Technische Keramiken in der Medizin – Werkstoffe, Eigenschaften, Anwendungen

U. Werr

Technische Keramiken spielen im Bereich der Medizintechnik eine bedeutende Rolle – sie sind oft Schlüsselkomponenten in komplexen Baugruppen in diesem Anwendungsgebiet. Die außergewöhnlichen Eigenschaften der Keramiken ermöglichen teilweise erst diese spezifischen Anwendungen. Da sich die Eigenschaften der Keramiken von denen von Metallen, Kunststoffen und anderen Werkstoffen deutlich unterscheiden, sind sie in vielen Fällen unverzichtbar. Dieser Artikel soll neben den relativ bekannten Einsatzgebieten in Gelenkimplantaten und Dentalanwendungen den Blick auf eher weniger bekannte Anwendungen im Bereich der Medizintechnik lenken.

1 Anwendungsgebiete – ein Versuch einer Einordnung

Die Medizintechnik stellt ein weites Feld an Anwendungsgebieten dar, in fast allen lassen sich keramische Werkstoffe in mehr oder weniger großem Umfang nutzen. In diesem Zusammenhang ist der Begriff „Medizinprodukt" nach dem Medizinprodukte-Durchführungsgesetz (MPDG) ein Signalwort, das eindeutig klarstellt, was die Anwendung ist. Das Medizinprodukte-Durchführungsgesetz (MPDG [1]) basierend auf der EU-Verordnung 2017/745 [2] löst seit Mai 2021 schrittweise das bisherige Medizinprodukte-Gesetz (MPG) ab.

Hier ist beschrieben, was als ein Medizinprodukt gilt: „Medizinprodukt" bezeichnet damit zusammengefasst ein Instrument, Apparat, Gegenstand, der zur Anwendung beim Menschen bestimmt medizinische Zwecke erfüllen soll:

Ulrich Werr
Rauschert Heinersdorf-Pressig GmbH
96332 Pressig

E-Mail: u.werr@prg.rauschert.de
www.rauschert.com

Keywords: medizinische Anwendung, Hochleistungskeramik, Alumina, Zirconia, Zirkoniumoxid-verstärktes Aluminiumoxid



Bild 1 Medizinische Instrumente mit keramischen Bauteilen

- Diagnose, Verhütung, Überwachung, Vorhersage, Behandlung oder Linderung von Krankheiten;
- Diagnose, Überwachung, Behandlung, Linderung von oder Kompensierung von Verletzungen oder Behinderungen;
- Untersuchung, Ersatz oder Veränderung der Anatomie oder eines physiologischen oder pathologischen Vorgangs oder Zustands;
- Gewinnung von Informationen durch die In-vitro-Untersuchung von Proben aus dem menschlichen Körper (auch Organ-, Blut- und Gewebespenden);
- Produkte zur Empfängnisregelung;
- Produkte für die Reinigung, Desinfektion oder Sterilisation von Medizinprodukten.

Pharmazeutische Produkte sind davon abzugrenzen und fallen nicht unter diese Verordnung bzw. Gesetze. Diese wirken nicht

auf physischem bzw. physikochemischem Wege wie Medizinprodukte [2].

Eine mögliche Art der Erfassung von Anwendungen in der Medizintechnik, weitergehend als das MPDG/MPG, kann eine Betrachtung des Güterverzeichnisses für Produktionsstatistik in Deutschland bieten. Hier sind auch seltenere Einsatzmöglichkeiten im Bereich der Medizintechnik erfasst, wie auch detaillierter aufgeschlüsselt. Im Jahre 2005 erfolgte im Rahmen einer Studie über die Situation der Medizintechnik eine Erfassung möglicher Güter, die in verschiedenen Güterklassen der Statistik verteilt sind [3]. Dabei werden folgende Güterklassen identifiziert (in Klammern kursiv ergänzt: bekannte Anwendungen in diesen Gebieten – ohne Anspruch auf Vollständigkeit):

- **Röntgen- und Strahlentherapiegeräte:** Computertomographen *(Lager, Pumpenbauteile, Ventile, Hochspannungsisolatoren, Röhren zur Erzeugung von Röntgenstrahlung*), andere Röntgengeräte (*wie oben*), Röntgenröhren (*Röhrengehäuse, Hochspannungsisolatoren*), Alpha-, Beta-, Gammastrahlengeräte für die Diagnose und Therapie (*wie oben*);
- **Andere Elektrodiagnosegeräte und -systeme:** Magnetresonanzgeräte, Szintigraphiegeräte, Ultraschalldiagnosegeräte (*Piezokeramiken zur Ultraschallerzeugung*), Elektrokardiographen, Endoskope (*Linsenhalter*);
- **Therapiesystem:** Ultraviolett- und Infrarot-Therapiegeräte (*langzeit- und temperaturbeständige Isolationsstücke an den UV/IR-Lampen, passende Lampenfassungen*), Ultraschalltherapiegeräte (*Piezokeramiken zur Ultraschallerzeugung*), Dialysegeräte (*Isolatoren für Durchflussmesser, Sensoren zur Luftblasenerkennung*), Mechanotherapiegeräte (*Lager*), Geräte für die Therapiegasbehandlung (*Drucksensoren, porösen Keramiken für Gassensoren*), Beatmungsgeräte (*wie Therapiegasbehandlung*), Anästhesiegeräte (*wie Therapiegasbehandlung*), Transfusions- und Infusionsgeräte (*wie Therapiegasbehandlung*);
- **Chirurgische Geräte und Systeme:** Scheren, Zangen und andere chirurgische Instrumente (*Isolierstücke, Achsen aus Vollkeramik und Abstandshalter/Isolierschichten aus keramischen Beschichtungen*), chirurgisches Catgut und Nahtmaterial, sterile Klebstoffe, Laminariastifte, Nadeln, Spritzen, Katheter und Kanülen;
- **Implantate und Prothesen:** künstliche Gelenke (*Hüft-, Knie-, Fingergelenkimplantate, Bandscheibenimplantate*) Augenprothesen, andere künstliche Körperteile und Organe, Gefäßstützen (*Stents*), Herzschrittmacher (*Durchführungen*), Hörgeräteimplantate;
- **Orthopädische Hilfen, Geräte, Vorrichtungen und Fahrzeuge für Gehbehinderte:** Schienen, Bandagen, Orthesen, Gehhilfen, Roll(Fahr)stühle;
- **Audiologische Geräte und Systeme:** Hörgeräte, Hörbrillen und Zubehör für Schwerhörigengeräte (keine Hörimplantate);
- **Ophthalmologische** (Augenheilkundliche) **Geräte und Systeme:** Ophthalmologische Diagnose- und Messgeräte, ophthalmologische Lasergeräte, Optikerwerkstattgeräte, Sehhilfen (Kontaktlinsen, Brillen);
- **Zahnärztliche Materialien, Geräte und Systeme:** Zahnzement (*Knochenersatzstoffe*), Zahnfüllstoffe, Dentalwachs, Zahnabdruckmassen, Zahnprothesen (*Dentalimplantate, Wurzelstifte, Abudments*), Modelliergeräte, Bohrer (*keramische Bohrer*), Poliergeräte, Absaugvorrichtungen, Zangen, Mundspiegel und andere zahnärztliche Instrumente (keine Dentalstühle) (*Ultraschallerzeuger zur Zahnreinigung/Zahnsteinentfernung*);
- **Diagnostika und Reagenzien:** In-vivo- und in-vitro-Diagnostika, Kontrastmittel für Diagnoseverfahren (keine Diagnostika-Geräte, soweit sie nicht mit dem Reagenz verbunden sind);
- **Verbandsmaterialien:** Pflaster, Verbandsmaterial aus Mull, Zellstoff, Watte, Vliesstoff, auch mit medikamentösen Stoffen überzogen, ausgestattete Erste-Hilfe-Behältnisse;
- **Textilien und Produkte aus Kautschuk für den medizinischen Bedarf:** Watte und Spinnstoffe für medizinische Zwecke, chirurgische Handschuhe, Präservative und andere Produkte aus Weichkautschuk für medizinische Zwecke;
- **Besondere Einrichtungen für Kliniken und Arztpraxen:** Dentalstühle, Untersuchungs- und Behandlungstische und -sessel für Röntgenapparate, Operationstische, Betten, Tragen, Bahren für den Einsatz im medizinischen und chirurgischen Bereich;
- **Sonstige medizinischen Geräte und Vorrichtungen:** u. a. Sterilisierapparate (*Ventile, Pumpenbauteile*), Blutdruckmessgeräte, Herzfrequenzmonitore, Absaugpumpen, Generatoren (*Isolatoren*), Gipsscheren, Saugglocken, Pulsmesser, medizinische Roboter, Defibrillatoren, Fremdkörpersuchgeräte, Perkussionshammer, ausgerüstete Arztkoffer;
- **Dienstleistungen:** Installation, Instandhaltung und Reparatur von medizinischen Geräten und Instrumenten.

Es sei betont, dass die obige Einteilung nach Güterklassen unabhängig von der Definition der Medizinprodukte nach der EU-Verordnung 2017/745 [2] bzw. den darauf aufbauenden Gesetzen ist, da sie anderen Zwecken dient. Die Intention dieser Auswahl besteht darin, einen vollständigen Überblick über die Branche zu bekommen, um keine Anwendung außer Acht zu lassen, wie die weitere Fassung der Definition des Medizinproduktes unter [3] zeigt.

Neben den direkten Einsatzmöglichkeiten keramischer Werkstoffe lassen sich auch weitere, mehr oder weniger indirekte Anwendungen identifizieren (beispielhafte Auswahl):

- Schneidkeramiken zur Herstellung von chirurgischen Instrumenten, Bauteilen für Röntgen- und Strahlentherapiegeräten etc. durch Drehen, Fräsen, Bohren, etc.;
- Tauchformen aus glasiertem Porzellan für die Herstellung von chirurgischen Handschuhen;
- Keramische Fadenführer aus Aluminiumoxid, Zirkonoxid sowie Mischungen dieser beiden Werkstoffe für die Herstellung von Pflaster, Verbandsmaterial aus Mull, chirurgischem Nahtmaterial, etc.

Es sind noch weitere derartige indirekten Anwendungen von Keramiken in der Medizintechnik von Bedeutung, aus Gründen der Übersichtlichkeit soll aber auf deren Ausführung in diesem Beitrag verzichtet werden.

Ebenfalls weniger geläufig in ihrer Verwendung sind die zahlreichen auf Keramiken basierenden Bauteile der Mikroelektronik (Kondensatoren, Integrierten Schaltkreise, Widerstände etc.). Diese sind in mehr oder weniger großer Anzahl in jeder elektronischen Steuerung verbaut, ohne die bekanntermaßen nur noch wenige Anwendungen

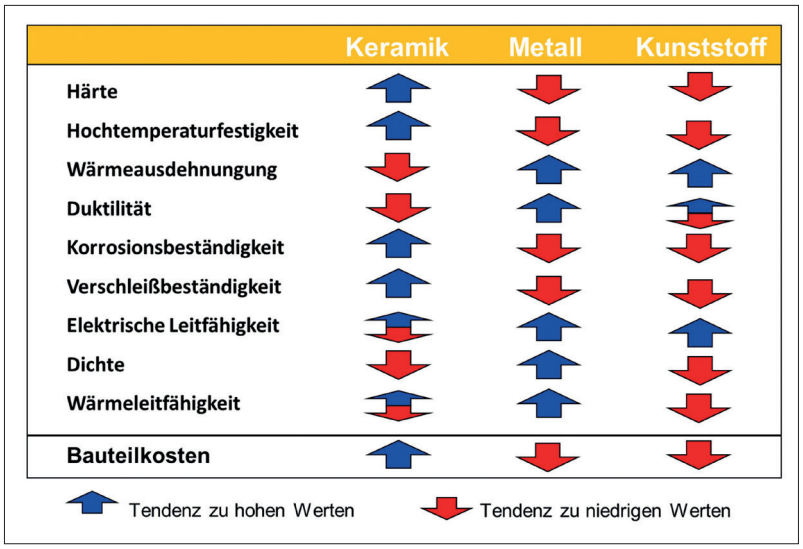


Bild 2 Vergleich typischer Eigenschaften von Keramiken im Vergleich zu Metallen und Kunststoffen [4]

heutzutage auskommen können. Auch darauf geht dieser Fachbeitrag nicht weiterführend ein.

2 Eigenschaften keramischer Werkstoffe

Keramische Werkstoffe haben im Vergleich zu Metallen und Kunststoffen einige herausragende Eigenschaften, mit denen sie sich von anderen Werkstoffgruppen abheben (Bild 2) [4].

Somit wird deutlich, welche Belastungsfälle in der konkreten Anwendung den Einsatz von Keramiken geradezu herausfordern:

- Wenn steife und harte Bauteile erforderlich sind, können Keramiken zum Einsatz kommen. Keramiken sind nicht duktil, bleibende Verformungen sind ausgeschlossen.
- Sollten in der Anwendung – auch kurzzeitig – Temperaturen von mehr als ca. 400 °C auftreten, müssen Keramiken eingesetzt werden. Auch Temperaturen von mehr als 1000 °C verkraften die meisten Keramikwerkstoffe mühelos.
- Werden die Bauteile in korrosiven Umgebungen verwendet, so spielen hier die Keramiken ihre exzellente Korrosionsbeständigkeit aus.
- Herausragend ist die Verschleißfestigkeit keramischer Werkstoffe, die sich aus einer Kombination von Härte, Festigkeit, geringer Duktilität, guter Hochtemperaturfestigkeit und guter Korrosionsbeständigkeit ergeben. Daher basieren viele Schleifmittel auf keramischen Werkstoffen (Korund ⟶ Al_2O_3, Carborundum/Karborund ⟶ SiC). Viele Keramiken lassen sich daher im gebrannten Zustand nur noch mit Diamantwerkzeugen bearbeiten.
- Durch Keramiken lässt sich gegenüber Metallen Gewicht sparen – Kunststoffe besitzen allerdings immer noch eine geringere Dichte als Keramiken. Auch bei Anwendungen, bei denen es darum geht, die Massenträgheit zu verringern, kann der Einsatz von Keramiken eine Lösungsmöglichkeit sein.
- Typischerweise sind Keramiken als elektrischer Isolator bekannt, bei einigen Keramikwerkstoffen lassen sich aber auch gezielt elektrische Leitfähigkeiten einstellen. Hieraus lassen sich sicherlich neue Lösungsansätze ableiten.
- Je nach Anforderungsprofil stehen keramische Werkstoffe mit hoher Wärmeleitfähigkeit oder niedriger Wärmeleitfähigkeit zur Wahl. Durch Einstellen einer gezielten Porosität lässt sich die Wärmeleitfähigkeit noch weiter senken als im dichten Vollmaterial.

Die Wirtschaftlichkeit bei der Verwendung keramischer Bauteile darf natürlich nicht außen vorgelassen werden. Werden die reinen Bauteilkosten betrachtet, so schneiden Keramiken nicht besonders gut ab, werden aber die Gesamtlebensdauer und die Entsorgungskosten betrachtet, so kann sich ein Einsatz von Keramik durchaus wirtschaftlich rechtfertigen: Oft haben keramische Bauteile eine deutlich längere Lebensdauer als die gleichen Bauteile aus anderen Werkstoffen – Stichworte: Korrosionsbeständigkeit, Härte, Verschleißbeständigkeit etc.

Lassen sich Metalle oder Kunststoffe allerdings auf Grund des Anforderungsprofils (z. B.: Einsatztemperatur, Festigkeits-/Steifigkeitsanforderungen, Anforderungen an die Korrosionsbeständigkeit) erst gar nicht einsetzen, so kommen nur keramische Werkstoffe als Alternative in Frage. Erfüllen Metalle oder Kunststoffe das Anforderungsprofil ebenfalls, so sind diese in fast allen Fällen die wirtschaftlichste Lösung; Keramiken sind – konstruktiv richtig eingesetzt – die Problemlöser bei anspruchsvollen Verwendungszwecken.

3 Werkstoffe und Eigenschaften

Je nach Anwendungsgebiet kommen verschiedene Werkstoffe bzw. Werkstoffgruppen zum Einsatz. Keramische Werkstoffe werden dabei oft nach ihrer chemischen und mineralogischen Zusammensetzung in Gruppen unterteilt. Allerdings deckt diese Einteilung nicht alle in der Medizintechnik gebräuchlichen keramischen Werkstoffe ab.

3.1 Überblick

Allgemein üblich ist dabei meist eine Einteilung in drei Gruppen:

- Silikatkeramiken [5]: Sie sind die ältesten aller Keramiken und leiten sich ursprünglich von den natürlichen Rohstoffen, wie Tonen/Kaolinen, Feldspäten, Speckstein und anderen natürlichen Rohstoffen ab. Allen gemeinsam ist, dass die Mineralphasen der Rohstoffe allesamt Silikatgruppen enthalten. Neben klassischen Anwendungen im Bereich von Geschirr, Sanitärkeramiken, Ziegeln/Dachziegeln, etc. haben sich aus dieser Gruppe auch technische Keramiken herausgebildet, die im Wesentlichen aus den keramischen Werkstoffen Porzellan, Steatit, Cordierit und Mullit bestehen.
- Oxidkeramiken [6]: Dabei handelt es sich um vorwiegend aus einphasigen Metalloxiden bestehenden Werkstoffen. Sie basieren nahezu ausschließlich auf synthetischen Rohstoffen. Die wichtigsten Vertreter dieser Gruppe sind Aluminiumoxid und Zirkonoxid sowie deren Mischungen. Weitere Oxidkeramiken werden hier nicht betrachtet.
- Nichtoxidkeramiken [7]: Für die Herstellung dieser Werkstoffe werden ausschließlich synthetische Rohstoffe verwendet. Zu

dieser Gruppe gehören die Carbide und Nitride, weiterhin die Boride, Silicide und Fluoride. Die bedeutendsten Vertreter sind Siliciumcarbid und Siliziumnitrid, auf die weiteren Mitglieder dieser Werkstoffgruppe wird hier nicht eingegangen.

Außerhalb dieser drei traditionellen keramischen Gruppen steht die in der Medizintechnik bedeutsame Gruppe der Calciumphosphate bzw. im Speziellen Hydroxylapatite, die als Knochenersatzmaterial dienen und diesen sehr ähnlich sind. Nach der Implantation im Körper baut es sich langsam ab und wird durch Knochenmaterial ersetzt. Eine weitere Anwendung von Keramiken in der Medizintechnik sind keramische Beschichtungen. Hier kommen insbesondere folgende Verfahren zum Einsatz:

- APS: Atmosphärisches Plasmaspritzen;
- HVOF: Hochgeschwindigkeits-Flammspitzen;
- CVD: Chemical Vapour Deposition (Chemische Gasphasenabscheidetechnik);
- PVD: Physical Vapour Depositon (Physikalische Gasphasenabscheidung [8]).

Mit den Verfahren APS und HVOF lassen sich dickere keramische Schichten im Bereich von 50–250 µm auftragen (weitere Details zu APS und HVOF unter [9]), mittels PVD und CVD dünne Schichten im Bereich von einigen Nanometer bis Mikrometern.

Im Folgenden wird nun auf die einzelnen Werkstoffgruppen Silikatkeramik, Oxidkeramik, Nichtoxidkeramik sowie keramische Beschichtungen weiter eingegangen.

3.1.1 Silikatkeramiken

Die Gruppe der silikatkeramischen Werkstoffe wurde bereits sehr früh – erstmals 1940 – für elektrotechnische Anwendungen in der damaligen DIN 40685 genormt. Heute gültig ist die darauf aufbauende DIN EN 60672/IEC 672/VDE 0335 [10]. Aus der Werkstoffgruppe der elektrotechnischen Isolierstoffe finden Steatit-Werkstoffe, seltener auch Cordierit-, Mullit-, und Aluminiumoxid-Werkstoffe in der Medizintechnik Verwendung, nicht aber in Gebieten, die eine Biokompatibilität erfordern. Vermutlich wären die meisten dieser Werkstoffe auch biokompatibel, aufgrund fehlender Nachfrage wurde bisher nicht auf diese Anforderung hin getestet.

Streng genommen gehören die Aluminiumoxidwerkstoffe dieser Normen in die Gruppe der Oxidkeramiken, werden hier aber mit den Silikatkeramiken verglichen, da sie in der Norm für elektrisch Isolationsstoffe mit aufgeführt sind [10]. Typische Anwendungen dienen der elektrischen und/oder thermischen Isolation im Innern von Geräten und Baugruppen. In Bild 3 sind die Biegefestigkeiten verschiedener Werkstoffgruppen angegeben, dabei wurden meist mehrere Einzelwerkstoffe einer Gruppe zusammengefasst. Die Spanne gibt die Mindestfestigkeiten der Einzelwerkstoffe nach DIN EN 60672 an.

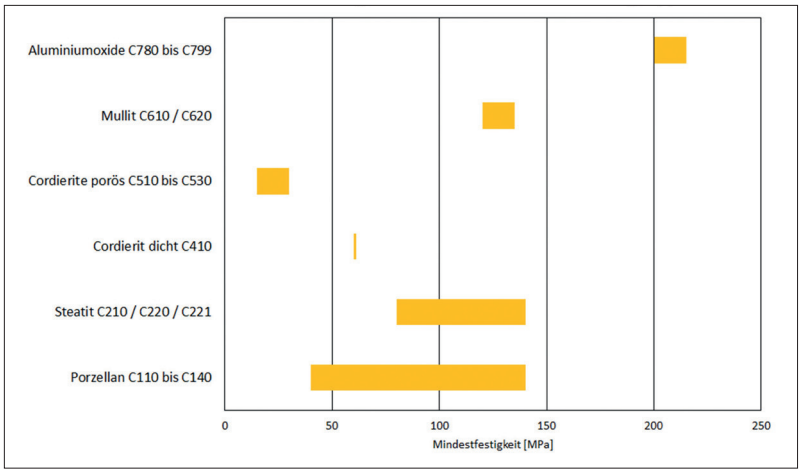


Bild 3 Mindestfestigkeiten nach DIN EN 60672 [10] für ausgewählte Werkstoffgruppen keramischer Isolationswerkstoffe

Für elektrische Isolationswerkstoffe sind insbesondere die elektrischen Durchschlagsfestigkeit (Bild 4) sowie auch die Wärmeleitfähigkeiten (Bild 5) von Interesse.

Gerade die Spannbreite der Wärmeleitfähigkeitswerte ist sehr groß, es gelingt somit meist einen passenden Werkstoff für jede Anwendung zu finden.

3.1.2 Oxidkeramiken

Der wichtigste Vertreter der Oxidkeramiken ist das Aluminiumoxid. Auch wenn konventionelle Aluminiumoxide keine Spitzenwerte in den mechanischen Eigenschaften ausweisen, so spielen sie doch eine sehr große Rolle, denn sie kennzeichnet ein ausgezeichnetes Kosten-Nutzen-Verhältnis. Dies liegt in den „relativ" preisgünstigen Rohstoffen und den einfachen Sinterverfahren an Luft begründet.

Es können für viele Aluminiumoxid-Werkstoffe die erforderlichen Rohstoffe aus den massenhaft gewonnenen Aluminiumerzen (Bauxit) abgezweigt werden. Durch den Einsatz hochreiner und sehr feinkörniger synthetisch hergestellter Rohstoffe lassen

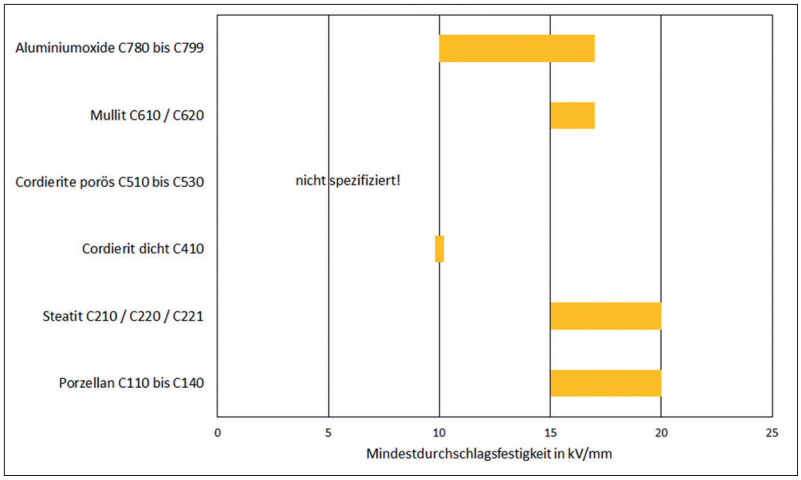


Bild 4 Mindestdurchschlagsfestigkeit nach DIN EN 60672 [10] für ausgewählte Werkstoffgruppen keramischer Isolationswerkstoffe

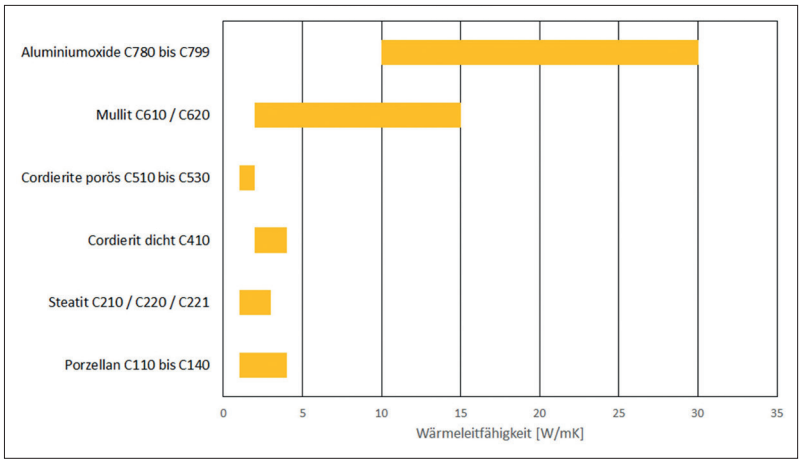


Bild 5 Spannweite der Wärmeleitfähigkeiten nach DIN EN 60672 [10] für ausgewählte Werkstoffgruppen keramischer Isolationswerkstoffe

sich hochwertige Werkstoffe entwickeln, die beispielsweise als Gelenkimplantate Verwendung finden. Gegenüber den Silikatkeramiken setzt sich Aluminiumoxid durch die hohe Härte, den hohen Schmelzpunkt (2050 °C) und gute Korrosionsbeständigkeit ab; die Durchschlagsfestigkeit des Aluminiumoxid wird allerdings auch von vielen Silikatkeramiken erreicht [11] und zum Teil auch übertroffen.

Aluminiumoxid-Werkstoffe werden neben den erwähnten Anwendungen als Isolator auch oft in metallisierter Ausführung und verlötet mit Metallbauteilen als Röntgenröhren, vakuumdichte Durchführungen etc. einsetzt. Ebenso kommen Aluminiumoxid-Werkstoffe als Isolationswerkstoffe für die Herstellung von Durchführungen in Herzschrittmachern bzw. implantierten Defibrillatoren zum Einsatz. Gelegentlich erfolgt auch eine Verwendung in endoskopischen Instrumenten, wenn keine sehr hohen mechanischen Belastungen auftreten.

Als beispielhafte Werkstoffe für Gelenkersatz seien Biolox forte® (Ceramtec) und Bionite® (Mathys AG) genannt.

Neben dem Aluminiumoxid mit einer mehr als 100-jährigen Geschichte in der Keramikfertigung, wurden erste Berichte über umwandlungsverstärkte Zirkonoxid-Werkstoffe 1965 veröffentlicht. 1975 machte eine Publikation diese Werkstoffe und ihre hohen mechanischen Festigkeiten einer breiteren Öffentlichkeit bekannt [12].

Teilstabilisierte Zirkonoxid-Werkstoffe beziehen ihre hohen Festigkeiten aus einer teilweisen Stabilisierung der Hochtemperaturphase. Dabei sind zwei Varianten zu unterscheiden: Bei den teilstabilisierten (PSZ – partially stabilised zirconia) Typen wird CaO oder MgO zugesetzt und einer speziellen Wärmebehandlung unterzogen, durch die tetragonale Ausscheidungen innerhalb des durch CaO oder MgO kubisch stabilisierten Kristalles erzeugt werden. Wichtig ist: Es wird nur ein Teil der Kristalle durch den Zusatz stabilisiert. In einem weiteren Ansatz werden durch Zusatz von Y_2O_3 oder seltener CeO_2 ein Teil der Kristalle in der tetragonalen Phase bis zu Raumtemperatur stabilisiert Diese Werkstoffe werden als TZP (tetragonal zirconia polycrystal) bezeichnet. Sie erreichen im Vergleich zu den teilstabilisierten (PSZ) Typen noch höhere Festigkeiten, wobei die CeO_2-stabilisierten Typen insbesondere durch ihre hohe Risszähigkeit hervorstechen (Bild 6) [11]. Bei Zirkonoxid-Werkstoffen sind zu beachten:

- Für medizinische Anwendungen dürfen keine thermisch hergestellten Zirkonoxid-Rohstoffe verwendet werden, da sie zu hohe radioaktive Verunreinigungen enthalten können. Chemisch gefällte Zirkonoxid-Rohstoffe halten aber die Grenzwerte für medizinische Anwendungen ein.
- Bei Y-TZP kann die tetragonale Phase unter Einfluss von Feuchtigkeit bei Temperaturen zwischen 65–500 °C destabilisiert werden, was zu einem Festigkeitsverlust führt. Dem kann durch einen Zusatz einer geringen Menge an Al_2O_3 entgegengewirkt werden. Die meisten aktuellen Werkstoffe verfügen bereits über diese Dotierung.

Zur Steigerung der Festigkeit können Zirkonoxid-Werkstoffe noch heißisostatisch nachverdichtet werden (bekannt als HIP-Prozess). Auf Grund der hohen Festigkeiten werden Zirkonoxid-Werkstoffe eingesetzt für:

- Implantate (seltener als Gelenkersatz, häufig im Dentalbereich, auch im Sichtbereich);
- Bauteile für die Endoskopie mit sehr hohen Festigkeitsanforderungen.

Herauszustellen ist, dass Zirkonoxidkeramiken auf Grund der hohen Rohstoffkosten, die durch die aufwendige chemische Aufbereitung hervorgerufen werden, deutlich teurer sind als viele Aluminiumoxid-Werkstoffe. Hochreine und sinteraktive extrem feinkörnige Aluminiumoxid-Rohstoffe erreichen allerdings zu hochwertigen Zirkonoxidrohstoffen vergleichbare Rohstoffpreise.

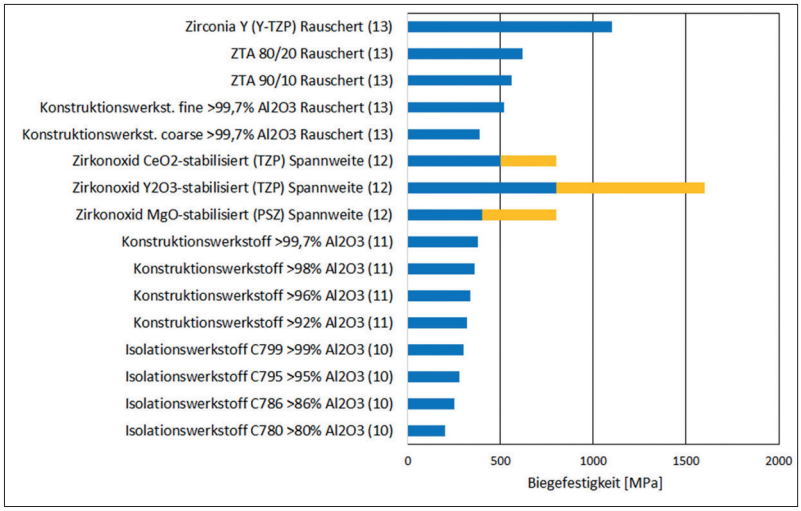


Bild 6 4-Punkt-Biegefestigkeiten ausgewählter Oxidkeramiken nach DIN EN 60672 [10] sowie weiterer Quellen [11–13]

Aufbauend auf Aluminiumoxid- und Zirkonoxidkeramiken, wie oben beschrieben, haben sich Mischwerkstoffe aus beiden Werkstoffen etabliert:

- ZTA: Zirconia toughened alumina: Zirkonoxid-verstärktes Aluminiumoxid;
- AZT: Alumina toughened zirconia: Aluminiumoxid-verstärktes Zirkonoxid.

ZTA-Werkstoffe können eine Alternative zu teilstabilisierten Zirkonoxid-Werkstoffen darstellen. Sie schließen in Bezug auf Festigkeit die Lücke zwischen den Aluminiumoxid-Werkstoffen sowie den Zirkonoxid-Werkstoffen und liegen in Hinblick auf die Rohstoffkosten näher an den preisgünstigeren Aluminiumoxid-Werkstoffen als an den kostenintensiveren Zirkonoxid-Werkstoffen. Durch Variation des Zirkonoxid-Zusatzes und der Korngröße im gesinterten Zustand können Festigkeit und Risszähigkeit beeinflusst werden. Ausführliche Informationen sind [13] zu entnehmen.

Im Bereich der Medizintechnik sind neben Gelenkersatz-Implantaten (ZTA-Typ, zusätzlich platelet-verstärkt: Biolox forte® (Ceramtec AG), CeraSurf-p® (Coorstek Medical) und ATZ-Typ: Ceramys® (Mathys AG) auch häufiger Anwendungen in bi- und monopolaren endoskopischen Instrumenten der HF-Chirurgie bekannt.

3.1.3 Nichtoxidkeramiken

Zu den verbreitetsten Nichtoxidkeramiken gehören die Siliziumnitrid-Werkstoffe, die Siliziumkarbid-Werkstoffe sowie in geringerem Umfang die Aluminiumnitrid-Werkstoffe. Letztere bestechen durch ihre sehr hohe Wärmeleitfähigkeit (140–180 W/m·K), werden aber als Konstruktionswerkstoff nicht eingesetzt, sondern oft als elektrisch isolierende Wärmesenke in elektronischen und elektrischen Anwendungen. Siliziumkarbid besticht durch eine hohe Härte (Schleifmittel unter dem Namen Carborundum, der größte Teil der SiC-Produktion geht in diese Anwendung), hohe Temperaturbeständigkeit und chemische Beständigkeit. Daher wird es auch als Werkstoff in Pumpen und Ventilen oder als Brennunterlage beim Sintern von Keramiken eingesetzt.

Allen Nichtoxidkeramiken ist gleich, dass sie nicht an Luftatmosphäre gesintert werden können und Schutzgas- oder gar Gasdrucköfen bis hin zu heißisostatischen Pressen erfordern. Solche aufwendigen Sinteraggregate sowie die Rohstoffkosten schlagen sich in den Kosten dieser Bauteile nieder. Siliziumnitrid-Werkstoffe sind meist unter Zusatz von 3–15 % Additiven dicht gesintert. Durch seine stengelförmigen Kristallite, die im gesinterten Zustand miteinander verzahnt sind, wird eine hohe Festigkeit und Risszähigkeit erreicht – ähnlich wie bei den Zirkonoxid-Werkstoffen.

Im Unterschied zu den Zirkonoxid-Werkstoffen sind dabei aber auf Grund der weitaus gröberen Gefüge keine messerscharfen Kanten oder gar Schneiden möglich. Die Wärmeleitfähigkeit von Siliziumnitrid ist um ein Zehnfaches höher als die von Zirkonoxid und damit vergleichbar mit Aluminiumoxid. Allerdings sind Siliziumnitrid-Werkstoffe grau bis schwarz, Zirkonoxid-Werkstoffe (sofern nicht gefärbt oder gehipt) weiß oder gelblich.

Anwendungsgebiete für Siliziumnitrid-Werkstoffe in der Medizintechnik sind vereinzelt Implantate (sog. „cages" als Bandscheibenersatz in der Wirbelsäulenchirurgie, vor allem in USA) sowie für Bauteile in endoskopischen Instrumenten (insbesondere wegen der grauen Farbe und der guten Beständigkeit in der Sterilisation).

3.1.4 Keramische Beschichtungen

Keramische Beschichtungen, aufgebracht als dickere Schichten durch atmosphärisches Plasmaspritzen (APS) oder Hochgeschwindigkeits-Flammspritzen (HVOF) basieren je nach Anwendung auf Aluminiumoxid bzw. Mischungen aus Aluminiumoxid und Titanoxid. Zusätze von Titanoxid steigern die Zähigkeit der Beschichtungen und färbt diese dunkler bis schwarz. Beschichtungen auf Basis von Zirkonoxid dienen der Wärmeisolation und Chromoxidschichten besitzen die beste Verschleißfestigkeit.

In der Medizintechnik bekannte Anwendungen sind:

- Stromisolierte Wälzlager für spezielle Einsatzzwecke;
- Abstandshalter und Isolierschichten bei endoskopischen Instrumenten der HF-Chirurgie. Durch spezielle Maskierungstechniken lassen sich punktförmige oder flächige Geometrien in einer definierten Schichtdicke erzeugen.

4 Zusammenfassung

Keramische Werkstoffe kommen auf Grund ihrer adäquaten Eigenschaften in vielerlei Hinsicht in der Medizintechnik zum Einsatz. Nicht nur die auffälligen und populären Implantate (beispielsweise: Dental und Gelenkersatz) sind von Bedeutung, sondern auch in vielen anderen Anwendungen sind keramische Werkstoffe unverzichtbar: Zur Isolation in endoskopischen Instrumenten der HF-Chirurgie, in Röntgenröhren, Durchführungen und Isolatoren sowie vielen anderen – oft wenig offensichtlichen – Einsatzbereichen.

Literatur

[1] NN: Gesetz zur Durchführung unionsrechtlicher Vorschriften betreffend Medizinprodukte (Medizinprodukterecht-Durchführungsgesetz – MPDG). Berlin 2020

[2] NN: Verordnung (EU) 2017/745 des Europäischen Parlaments und des Rates. Brüssel, 2017

[3] Farkas, R.; et al.: Situation der Medizintechnik in Deutschland im Internationalen Vergleich, Studie im Auftrag des BMBF. Aachen, Frankfurt 2005

[4] Lenkel, I.; Wiech, U.: Vom Werkstoff zum Bauteil – Keramische Werkstoffe im Vergleich. In: Technische Keramik in der Praxis – Seminar 2013. Selb 2013, 24–67

[5] Kollenberg, W.: Keramische Werkstoffe. in: Technische Keramik – Grundlagen, Werkstoffe, Verfahrenstechnik. Essen 2009, 160–162

[6] Kollenberg, W.: Oxidische Technische Keramik. In: Technische Keramik – Grundlagen, Werkstoffe, Verfahrenstechnik. Essen 2009, 197 ff.

[7] Kollenberg, W.: Nichtoxidische Technische Keramik. In: Technische Keramik – Grundlagen, Werkstoffe, Verfahrenstechnik. Essen 2009, 272 ff.

[8] NN: DIN EN 60672 Teil 1–3 Keramik- und Glasisolierstoffe. Berlin 1996

[9] Hoppert, H.: Konventionelle Aluminiumoxid-Werkstoffe. In: Technische Keramik – Grundlagen, Eigenschaften, Verfahrenstechnik. Essen 2009, 198 ff.

[10] Nikolay, D.: Zirconiumoxid. In: Technische Keramik – Grundlagen, Werkstoffe, Verfahrenstechnik. Essen 2009, 231 ff.

[11] Prehn, V.: One plus one equals three? Alumina plus zirconia equals ZTA. Bd. 8, Nr. 1, 2020, 26 ff.

[12] Schneider, G.; Telle, R.: Zirconiumdioxid. in: Keramik. Berlin, Heidelberg 2007, 830

[13] Prehn, V.; et al.: One plus one equals three? Alumina plus zirconia equals ZTA. Ceramic Applications **8** (2020) [1] 26–31