflektierende Schichtsysteme
- die Entwicklung eines Verfahrens zur präzisen Bestimmung eines Reflexionsgrads im Bereich von 99,9% unter schrägem Lichteinfall
- das grundlegende Verständnis für die bestimmenden Strukturen der Mikrorauheit verschiedener Substrat-Schicht-Kombinationen
- ein Verfahren zur personen-unabhängigen Charakterisierung von Oberflächendefekten optischer Schichten
- die quantitative Bestimmung des Absorptionskoeffizienten von Schichtmaterialien im ultravioletten Spektralbereich.

Diese Erkenntnisse werden im Anschluss an das Projekt für kundenspezifische Angebote für breitbandig hochreflektierende optische Komponenten verwendet und voraussichtlich in Kürze auch in Produktionsprozessen umgesetzt.

Die quantitativen Ergebnisse zu den Absorptionskoeffizienten können darüber hinaus im Rahmen des Schichtdesigns für alle künftig neu entwickelten Produkte mit spektralen Anforderungen im ultravioletten Spektralbereich verwendet werden.

Der Messplatz für die Charakterisierung von Oberflächendefekten wird bereits im Serienprozess für die Qualitätskontrolle von Laserspiegeln eingesetzt und hat zu einer signifikanten Verringerung des Prüfaufwands und zu zuverlässigeren Ergebnissen geführt.

Innerhalb des Projektzeitraums hat sich der Jahresumsatz unseres Unternehmens von ca. 8 Mio. EUR auf 13 Mio. EUR erhöht. Auch für die kommenden Jahre wird ein Umsatzwachstum von 10-15% pro Jahr angestrebt.

Diese Entwicklung wird massgeblich von der Fähigkeit getragen, schnell auf neue Kundenanforderungen reagieren zu können. Die Projektergebnisse stärken das dafür notwendige technologisch Know-how im Bereich unserer Kernkompetenzen. Die Fertigungskapazität und die personellen Ressourcen werden dementsprechend ausgebaut. So stieg die Anzahl der im Unternehmen Beschäftigten von 68 zu Projektbeginn auf gegenwärtig 95.

## **6. Fortschritte bei anderen Stellen**

Im Bereich der optischen Technologien findet ein ständiger Wettbewerb um kostengünstige Produktangebote mit verbesserten Leistungsparametern statt. Angesichts der hohen Diversifikation der Produkte und der oft kundenspezifischen Lösungen ist ein umfassender Überblick zur Wettbewerbssituation kaum möglich. Aus den uns vorliegenden Rückmeldungen von Kunden können wir schließen, dass unsere Angebote sowohl preislich als auch qualitativ gut im Wettbewerb positioniert sind.

Grundsätzliche Alternativen zur Herstellung hochreflektierender und verlustarmer optischer Schichtsysteme sind uns seit Projektbeginn nicht bekannt geworden. Die von uns eingesetzten Beschichtungsverfahren stellen weiterhin den Stand der Technik dar, an dem kunden- oder anwendungsspezifische Optimierungen ansetzen.

## **7. Veröffentlichungen**

Ergebnisse des Teilprojekts wurden im Rahmen der „Virtual Workshop Series“ des Wachstumskerns fo+, Episode 4, „Optical Coatings for Freeform Optics“ in einem Online-Vortrag einem internationalen Teilnehmerkreis vorgestellt.

Eine Vorstellung der Ergebnisse der Charakterisierung des Absorptionskoeffizienten im ultravioletten Spektralbereich ist im Rahmen eines Vortrags auf dem Fachsymposium Optical Coatings for Laser Applications (OCLA) im März 2023 in Jena geplant.



GEFÖRDERT VOM  
Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung



# WK+ fo<sup>+</sup> [freeform optics plus]

## Kurzbericht TP 8

### „Leistungsstabile optische Schichten für Freiformoptiken (fo+FreiformBeschichtung)“

**Verbundpartner:** Optics Balzers Jena GmbH  
Otto-Eppenstein-Straße 2  
07745 Jena

Dünne optische Schichten nehmen eine Schlüsselrolle bei der Führung von Licht in einem optischen System ein. In freiformoptischen Systemen und speziell in den gewählten Demonstrator-Anwendungen werden zusätzliche Anforderungen an die Funktionalität optischer Schichten gestellt. Die Beobachtung oder Bestrahlung über einen weiten Winkelbereich führt zu entsprechenden Anforderungen an die Winkeltoleranz der spektralen Charakteristik optischer Schichten. Zudem muss bei schrägem Lichteinfall die dem Wirkungsprinzip optischer Schichten innenwohnende Polarisationsabhängigkeit berücksichtigt und so weit wie möglich minimiert werden.

Im Rahmen des Projekts wurde zunächst detailliert untersucht, wie diese Anforderungen durch Schichtaufbauten unter Einschluss einer Metallschicht im Vergleich zu Schichtaufbauten aus rein dielektrischen Materialien erfüllt werden können.

Die entsprechenden Untersuchungen wurden im ersten Schritt an ausgewählten Modell-Schichtsystemen durchgeführt. Die Modell-Schichtsysteme wurden umfassend hinsichtlich ihrer spektralen Eigenschaften, der Mikrorauheit, der Oberflächendefekte und der Laserzerstörschwelle charakterisiert. Im Ergebnis wurden Schlussfolgerungen für die Auswahl von Beschichtungsprozess und Schichtdesign für die Verspiegelung von Demonstratoren im Verbundvorhaben gezogen.

Für die Demonstratoren wurde im Ergebnis der Untersuchungen das Beschichtungsverfahren PARMS (Plasma-gestütztes reaktives Magnetronputtern) eingesetzt.

Für die Charakterisierung von Oberflächenfehlern wurden im Rahmen des Vorhabens ein Messsystem und ein Auswertealgorithmus für die Messdaten entwickelt. Im Ergebnis können Oberflächenfehler anhand von 4 Kennzahlen umfassend beschrieben werden. Es ist ebenso möglich, aus den Messdaten die Klassifikation der Oberflächenfehler nach DIN ISO 10110-7 vorzunehmen.

Die Absorption innerhalb des dielektrischen Schichtmaterials ist der wichtigste die Leistungsfähigkeit für Laseranwendungen limitierende Faktor. Der Schlüssel zur Minimierung der Absorption ist dabei die genaue Kenntnis der Materialeigenschaften und ihrer Abhängigkeit von der Prozessführung.

Im Rahmen der Arbeiten wurde die Schichtabsorption an speziell dafür ausgelegten Schichtsystemen aus spektralphotometrischen Messungen ermittelt. So konnte der Verlauf des Absorptionskoeffizienten für Hafniumoxid und Tantaloxid im Spektralbereich zwischen 230 und 350 nm ermittelt experimentell werden.

Der Einfluss von Temperprozessen nach Abschluss des Beschichtungsprozesses wurde untersucht. Erwartungsgemäß wurde ein deutlicher Einfluss auf das Absorptionsverhalten der Schichtsysteme gezeigt und quantitativ beschrieben.

Auf Basis der so bestimmten Material- und Prozesseigenschaften wurde schließlich eine breitbandig hochreflektierende Demonstrator-Komponente entworfen. Es wurde eine breitbandig hohe Reflexion von >99% im Spektralbereich zwischen 250 und 350 nm erreicht.

Mit Blick auf die Anwendung in einem Laser-Beam-Expander (Demonstrator 1) wurden in Abstimmung mit dem Verbundpartner asphericon verschiedene Varianten für breitbandig hochreflektierende Schichtsysteme für eine Zentralwellenlänge von 532 nm untersucht. Der Zusammenhang zwischen der Mikrostruktur der Schichtoberfläche und der Politurgüte des Glasträgers sowie der Eigenstruktur der Schichtmaterialien konnte mittels Rasterkraftmikroskopie verdeutlicht werden.

Die Prüfung der Laserzerstörschwelle (LIDT) wurde unter den Einsatzbedingungen im Demonstrator (Einfallsinkel 60°, s-pol., p-pol.) vorgenommen. Bei Einstrahlung von s-polarisiertem Licht ergaben sich sowohl für die metall-dielektrischen als auch für die rein dielektrischen Schichtaufbauten Laserstörschwellen im Bereich von 2 bis 4 J/cm<sup>2</sup>. Bei der Bestimmung der Laserzerstörschwelle für p-polarisiertes Licht ergeben sich erwartungsgemäß durchgehend niedrigere Werte. Insbesondere für den metall-dielektrischen Schichtaufbau wird dann die Al-Schicht infolge ihrer Absorption zum Auslöser der Schicht-Zerstörung.

Grundsätzlich sind jedoch alle untersuchten Schichtaufbauten für den Einsatz im Demonstrator unter den vorgegebenen Einsatzbedingungen geeignet.

Die Verwertung der Projektergebnisse erfolgt im Rahmen der kundenspezifischen Herstellung von reflektierenden und spektral selektierenden optischen Komponenten. Dabei stärken und erweitern sowohl die Erkenntnisse über metall-dielektrische Schichtsysteme als auch die quantitative Analyse des Absorptionskoeffizienten im ultravioletten Spektralbereich die bestehenden technologischen Kompetenzen des Unternehmens. Die Zusammenarbeit und der technologische Austausch mit den Verbundpartnern wurde im Zuge der Projektarbeiten gestärkt.

31.01.2023

Stefan  
Jakobs

Digitally signed  
by Stefan Jakobs  
Date: 2023.03.20  
14:44:14 +01'00'

Stefan Jakobs