



BIO- UND MEDIZINTECHNIK

Projektberichte

- 82 Bio-Nanotechnologie-Anwendungslabor (BNAL) in Leipzig
- 84 Topisch UV-Licht erzeugende Keramiken zur Beseitigung von Biofilmen und Fouling
- 86 Kristallisationsverhalten von Lithiumdisilicat-Verblendkeramik
- 87 Simulationsgestützte Bestimmung der Biomechanik am menschlichen Auge

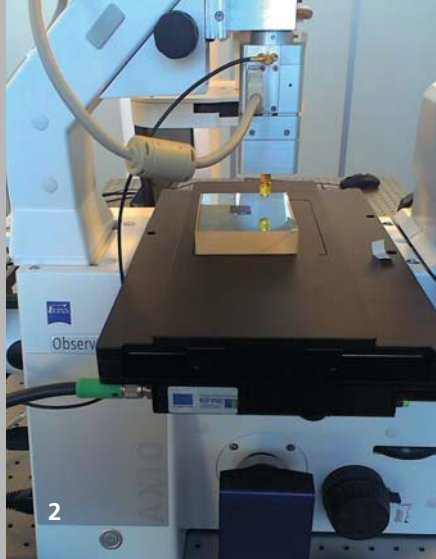
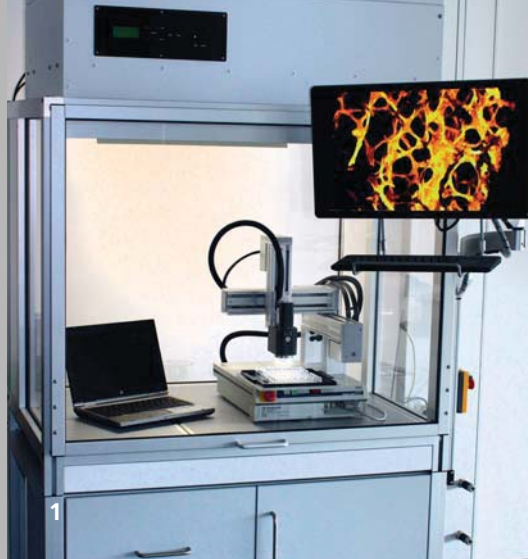
Im Geschäftsfeld »Bio- und Medizintechnik« bietet das Fraunhofer IKTS keramische Werkstoffe, Komponenten und Systeme für die Dentaltechnik, Endoprothetik sowie die biomedizinische Diagnostik und Therapie.

Die umfangreiche Erfahrung mit keramischen Werkstoffen ist der Grundstein, um die Produktentwicklung vom Rohstoff bis zum kompletten medizintechnischen Gerät unterstützen zu können. Qualitäts-, Kosten- und regulatorische Anforderungen sind zentraler Fokus der Arbeiten am Fraunhofer IKTS und werden durch eine hervorragende technische Infrastruktur mit zertifizierten Laboren sichergestellt. Dabei bestehen langjährige Kooperationen sowohl in der Bearbeitung von kundenspezifischen Aufgabenstellungen als auch im Rahmen von Gutachtertätigkeiten.

Das Fraunhofer IKTS ist zertifiziert nach dem Medizinproduktegesetz für die Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der biokeramischen Werkstoffe und Komponenten sowie der Herstellung von Halbfabrikaten für die Medizintechnik. Diese werden vorwiegend in der Dentaltechnik und Endoprothetik eingesetzt, insbesondere als Knochenersatzmaterial sowie in biokeramischen Oberflächen- und Formkörperdesigns. Auf Basis kommerziell verfügbarer Materialien werden neue keramische Werkstoffe und Komponenten mit verbesserten und modifizierten Eigenschaften entwickelt. Dabei nutzen die Wissenschaftler Schäumungs-, Abform- und Schlickergusstechnologien, Plasmabeschichtungs- und Sol-Gel-Verfahren sowie innovative Verfahren wie die Additive Fertigung.

Einen weiteren Schwerpunkt bilden Verfahren der Zell- und Gewebediagnostik, die Aufschluss über das Verhalten von Zellen im Körper und gegenüber Fremdmaterialien geben und die so zur Diagnose sowie Behandlung schwerwiegender Krankheiten beitragen. Grundlage dafür ist ein breites Portfolio physikalischer Charakterisierungsverfahren, ergänzt um eine umfassende Kompetenz im Bereich bildgebender Methoden sowie der Verarbeitung großer Datenmengen. Im Fokus stehen dabei Verfahren, Systeme und Instrumente für die Stimulation und das Monitoring von Zellen und Geweben sowie für die Separation, Detektion und Suppression von mikrobiellen Organismen und Toxinen. Darüber hinaus werden optische, akustische und bioelektrische Verfahren für die klinische Labordiagnostik und Point-of-Care-Diagnostik sowie für Home-Care-Applikationen qualifiziert. Das Dienstleistungsangebot reicht von der Konzeption, Verfahrens- und Softwareentwicklung über die Konstruktion und den Bau von Prototypen bis hin zur Unterstützung bei der Überführung in die Fertigungsphase.

Das Fraunhofer IKTS verfügt neben den biophysikalischen, biochemischen und biomechanischen Prüflaboren auch über zertifizierte Labore für die Zell- und Immunbiologie sowie für die Bewertung der Umwelt- und Gesundheitsrisiken von Nanopartikeln.



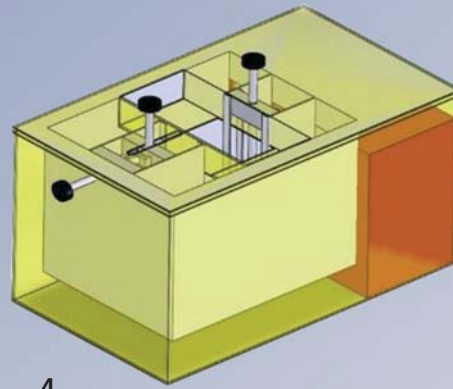
BIO-NANOTECHNOLOGIE-ANWENDUNGSLABOR (BNAL) IN LEIPZIG

Dr. Jörg Opitz, Dr. Kristin Alberti

Das Bio-Nanotechnologie-Anwendungslabor BNAL ist eine gemeinsame Initiative der Fraunhofer-Institute IKTS und IZI. Am Standort des Fraunhofer-Instituts für Zelltherapie und Immunologie IZI in Leipzig sollen die Ressourcen beider Institute in gemeinsamen Projekten verknüpft werden. Für die Geräteausstattung des Labors wurden 3 Mio. Euro aus dem Europäischen Fonds für Regionale Entwicklung (EFRE) bewilligt. Die Ausrüstung des BNAL ermöglicht erstmalig die konzentrierte Bearbeitung interdisziplinärer Themen – von der biologisch-medizinischen Grundlagenforschung über die Verfahrensentwicklung bis hin zur Entwicklung und Validierung neuester Technologien und Systemlösungen. Dabei fungiert die labor- und verfahrenstechnische Einheit zukünftig als Basis für Forschungs- und Entwicklungskooperationen mit international führenden Unternehmen oder Forschungseinrichtungen. Durch die Kombination aus hochmoderner Geräteausstattung und fachlicher Kompetenz zweier Fraunhofer-Institute ist es möglich, neue Kontakte gemeinsam anzusprechen und für bestehende Kontakte neue Themenfelder zu erschließen.

Das Fraunhofer IKTS nutzt die Kooperation, um eigene Analysemethoden und Messgeräte an aktuelle Fragestellungen angepasst weiterzuentwickeln und somit neue Anwendungsmöglichkeiten und Technologiefelder zu erschließen. Im BNAL sollen biologische Fragestellungen mit folgenden innovativen Messmethoden bearbeitet werden:

1. Die Optische Kohärenztomographie (OCT) liefert hochaufgelöst räumliche Informationen aus dem Untersuchungsobjekt. Ein wesentlicher Aspekt der zellbiologischen Forschung ist die Charakterisierung von Zelloberflächen. Die geplanten Systeme zielen auf die strukturelle und chemische Analyse biofunktionalisierter Oberflächen. Zudem ermöglicht die plasmonische Nanosensorik das direkte Studium des zeitlichen Ablaufs von Prozessen an Zellmembranen. Beispiele für solche Prozesse sind die Aufnahme von Wirkstoffen aus Medikamentenfreisetzungssystemen, die Kopplung von Viren an die Zelle oder die Verfolgung der Zellteilung, z. B. zur Beurteilung von Teilungsraten.
2. Die wirbelstrombasierte Impedanzspektroskopie ermöglicht als berührungsloses Messverfahren die zeitlich aufgelöste und beliebig wiederholbare Messung eines Systems (z. B. Antigene/Antikörper, Analyten). Da das Verfahren in kleinste Volumina übertragbar ist, lassen sich differenzierte Nachweise von Substanzen vornehmen, Messungen an Zellen zur medizinischen Diagnostik durchführen, therapeutische Substanzen entwickeln oder der zeitliche Verlauf von Polymerisationsprozessen organischer Substanzen untersuchen. Der Rückschluss auf Erkrankungen von biologischen Geweben durch Messung des Impedanzspektrums kann ein großes Anwendungsfeld im medizinischen Bereich eröffnen.
3. Die Ultraschall-Spektroskopie wird derzeit in der Analytik von fluiden Medien aber auch in der medizinischen Diagnostik, z. B. der Analyse von Zellgeweben und anderen biologischen Materialien, eingesetzt. Dort bewirken Änderungen der Mineralisierung oder der Molekülketten eine Veränderung der mechanischen Eigenschaften des Systems. Die dadurch veränderte Geschwindigkeit und Dämpfung einer Ultraschallwelle ermöglicht die quantitative Bestimmung elastomechanischer Eigenschaften von biologischen Geweben und großen organischen Molekülen. So können verschiedene Gewebearten identifiziert oder pathologische Zustände untersucht werden.



BIO- UND MEDIZINTECHNIK

4. Im BNAL steht ein Raster-Akusto-Mikroskop zur Verfügung, das neben der akustischen und optischen Mikroskopie künftig zusätzlich die photoakustische Mikroskopie integriert. Durch akustische oder photoakustische Anregung können räumliche Änderungen der mechanischen Impedanz innerhalb biologischer Materialien detektiert werden. Dies ermöglicht die Analyse der strukturellen Beschaffenheit einer Probe über viele Längenskalen. Zudem können Organismen, Organe und einzelne Zellen bis hin zu Zellbestandteilen (Organellen) abgebildet und charakterisiert werden. Diese multiakustische Mikroskopie ermöglicht tiefere Einblicke in die 3D-Struktur von biologischen Systemen auf sehr kleiner Ebene.
5. Seit kurzem gibt es technische Möglichkeiten, immunologische und mikrobiologische Inaktivierungen bzw. Sterilisationen miniaturisiert und in Verfahrensabläufe zu integrieren. Das BNAL beherbergt dafür eine Anlage zur Bestrahlung mit Elektronen sowie eine Dosimetrie-Einheit. Durch die Bestrahlung von organischem Material mit niederenergetischen Elektronen können Prozesse in diesem Material gezielt beeinflusst werden. So können z. B. Zellteilung und Reproduktionsrate gesteuert werden, die je nach Dosis bis zur Sterilisation einer mit Zellen besetzten Oberfläche reichen kann. Des Weiteren lassen sich verschiedene Eigenschaften von Zellen und zellulär besiedelten Oberflächen durch Bestrahlung hochpräzise manipulieren. Dazu gehören Rauigkeit, Reaktivität, der Zustand verschiedener chemischer Bindungen oder die Ladung. Diese Parameter spielen nicht nur für das Verhalten lebender Zellen eine wichtige Rolle, sondern insbesondere auch für die Wechselwirkung zwischen Substrat und Zelle.
6. Durch die Anwendung eines innovativen Messverfahrens zur Bestimmung der zeitaufgelösten Relaxation der Autofluoreszenz an biologischen Geweben oder Einzelzellen sollen künftig deren bisher noch nicht bzw. nicht genügend charakterisierte Eigenschaften analysiert werden. Dafür steht ein spezielles Fluoreszenzrelaxations-Spektrometer zur Verfügung. Durch die Beschreibung bisher nicht analysierbarer Eigenschaften eröffnet sich beispielsweise die Möglichkeit, medizinische oder pharmazeutische Fragestellungen zu beantworten.

Ergänzt werden diese Geräte durch technische Ausrüstung des Fraunhofer IZI, das seine Schwerpunkte im BNAL in die Bereiche Molekulardiagnostik, Durchflusszytometrie und Nanostrukturierungen legt.

Mit der Etablierung des BNAL werden ideale Voraussetzungen für eine optimale Zusammenführung und Nutzung des an den Fraunhofer-Instituten IZI und IKTS verfügbaren Know-hows geschaffen. Das Anwendungslabor wird sein Wirkungsfeld im Schnittpunkt der Fachgebiete Zellbiologie, Medizin, Biotechnologie, Nanotechnologie und Medizintechnik haben und stellt einen wichtigen Verknüpfungspunkt der Fachgebiete im Netzwerk der sächsischen Wissenschaftslandschaft dar. Die beteiligten Institute bieten ihre Kompetenzen im BNAL gebündelt potenziellen Auftraggebern an und schaffen durch die enge Zusammenarbeit einen Mehrwert, den jedes Institut für sich allein nicht generieren könnte.

Danksagung

Unser Dank für die Finanzierung der Geräteausstattung des BNAL gilt dem Europäischen Fonds für Regionale Entwicklung EFRE der Europäischen Union und dem Freistaat Sachsen.

- 1 OCT-Messgerät
(Quelle: Evonta-Technology GmbH).
- 2 Multi-Acousto-Scope
(Quelle: PVA TePla AG).
- 3 Bestrahlungssystem
(Quelle: COMET AG).
- 4 Impedanzanalyse-System
(Quelle: Suragus GmbH).
- 5 Dosimetrie-Einheit
(Quelle: TISAD GmbH & Co. KG).





TOPISCH UV-LICHT ERZEUGENDE KERAMIKEN ZUR BESEITIGUNG VON BIOFILMEN UND FOULING

Dr. Holger Lausch, Dr. Katja Wätzig, Dr. Isabel Kinski, Dr. Thomas Härtling

Biofilme auf medizinischen Implantaten, dentalen Restaurationen sowie das Fouling in der maritimen und Immobilienwirtschaft stellen noch immer eine große Herausforderung dar. Bei der Entwicklung neuer Gegenstrategien steht beim Antifouling vor allem die Giftfreiheit und damit die Umweltverträglichkeit sowie bei der Biofilmbekämpfung deren Zytotoxizität in den Grenzgeweben im Zentrum.

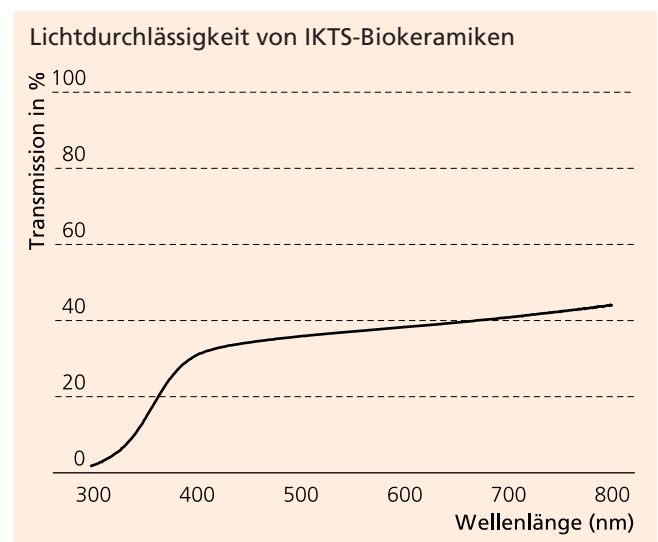
Die Entfernung von Fouling- und Biofilmschichten erfolgt in der Regel mechanisch. Die Effektivität hängt von der chemisch-toxischen oder biochemisch-zytotoxischen Vorbehandlung ab. Diese chemisch-toxischen und biochemisch-zytotoxischen Bekämpfungsstrategien stoßen bei Fouling und Biofilmen auf ausgefeilte Gegen- und Schutzstrategien vor allem an ihrer Oberfläche, deren Überwindung macht die am Markt etablierten Methoden ineffizient bzw. kostenintensiv. Dagegen stoßen die rein mechanischen Bekämpfungsstrategien nicht selten aufgrund der enormen Adhäsion des Biofilms auf feuchten Oberflächen mit Stufen, Rissen und Spalten an ihre Grenzen, wirken nur kurzfristig oder steigern den Aufwand. So stellt sich die Frage nach einer Alternative zur Bekämpfung von Fouling und Biofilmen durch die Oberfläche hindurch bis hin zur Adhäsionsebene.

Forschungsansatz

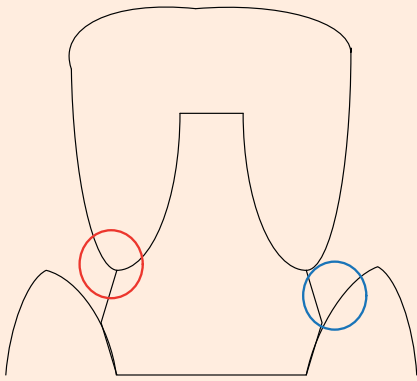
Da die Haftung des Biofilms durch starke chemische Bindungen an der Substratoberfläche wirkt und zugleich auch die Bindungen innerhalb der gesamten haftenden Schicht verändert bzw. stärkt, ist die Zerstörung der Adhäsion der Anlagerungen bzw. des Biofilms an der Oberfläche notwendig. Dies kann über eine UV-basierte Bestrahlung erfolgen, sodass die haftbildenden Biopolymere bzw. Biopolymerkomplexe photo-dissoziativ gespalten werden. Gelingt es, den Biofilm auf seiner ungeschützten Rückseite zur Oberfläche hin einer UVA- und/oder UVB-Strahlung auszusetzen, so kann dieser Effekt direkt genutzt werden. Für die Anwendung muss die Oberfläche

bzw. das Substrat für eine UV-Strahlung durchlässig sein. Die relevanten Zahnkeramiken, Polymerkomposite, Gläser u. Ä. sind jedoch im UV-Bereich nicht transparent.

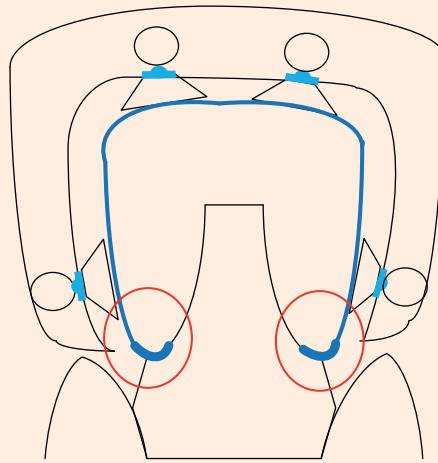
Um trotzdem eine UV-Wirkung auf der Grenzfläche zwischen Biofilm und Substrat zu generieren, muss die UV-Strahlung nur topisch und konditioniert erfolgen, um nicht auch gleichzeitig gesundes Zellgewebe zu schädigen. Zur Erzielung dieser Wirkung wird die Eigenschaft der Lichtdurchlässigkeit im sichtbaren Bereich (nicht UV!) genutzt. Nach Durchdringung des Materials z. B. mit blauer Lichtstrahlung wird mit deren Hilfe lokal definiert und topisch an der Haftseite des Biofilms UV-Licht erzeugt. Dies setzt eine lichtumwandelnde Schicht (UV-Leuchtschicht) auf der mit Biofilm besiedelten Substratoberfläche voraus, damit die ungeschützte Rückseite des Biofilms bestrahlt werden kann. Lichtdurchlässige Werkstoffe, die mit einer Leuchtschicht versehen werden können, stellen die dentalen Bio- und Verblendkeramiken des IKTS mit Transmissionsraten von 20 bis 60 % im sichtbaren Lichtspektrum dar (Diagramm unten).



3



4



BIO- UND MEDIZINTECHNIK

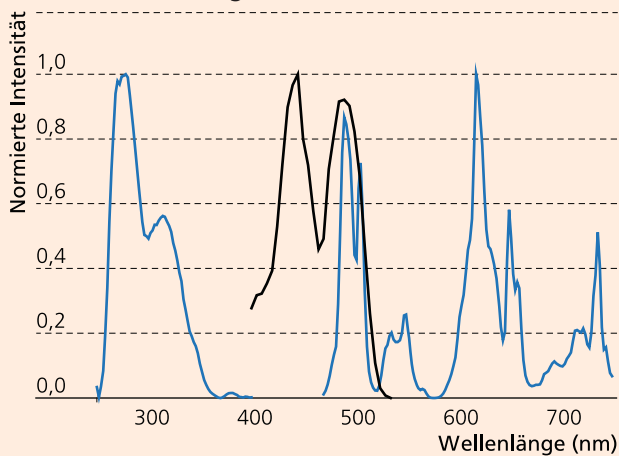
Wird diese lichtdurchlässige Keramik mit Leuchtschicht z. B. mit einem nicht zytotoxischen Laser im sichtbaren blauen Wellenlängenbereich von 450 oder 490 nm bestrahlt, emittiert diese an der Biofilmrückseite auch eine UVA/UVB-Strahlung. Die Art der Leuchtschicht und deren Dichte auf der Substratoberfläche sowie die Expositionsdauer erlauben so eine topisch dosierbare UV-Emission an der Haftungsgrenze des Biofilms ohne Beeinträchtigung der gesunden Gewebereiche.

entwickelten Verblend-/Kronen-/Brückenkeramik aufgrund ihrer vorteilhaften Lichtdurchlässigkeit (Transmissionsrate) im sichtbaren Strahlungsbereich besonders gute Voraussetzungen, wenn sie mit einer UV-Leuchtschicht gezielt an der Präparationsgrenze ausgestattet sind und mit intensivem blauem Licht z. B. mit Hilfe eines leuchtenden Kieferschutzes bestrahlt werden (Bild 4).

Leistungs- und Kooperationsangebot

- Maßgeschneiderte, applikationsspezifische Synthesen und Entwicklungen von keramischen Leuchtstoffen inklusive Charakterisierung
- Entwicklung von applikationsspezifischen Beschichtungen und entsprechenden Oberflächenstrukturen
- Gerätetechnische Umsetzung der Applikationsmöglichkeiten

Emissionsbanden bei Bestrahlung mit blauem Licht (450 nm Wellenlänge), Anregungsbanden nachgewiesen für UV-Strahlung



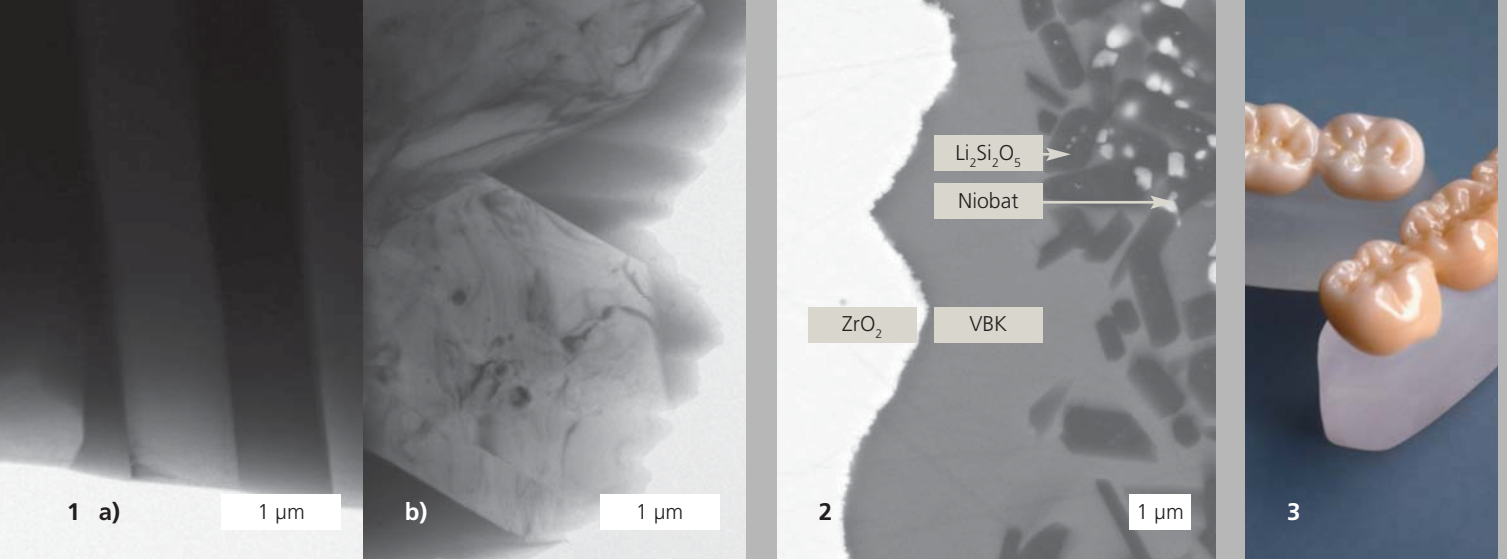
— angeregt bei $\lambda = 450$ nm — detektiert bei $\lambda = 280$ nm

Anwendung

Eine der ersten Anwendungen könnte der Schutz der Präparationsgrenze von dentalen Restaurationen sein. An der Präparationsgrenze bildet sich ein mehr oder weniger ausgeprägter Spaltbereich zwischen dem Dentin (Zahnhal) und der dentalen Restauration (Bild 3).

Dort finden Biofilme, insbesondere die auch Periimplantatit (Art der Parodontitis) verursachenden Keime, besonders attraktive Besiedlungsareale. Diese Areale sind mit den marktüblichen Gegenmitteln besonders schwer erreichbar und bilden Biofilmiseln, die immer wieder Biofilmkeime ausstreuen. Für die Anwendung des o. g. UV-Effekts bieten die im IKTS

- 1 Verblendkeramik mit Transmission im sichtbaren Licht.
- 2 Kronengerüste mit biologischem Design.
- 3 Präparationsgrenze (rot), Dentin-Gingiva-Bereich (blau).
- 4 Schematische Darstellung eines Kieferschutzes mit blauer Beleuchtung.



BIO- UND MEDIZINTECHNIK

KRISTALLISATIONSVERHALTEN VON LITHIUM-DISILICAT-VERBLENDKERAMIK

Dipl.-Chem. Martina Johannes, Dr. Roland Ehrh

Lithiumdisilicat-Glaskeramik als Verblendkeramik

Lithiumdisilicat-Glaskeramiken sind seit Langem bekannt. Die Verarbeitung erfolgt durch Fräsen bzw. Heißpressen aus Blanks. Für die entwickelte Verblendkeramik werden Pulver verwendet. Bei einer Temperatur von 900 °C kristallisiert Lithiumdisilicat (LDS) mit einer Geschwindigkeit von ca. 10 µm/s [1]. Wird gepulvertes Material eingesetzt, ist das entsprechende Korn in kürzester Zeit durchkristallisiert. Mit der Kristallisation ist eine Erhöhung der Viskosität verbunden, die die Reaktionsgeschwindigkeit sowohl mit dem benachbarten Korn als auch mit dem TZ3Y-Substrat reduziert. Um die sehr guten Eigenschaften der Lithiumdisilicatglaskeramik auch als Verblendkeramik (VBK) zu nutzen, ist es erforderlich, den Anteil von Kristall- und Glasphase zu steuern.

Verhältnis $\text{Li}_2\text{O}:\text{SiO}_2$ auf das Kristallisationsverhalten

Die TEM-Aufnahmen [2] (Bild 1a/b) zeigen die Veränderung der Morphologie vom Lithiumdisilicat in Abhängigkeit von dem Verhältnis $\text{Li}_2\text{O}:\text{SiO}_2$. Bezogen auf das Molverhältnis 1:2 vom LDS liegt in Bild 1a ein Überschuss an SiO_2 (1:2,6) und in Bild 1b ein Mangel an SiO_2 (1:1,4) vor. Der Überschuss an Li_2O führt zu schärferen Kristallkonturen, vielen Stapelfehlern und Einschlüssen im Kristall (1b). Für die Verblendkeramik ist die Probe mit dem höheren SiO_2 -Anteil, den weniger ausgeprägten Kristallgrenzen bzw. dem kontinuierlicheren Übergang zwischen Kristall- und Glasphase besser geeignet. In den Kristallen der Probe (1a) zeigen TEM-Aufnahmen keine Einschlüsse und nur wenige Stapelfehler.

Grenzflächen-, Oberflächeneffekte und Diffusionsprozesse

a) Grenzfläche Verblendkeramik zum Zirkonoxid ZrO_2 diffundiert aus der Gerüstkeramik in die Verblendkeramik. TOF-SIMS-Untersuchungen [2] zeigen, dass die Ionen der Komponenten Li_2O , Na_2O und Nb_2O_5 in die Zirkonoxidkeramik

diffundieren. Dies führt zu einer Verarmung an Li^+ -Ionen im Grenzbereich der Verblendkeramik und damit zur Herausbildung einer Glasphase. Das Diffusionsverhalten ermöglicht einen sehr intensiven Haftverbund zwischen dem Gerüst aus Yttrium-stabilisiertem Zirkonoxid und der Verblendkeramik.

b) Grenzfläche LDS-Kristall zur benachbarten Glas- bzw. Kristallphase

Für die entwickelte Verblendkeramik ist Nb_2O_5 ein wesentlicher Bestandteil. Mit der Kristallisation von LDS und den damit verbundenen Konzentrationsverschiebungen bilden sich Natriumniobatkristalle unmittelbar an den LDS-Kristallen. Mikro-Raman-Spektroskopie zeigt sowohl auf dem Niobatkristall als auch im amorphen Bereich einen intensiven Peak bei der Wellenzahl von 860 cm^{-1} . Die dem Niobat analogen Struktureinheiten begünstigen das Verschmelzen der gepulverten LDS-Glaskeramik und die Herausbildung einer glatten Oberfläche.

c) Oberfläche der Verblendkeramik und Applikation

Nach dem Temperprozess ist die Oberfläche der Verblendkeramik glatt, glasig und benötigt keinen Glanzbrand. Der entwickelte Verblendkeramiktyp befindet sich beim Projektpartner in der Phase der Markteinführung. Bild 3 zeigt eine dentale Restauration mit aufgesprüheter Verblendkeramik.

Quellen

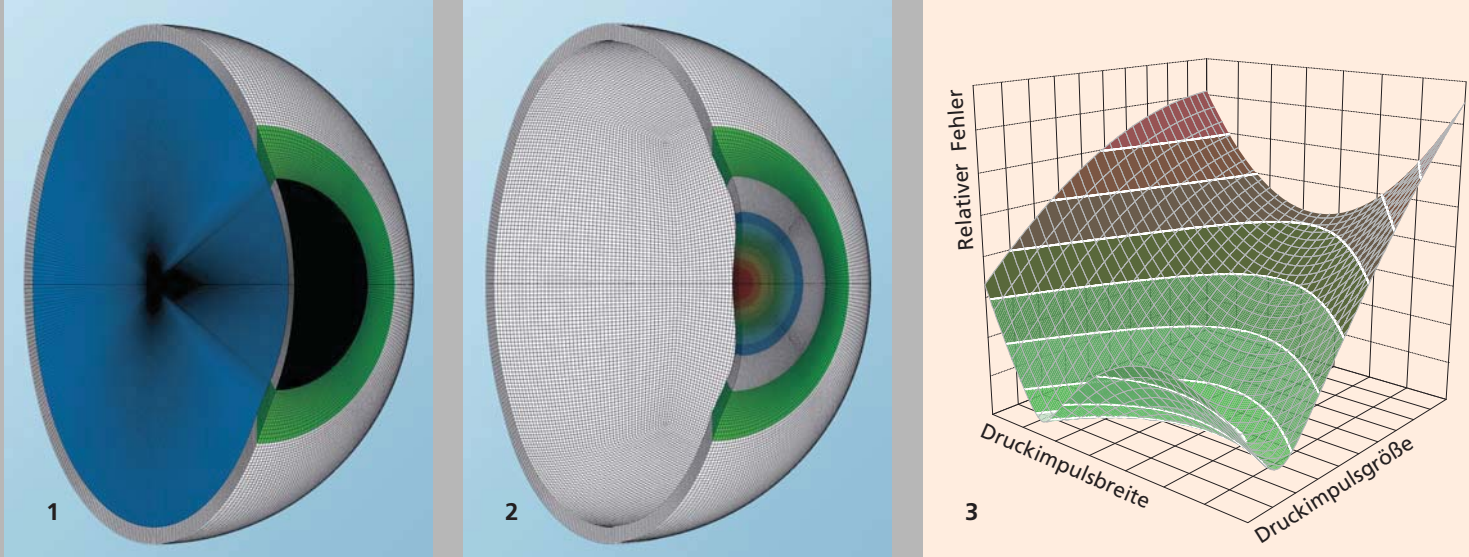
- [1] T. Honma and T. Komatsu, Journal of the Ceramic Society of Japan 116(12) 1314-1318 2
- [2] TEM/TOF-SIMS in Kooperation mit Fraunhofer IWM / Prof. Höche

1 Einfluss von $\text{Li}_2\text{O}:\text{SiO}_2$ auf die Kristallstruktur vom LDS (TEM).

2 Grenzfläche Verblendkeramik zum ZrO_2 -Gerüst (REM).

3 Zirkonoxid-Brücke mit aufgesprüheter Verblendkeramik.





SIMULATIONSGESTÜTZTE BESTIMMUNG DER BIOMECHANIK AM MENSCHLICHEN AUGE

Dipl.-Ing. Stefan Münch, Dr. Mike Röllig, Dr. Frank Schubert

Je früher man Krankheiten erkennt, desto früher kann man diese therapieren. Bei Augenerkrankungen wie dem Grünen Star sind bisherige Diagnosemöglichkeiten begrenzt. Hinzu kommt, dass man durch Behandlungen nur den Ist-Zustand erhalten und keine Verbesserung erzielen kann. Ähnlich verhält es sich beim Keratokonus, einer Ausdünnung und Verformung der Hornhaut. Um die Erkrankungen möglichst früh zu erkennen und damit viel Sehkraft erhalten zu können, bedarf es einer effektiven Methode.

Ursache oder Nebenwirkung verschiedener Augenerkrankungen sind Änderungen in den biomechanischen Eigenschaften der Augenbestandteile. Die Herausforderung besteht darin, diese Eigenschaften zerstörungsfrei zu bestimmen. Dafür hat die OCULUS Optikgeräte GmbH ein Gerät zur berührungslosen Messung des Augeninnendrucks entwickelt, ein sogenanntes Luftpulsstomometer. Dieses verformt mithilfe eines Luftstrahls die Augenhornhaut und zeichnet die Verformungen optisch auf. Anhand der Verformungen kann dann auf die biomechanischen Eigenschaften des Auges geschlossen werden, wenn man die funktionellen Zusammenhänge kennt.

Das Fraunhofer IKTS-MD, die OCULUS Optikgeräte GmbH und die Augenklinik des Universitätsklinikums Dresden arbeiten aktuell an einer Weiterentwicklung des Geräts. Ziel dieses Projekts ist die Ermittlung von Regressionsfunktionen zur inversen Bestimmung der Materialeigenschaften des Auges.

Ein numerisches Modell ermöglicht mit vergleichsweise wenig Aufwand viele Parametervariationen durchzuführen. In Kombination mit statistischen Verfahren wie der Signifikanzanalyse kann man so die Einflüsse verschiedener Parameter auf bestimmte Zielgrößen systematisch untersuchen. Ausgangspunkt für ein solches Modell war in diesem Fall die Bestimmung der Kennwerte des Luftimpulses, die durch die Instationarität des Impulses messtechnisch nicht erfassbar sind. Deshalb wurden Experimente an Kontaktlinsen durchgeführt. Diese Versuche

wurden anschließend unter Variation der Luftimpulskennwerte nachsimuliert, um die funktionellen Zusammenhänge zu erfassen. Das Diagramm zeigt den relativen Fehler zwischen dem Ergebnis der Funktionen und des Experiments in Abhängigkeit der Kennwerte. Im weiteren Projektverlauf wurde ein geometrisch detailliertes numerisches Modell des menschlichen Auges erstellt, das nun schrittweise an die Realität herangeführt wird. Aktuell beinhaltet es anisotrope Materialeigenschaften, die entsprechend dem realen Verlauf der Collagenfasern im Auge (= Faserverstärkung) ausgerichtet sind. Zudem besitzt das Modell einen Iterationsalgorithmus, der den geometrischen Ausgangszustand des Auges unter Innendruck mit hoher Genauigkeit einstellt. Zukünftig werden hyperelastische Materialmodelle und eine für Faserverbundwerkstoffe typische Abhängigkeit der Materialeigenschaften von der Beanspruchungsart (Zug/Druck) implementiert.

Obwohl das Modell noch nicht ausgereift ist, konnten neben gerätetechnischen bereits medizinischen Fragestellungen nachgegangen werden, beispielsweise Untersuchungen zum Einfluss des Glaskörpers und seiner Viskosität auf das Verformungsverhalten und den Innendruck. Weiterhin wurden vereinfachte Regressionsfunktionen zur Bestimmung der Biomechanik ermittelt. Zukünftig sollen Funktionen mit höherer Genauigkeit und zusätzlichen Aussagen folgen.

- 1 Numerisches Modell des menschlichen Auges.
- 2 Verformter Modellzustand (Fluid ausgeblendet).
- 3 Oberflächendarstellungen der relativen Abweichung über den Luftimpulskennwerten.