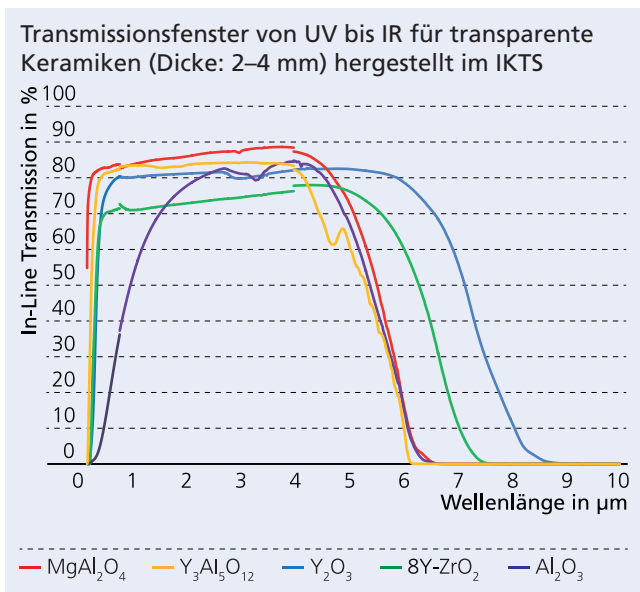


OPTIK

# OPTISCHE KERAMIKEN MIT SPEZIFISCH EINGESTELLTER SPEKTRALER TRANSMISSION

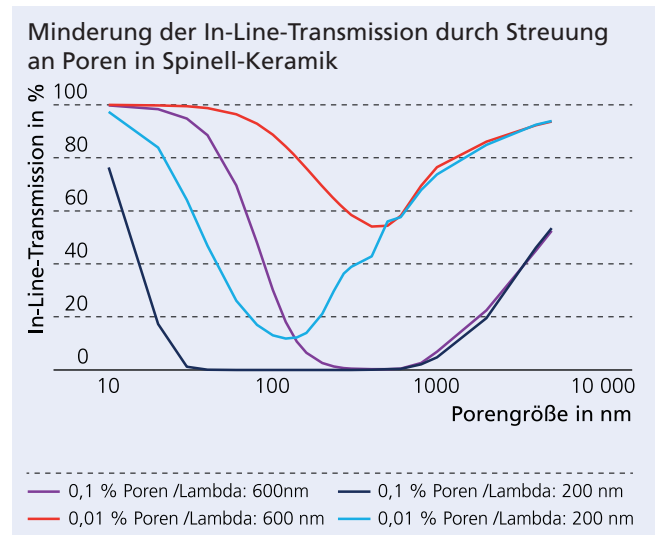
Dr. Jens Klimke, Dr. Andreas Krell

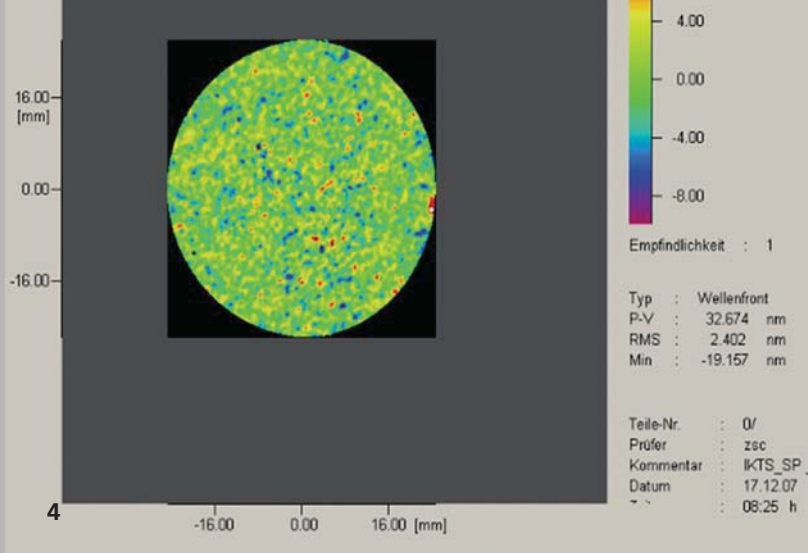
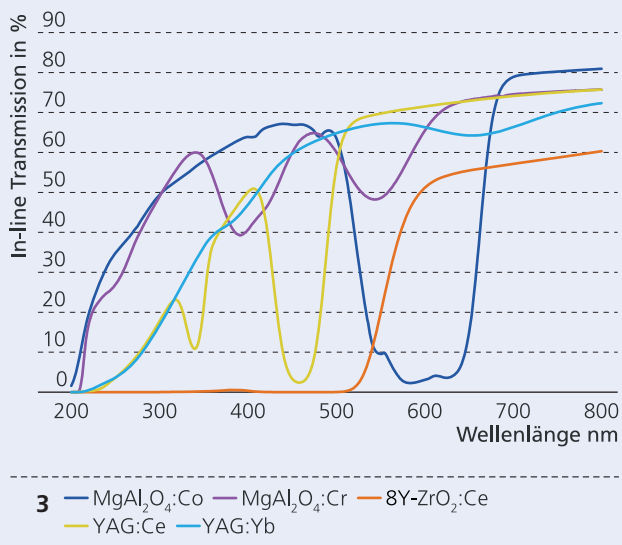
Die Lichtdurchlässigkeit an Festkörpern wird durch den atomaren Aufbau bestimmt und kann in Abhängigkeit von der Wellenlänge durch den komplexen Brechungsindex beschrieben werden. Der Realteil des Brechungsindex erfasst die Reflexion an der Oberfläche und der Imaginärteil die Absorption beim Durchtritt des Lichtsstrahls. Im Realkristall ist die Größe des Fensters des lichtdurchlässigen Bereichs zwischen den Absorptionskanten im kurzwelligen bzw. langwelligen Bereich des Spektrums durch die Defektpopulation sowie die Reinheit des Materials limitiert. Das nachstehende Diagramm zeigt Transmissionspektren einiger unterschiedlich transparenter Keramiken vom UV- bis IR-Bereich. Die transparenten Keramiken können ähnliche spektrale Transmissionen wie Einkristalle erreichen, weisen jedoch einige Besonderheiten auf, auf die im Folgenden eingegangen werden soll.



Aufgrund ihres polykristallinen Aufbaus wird die Transmission bei Keramiken durch Streuanteile an Poren und Fremdphasen

beeinflusst. Bei anisotropen Kristallsystemen (wie Korund und tetragonalem Zirkonoxid) sind zusätzliche Streuanteile durch die Richtungsabhängigkeit des Brechungsindex, die zu einer Aufspaltung des Lichtwegs an jedem einzelnen Kristallit führen, zu berücksichtigen. Um eine hinreichende Transparenz zu erzielen, müssen die Streuanteile minimiert werden. Dies gelingt durch defektvermeidende Herstellung der keramischen Grünkörper und durch Sinterverfahren, die nahezu vollständige Verdichtung zu porenfreien Keramiken ermöglichen. Die Transmissionsminderung durch Streuung ist am stärksten für Streuzentren, deren Durchmesser der Wellenlänge des Lichts entsprechen. Der Einfluss der Doppelbrechung kann daher durch Gefügekorngrößen kleiner als die Wellenlänge des Lichts verringert werden. Ebenso tragen kleine Porengrößen tendenziell weniger zur Lichtstreuung bei. Das nachstehende Diagramm zeigt eine Simulation der Transmissionsminderung durch Mie-Streuung an 0,1 % bzw. 0,01 % kugelförmigen Poren unterschiedlicher Größe in Spinellkeramik von 1 mm Dicke in Abhängigkeit des Porendurchmessers für die Wellenlängen 200 nm und 600 nm.





**OPTIK**

Mikrorisse wie sie z. B. beim Tempern an Luft erzeugt werden, wirken sich daher besonders im kurzwelligen Bereich des Spektrums aus. Einzelne größere Defekte > 20 µm mindern die Transparenz im Mittel nur wenig, werden jedoch visuell als störend empfunden und können für optische Anwendungen aufgrund der Abbildungsfehler nicht toleriert werden. Eine gezielte Beeinflussung der spektralen Transmission kann durch den Einbau von Dotierungen erfolgen. Durch spezifische Dotierungen realisierte Absorptionszustände sind die Basis für keramische Laserbauteile, optische Filter sowie keramische Szintillatoren für die Lichttechnik und Medizintechnik. Bild 1 zeigt transparente Spinellkeramiken (Dicke 3,9 mm) mit Kobaltdotierung (blau) bzw. Chromdotierung (rot) sowie eine ceriumdotierte 8Y-ZrO<sub>2</sub>-Keramik (orange, Dicke 1,9 mm). Die Absorptionsbanden der Keramiken sind im UV-Vis-Spektrum (Bild 3) abgebildet. Bild 2 zeigt YAG-Keramiken (Dicke 2,7 mm), mit Ytterbium dotiert (hellblau) bzw. Cerium-dotiert (gelb). Die Absorptionsbande der Ceriumdotierung ist, wie das In-Line-Transmissionsspektrum (Bild 3) zeigt, gegenüber der ceriumdotierten 8Y-ZrO<sub>2</sub>-Keramik zu kürzerer Wellenlänge verschoben. Beide Mechanismen, der Einbau von Absorptionszentren bzw. von Streuzentren eröffnen gegenüber den klassischen transparenten Materialien Glas, Einkristall und transparenten Kunststoffen Möglichkeiten, Materialien, mit neuen optischen Eigenschaften zu kreieren bzw. die im Vergleich zu Glas hervorragenden mechanischen und thermischen Eigenschaften der Keramiken mit neuen optischen Eigenschaften zu verbinden. Gegenüber Einkristallen bieten transparente Keramiken Vorteile durch den isotropen Aufbau des polykristallinen Gefüges, vereinfachte Herstellungsverfahren und neue Dotierungsmöglichkeiten z. B. in höheren Konzentrationen. Potentielle Anwendungen für transparente Keramiken sind z. B. mechanisch, thermisch oder chemisch stabile Fenster für ballistischen Schutz oder für thermisch bzw. chemisch beanspruchte Reaktoren sowie IR-transparente Domes. Die speziellen optischen Eigenschaften von Keramiken, wie hoher Brechungsindex und geringe Spannungsdoppelbrechung, machen Transparentkeramiken interessant für optische Linsensysteme.

Die Anforderungen an die optische Qualität der Keramiken stellen sich für die jeweiligen Anwendungsfälle unterschiedlich dar. Die folgende Tabelle definiert Entwicklungsziele hinsichtlich der Kriterien: Verlustfaktor k, In-Line-Transmission, optische Homogenität und Anzahl sichtbarer Defekte für die

Wellenlänge von 600 nm für die Anwendungsfelder keramische Fenster, optische Linsen aus Keramik und Laserkeramiken. Diese Parameter sind zum Teil hochambitioniert, weil sie letztlich auf der Aufgabe basieren, die perfekte, d. h. im Volumen vollständig defektfreie Keramik herzustellen. Die notwendigen Technologien müssen für jedes Kristallsystem und jede Dotierung, ausgehend von den keramischen Rohstoffen über Formgebung und Sinterung neu erarbeitet werden. Das IKTS stellt sich dieser Herausforderung seit nunmehr 15 Jahren erfolgreich, wie die gute optische Homogenität von IKTS-Spinellkeramik zeigt (siehe Bild 4, Messung Zeiss-SMT), die die Anforderungen an lasertaugliche Saphir-Einkristalle hinsichtlich der Homogenität übertrifft.

**Optische Anforderungen unterschiedlicher Anwendungsfelder an transparente Keramiken**

Anwendungsfeld	Verlustfaktor k In-line ~600 nm	In-line-Transmission ~600 nm, 4 mm Dicke	Optische Homogenität Δn	Anzahl sichtbarer Defekte >20 µm
Fenster	≤ 0,05 cm <sup>-1</sup>	> 0,95 T <sub>max</sub>	-	<100/cm <sup>3</sup>
Optische Linsen	< 0,01 cm <sup>-1</sup>	> 0,99 T <sub>max</sub>	< 0,05 ppm	<10/cm <sup>3</sup>
Laserkeramik	< 0,001 cm <sup>-1</sup>	> 0,999 T <sub>max</sub>	0,01–1 ppm	~0

Für weitere Fortschritte ist die systematische Erforschung des Zusammenhangs zwischen Eigenschaften der keramischen Ausgangsstoffe und ihrem Verdichtungsverhalten, sowie zu den Sintermechanismen an Keramiken bei Dichten > 99,9 % der theoretischen Dichte erforderlich.

**Danksagung**

Teile der vorgestellten Arbeiten wurden unterstützt durch: King Abdulaziz City for Science and Technology (Riad, Saudi-Arabien), Schott AG (Mainz), Zeiss-SMT GmbH (Oberkochen)

- 1 *Dotierte MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>- und 8Y-ZrO<sub>2</sub>-Keramiken mit spezifischer Absorption.*
- 2 *Dotierte YAG-Keramiken mit spezifischer Absorption.*
- 3 *In-Line-Transmissionsspektren der Keramiken aus Bild 1 und Bild 2.*
- 4 *Homogenitätsmessung an IKTS-Spinellkeramik.*