

Zusammenfassung

Nachdem das Projektteam der Universität München vor vier Jahren die Tiefziehverblendung in der QZ beschrieben hat, berichtet es nun über die erfolgreiche Umsetzung der zum Patent angemeldeten Verblendtechnologie. Beschrieben werden die Entwicklung der PEEK-Tiefziehfolie, eines Tiefziehgerätes und eines CAD-Softwaretools, die Auswertung der Tiefziehergebnisse sowie die Entwicklung und der Test eines entsprechenden Verbundkonzeptes. Im Ergebnis stellt sich eine mittlere Verbundfestigkeit von 8,7 MPa heraus.

Indizes

Tiefziehverblendung, Polyetheretherketon, Verblendtechnologie, Verbundfestigkeit, Verbundkonzept

Tiefziehverblendung aus Polyetheretherketon

Ergebnisse eines zweijährigen interdisziplinären Entwicklungsprojektes

Nina Lümekemann, Marlis Eichberger, Ralph Riquier, Norbert Schuhmann, Andreas Gesewsky, Bogna Stawarczyk

Bereits 2014 wurde die innovative Idee der Tiefziehverblendung als neue Möglichkeit zur kostengünstigen und reparierbaren Herstellung von zahntechnischen Restaurationen in der Quintessenz Zahntechnik (QZ) vorgestellt.³ Der Grundgedanke dahinter war, eine keramisch verblendete Krone oder eine vollanatomische Krone durch eine Tiefziehverblendung aus einem thermoplastischen Werkstoff zu ersetzen. Die Vorteile, die hierbei in Betracht gezogen wurden, waren, das schwächste Glied bei verblendeten Kronen- und Brückenrestorationen, nämlich die Verblendung, durch ein thermoplastisches Material zu ersetzen und somit ein Abplatzen (Chippen) der Verblendkeramik zu vermeiden. Darüber hinaus würde eine polymerbasierte Verblendung gewisse Dämpfungseigenschaften mit sich bringen, die in Bezug auf den Antagonisten und das Kiefergelenk von Vorteil sein könnten. Kaukräfte, die in der Regel impulsartig und ungedämpft während des Kauprozesses an den Zahnhalteapparat weitergeleitet werden, würden zum Teil abgefangen und gleichzeitig wäre der Antagonist gegen Abrasion geschützt.

Einleitung

Die Idee der Tiefziehverblendung wurde 2012/2013 von den Ideengebern Marlis Eichberger (Zahntechnikerin) und Josef Schweiger (Zahntechniker) als deutsches Patent (DE 10 2012 211 332.0) angemeldet und bietet der konventionellen Tiefziehtechnik durch Druckform- bzw. Vakuumtechnik einen neuen Anwendungsbereich. Zu den klassischen Indikationen der Tiefziehtechnik gehört beispielsweise die Herstellung von therapeutischen und kieferorthopädischen Schienen, die vor allem durch ihre Wirtschaftlichkeit punktet. Für diesen Indikationsbereich stehen eine Reihe thermoplastischer Tiefziehfolien in verschiedenen Schichtstärken und von unterschiedlichen Herstellern zur Verfügung. Eine damalige Untersuchung zur Gesamtstabilität von tiefziehverblendeten Kronen auf unterschiedlichen Gerüstmaterialien (Kobalt-Chrom, Zirkondioxid und Polyetheretherketone (PEEK) zeigte zwar keine Abhängigkeit der Bruchlastwerte von der verwendeten Tiefziehfolie³, jedoch war davon auszugehen, dass vor allem die mechanischen Eigenschaften der etablierten Tiefziehmaterialien den Anforderungen für den neuen Anwendungsbereich als Tiefziehverblendung nicht genügen würden.

Zu den definierten Anforderungen für die Tiefziehverblendung zählen hohe mechanische und thermische Eigenschaften, Tiefziehbarkeit, eine entsprechende Ästhetik sowie gute Verfärbungs-, und Abrasionsbeständigkeit. Um diesen Ansprüchen gerecht zu werden, war es notwendig, eine neue, tiefziehbare Folie zu entwickeln. Aber damit nicht genug, hinzu kamen noch eine entsprechende Anpassung bzw. Weiterentwicklung eines Tiefziehgerätes sowie die gesamte Prozessentwicklung.

Heute, knapp vier Jahre nach der Vorstellung der Tiefziehverblendung in der QZ³, können wir über die erfolgreiche Umsetzung der Verblendtechnologie berichten und einzelne Projektergebnisse vorstellen.

Die Entwicklung der neuen Verblendtechnologie mittels Tiefziehtechnik wurde im Rahmen eines zweijährigen, interdisziplinären Forschungs- und Entwicklungs- (FuE)-Kooperationsprojektes des Zentralen Innovationsprogramms Mittelstand (ZIM) (ZF4052001) umgesetzt. Die ZIM-Kooperation wurde von der AiF Projekt GmbH als Projektträger des Bundesministeriums für Wissenschaft und Energie (BMWi) gefördert. Allgemein haben ZIM-Kooperationen das Ziel, die Innovationskraft und Wettbewerbsfähigkeit mittelständischer Unternehmen nachhaltig zu stärken. Das ZIM ist prinzipiell themenoffen und fördert FuE-Vorhaben mittelständischer Unternehmen in Zusammenarbeit mit nicht wirtschaftlich tätigen Forschungseinrichtungen.¹

Das Projektteam zur Umsetzung der neuen Verblendtechnologie mittels Tiefziehtechnik setzte sich aus zwei mittelständischen Unternehmen und zwei Forschungseinrichtungen zusammen (Tab. 1). Das Projektziel war die Herstellung eines okklusal reduzierten

Tab. 1 Projektpartner mit Entwicklungskomponente und Aufgabenschwerpunkt im ZIM-Kooperationsprojekt.

| Projektpartner | Entwicklungskomponente/Aufgabenschwerpunkt |
|--|---|
| Pagoda Systems, Stuttgart | Entwicklung einer Software zur sequenziellen, okklusalen Reduktion des Zirkonoxidgerüsts |
| Dreve Dentamid, Unna | Entwicklung des Tiefziehgerätes zur Verarbeitung von PEEK-basierten Tiefziehfolien |
| Lehrstuhl für Medizintechnik, Technische Universität München (TUM) | Entwicklung einer Tiefziehfolie aus PEEK |
| Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik, Klinikum der Universität München (LMU) | Entwicklung eines zuverlässigen Verbundkonzeptes zwischen Zirkonoxidgerüst und PEEK-Tiefziehverblendung |

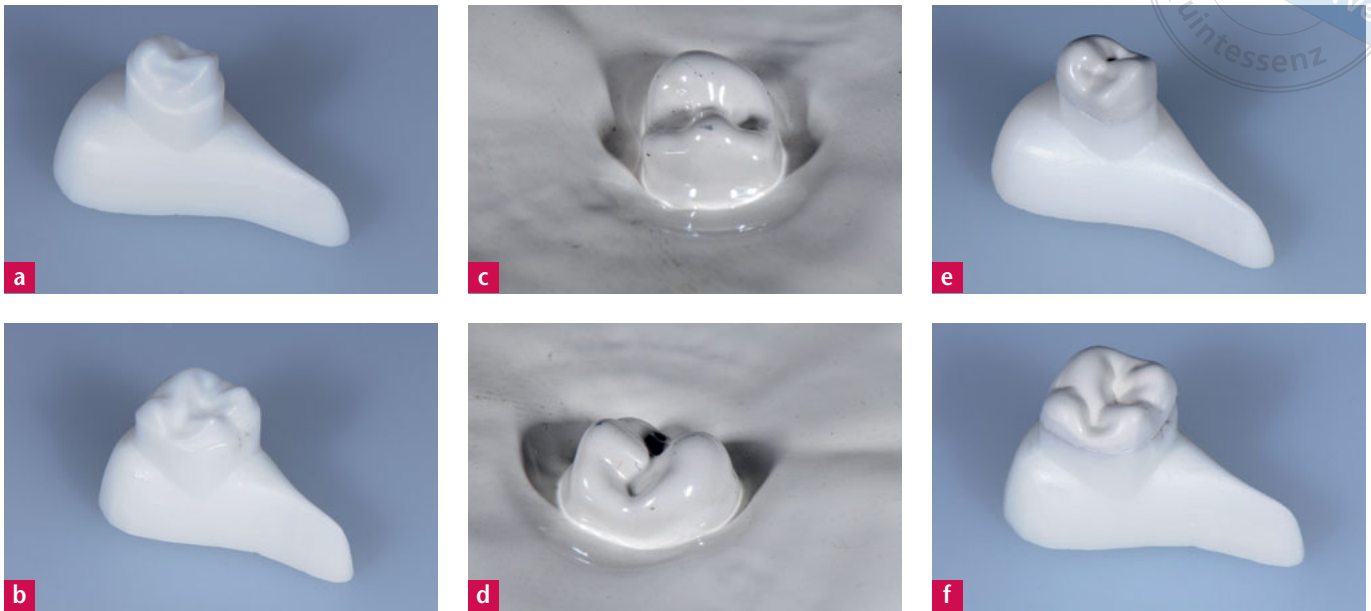


Abb. 1 Okklusal reduzierte Zirkonoxidgerüste: **a** Prämolare; **b** Molar mit Abformergebnissen aus einem Tiefziehversuch; **c** Prämolare; **d** Molar mit aufgepaster PEEK-Verblendung; **e** Prämolare; **f** Molar.

Zirkonoxidgerüsten, das mithilfe der Tiefziehtechnik mit dem biokompatiblen Hochleistungsthermoplasten Polyetheretherketon (PEEK) verblendet wird (Abb. 1).

PEEK wird bereits seit 2012 in unterschiedlichen Materialqualitäten (ungefüllt, gefüllt) und Farben (grau, weiß, dentin- und gingivafarben) zur Herstellung von herausnehmbarem und festsitzendem Zahnersatz angeboten und ist für seine herausragenden mechanischen und biokompatiblen Eigenschaften bekannt. Jedoch wird das Material bisher nur in Form von Pellets oder Granulat zum Verpressen oder in Form von Rohlingen zur frästechnischen Bearbeitung in der Zahnmedizin/technik angeboten und ist bislang nicht als Folie zur Verarbeitung mittels Tiefziehtechnik verfügbar. Aus diesem Grund war die Entwicklung der PEEK-Tiefziehfolie eine grundlegende Komponente in dem Projekt. Hergestellt wurde die PEEK-Tiefziehfolie am Lehrstuhl für Medizintechnik der Technischen Universität München (TUM).

Dazu wurde zunächst ein Spritzgusswerkzeug konstruiert und gefertigt, in dem zwei PEEK-Folien (Spritzlinge) gleichzeitig spritzgegossen werden können. Um eine gleichmäßige Oberfläche zu erhalten, verfügt das Werkzeug über zwei Auswerfer, die die spritzgegossenen Folien über die gesamte Fläche auswerfen. Die Schichtstärke der PEEK-Folie wurde innerhalb des Projektes auf 1,4 mm definiert, ist in dem Spritzgießwerkzeug jedoch über die Auswerfer in einem Größenbereich von 0,5 mm bis 4,0 mm variabel einstellbar. Um die Entstehung von Bindenähten zu vermeiden, wurde der Schmelzfluss mithilfe einer CAD-Software simuliert und ein besonderes Augenmerk auf die Gestaltung des Angussystems gelegt. Erste Spritzgießversuche wurden mit eingefärbtem Polyethylen gefahren, um das Ergebnis der Schmelzflussimulation und des Angussystems zu überprüfen (Abb. 2).

Entwicklung der PEEK-Tiefziehfolie



Abb. 2 Spritzgießversuch mit eingefärbtem Polyethylen.



Abb. 3 Spritzgegossene PEEK-Folien mit final entwickelter Rezeptur und 1,4 mm Schichtstärke.

Für die Inbetriebnahme des Spritzgusswerkzeugs mit PEEK muss das Werkzeug auf 200 °C temperiert werden, um ein langsames und gleichmäßiges Auskristallisieren der Polymerketten zu ermöglichen. Die Prozessparameter des Spritzgießens wurden stets der chemischen Zusammensetzung des PEEK-Compounds angepasst. Die chemische Zusammensetzung des Compounds wurde in Bezug auf die definierten Anforderungen an die Verblendung festgelegt und umfasste neben dem Hauptbestandteil PEEK definierte Anteile an Calciumcarbonat (CaCO₃) und ausgewählten Titandioxid (TiO₂)-Pigmenten. Zur Charakterisierung der Folie wurden die Martenshärte und die Farbe gemessen. Letztlich wurden zwei finale PEEK-Folien entwickelt, die durch die Anteile an CaCO₃ und TiO₂ weiß/beige-farben und opak waren. Die zwei PEEK-Folien unterscheiden sich durch das TiO₂-Pigment, das zu einer sichtbar unterschiedlichen Farbe führt (Abb. 3). Um die spritzgegossenen PEEK-Tiefziehfolien auf ihre Eignung als Medizinprodukt zu testen, wurden zusätzlich Biokompatibilitätstests durchgeführt. Die Folien konnten abschließend unter Berücksichtigung der gesamten Prozesskette als nicht zytotoxisch eingestuft werden.

Entwicklung des Tiefziehgerätes

Für die Verarbeitung der PEEK-Tiefziehfolie sollte ein Prototyp eines Tiefziehgerätes entwickelt werden, der auf den Schmelzbereich der entwickelten PEEK-Tiefziehfolie (T_m=334 °C von reinem PEEK⁸) ausgelegt ist und eine entsprechende Aufheiztemperatur ermöglicht. Um den Aufbau des Prototyps zu entwickeln, wurde zu Projektbeginn ein Funktionsmuster gebaut, das im Laufe des Projektes fortlaufend modifiziert und optimiert wurde.

Insgesamt wurden vier Versuchsaufbauten durchlaufen, bis der finale Prototyp definiert war. Bei den unterschiedlichen Versuchsaufbauten wurden diverse Probleme beobachtet, wie zum Beispiel ein Faltenwurf der PEEK-Folie, wenn Druckluft zugeführt wurde (Abb. 4b),



Abb. 4 Ergebnisse aus Tiefziehversuchen: **a** erfolgreiche Abformung des okklusal reduzierten Zirkonoxidgerüsts; **b** Fehlversuch mit Faltenwurf in der Folie durch Druckluftzufuhr.

und ein zu großer Abstand zwischen Heizelement und Folienaufnahme, weshalb die Folie nur unzureichend aufschmolz. Außerdem heizte sich die Folienaufnahme während eines einzelnen Tiefziehdurchlaufs so sehr auf, dass sie zunächst längere Zeit abkühlen musste, bevor eine neue Folie eingesetzt werden konnte. Der letzte Versuchsaufbau war weitestgehend optimiert, bestand jedoch aus einem teilautomatisierten Druckkolbengerät mit schwenkbarer Heizung, bei dem der Tiefziehprozess noch manuell ausgelöst werden musste, indem der automatische Druckkolben mit einer Zwei-Hand-Sicherung betätigt wurde.

Um den Anwender vor einer potenziellen Verbrennungsgefahr zu schützen, sollte der Prototyp eines Vollautomaten gebaut werden, bei dem die Prozessschritte „Aufwärmen“, „Plastifizierung der PEEK-Folie“, „Anformprozess“ und „Abkühlphase“ durch eine Elektronik gesteuert und kontrolliert werden. Damit der Anformprozess automatisch ausgelöst werden kann, wurde eine Lichtschranke unter der PEEK-Folie platziert. Sobald die PEEK-Folie ausreichend aufgeschmolzen ist, in einem gewissen Maße durchhängt und die Lichtschranke berührt, wird der Anformprozess ausgelöst und die aufgeschmolzene PEEK-Folie über das okklusal reduzierte Zirkonoxidgerüst gezogen.

Für die Gestaltung des okklusal reduzierten Zirkonoxidgerüsts war es notwendig, ein CAD-Software-Tool zu entwickeln. Dieses sollte als Systemkomponente in bestehende CAD/CAM-Systeme implementiert werden können und eine sequenzielle, okklusale Reduktion des Zirkonoxidgerüsts zulassen. Die sequenzielle Reduktion wurde in Abhängigkeit vom Tiefziehverhalten der PEEK-Tiefziehfolie entwickelt. Um den Algorithmus zu erarbeiten, der das Tiefziehverhalten der Folie wiedergibt und so auf die notwendige sequenzielle Reduktion schließen lässt, wurden mit der entwickelten PEEK-Folie diverse Tiefziehversuche in einem Funktionsmuster durchgeführt.

Für die Versuche wurden geometrisch vereinfachte Modelle aus Zirkonoxid hergestellt, über denen die PEEK-Folie tiefgezogen wurde. Die vereinfachten Modelle hatten die Form

Entwicklung eines
 CAD-Software-Tools

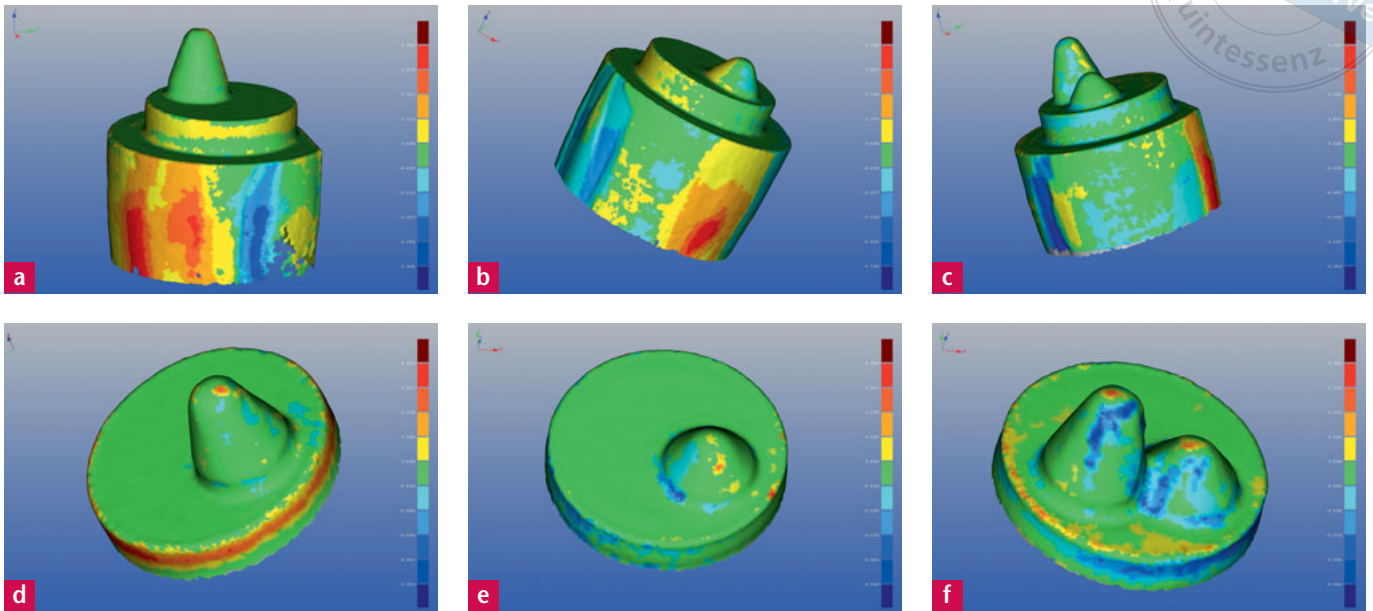


Abb. 5 Geometrisch vereinfachte Modelle für Tiefziehversuche, um das Tiefziehverhalten der PEEK-Folie zu analysieren: **a** großer Kegel; **b** kleiner Kegel; **c** kombinierte Kegel mit entsprechenden Tiefziehergebnissen auf **d** großem Kegel, **e** kleinem Kegel und **f** kombinierten Kegeln.

von einem kleinen und einem großen Kegel, die jeweils auf einem eigenen Stumpf platziert waren und einzeln tiefgezogen wurden (Abb. 5). Der hohe Kegel wurde in Anlehnung an eine hohe Höckerspitze konstruiert und sollte bewirken, dass die Tiefziehfolie extrem ausdünn. Der niedrigere Kegel sollte den Fall simulieren, dass die Folie zwar über eine Erhöhung gezogen, aber nicht allzu stark ausgedünnt wird. Ein weiteres Tiefziehmodell kombinierte den hohen und den niedrigen Kegel auf einem Stumpf in unmittelbarem Kontakt. Hierdurch sollten unterschiedlich hohe Höckerspitzen sowie die Fissur eines Zahnes simuliert werden. Die Testmodelle wurden jeweils einzeln mittig im Tiefziehgerät platziert und mit der PEEK-Folie tiefgezogen. Die tiefgezogenen Käppchen wurden dann aus den rundenförmigen PEEK-Tiefziehfolien herausgetrennt und in geringem Maße, hauptsächlich im Randbereich, auf dem Modell ausgearbeitet (Abb. 5).

Auswerten der Tiefziehergebnisse

Um die Tiefziehergebnisse auswerten zu können, wurden die einzelnen Tiefziehmodelle mithilfe eines Dentalscanners eingescannt. Anschließend wurden die tiefgezogenen Käppchen auf dem jeweiligen Modell repositioniert und wiederum ein Scan angefertigt. Durch Überlagerung der Scandaten (Tiefziehmodell und Tiefziehmodell mit mitgezogenem Käppchen jeweils einzeln) konnte die exakte Verformung der PEEK-Folie bestimmt werden. Diese Versuche wurden so lange wiederholt, bis ein reproduzierbares Tiefziehverhalten der Folie nachvollzogen und in einen Algorithmus übertragen werden konnte. Die Tiefziehversuche wurden jedoch nicht nur auf geometrisch vereinfachten Modellen, sondern auch auf klinisch relevanten Geometrien durchgeführt. Hierzu wurde die Zahnkrone eines Molaren und eines Prämolaren gleichmäßig okklusal reduziert, auf einem entsprechenden Stumpf konstruiert und anschließend tiefgezogen (Abb. 6). Anhand der definierten Prüfgeometrie

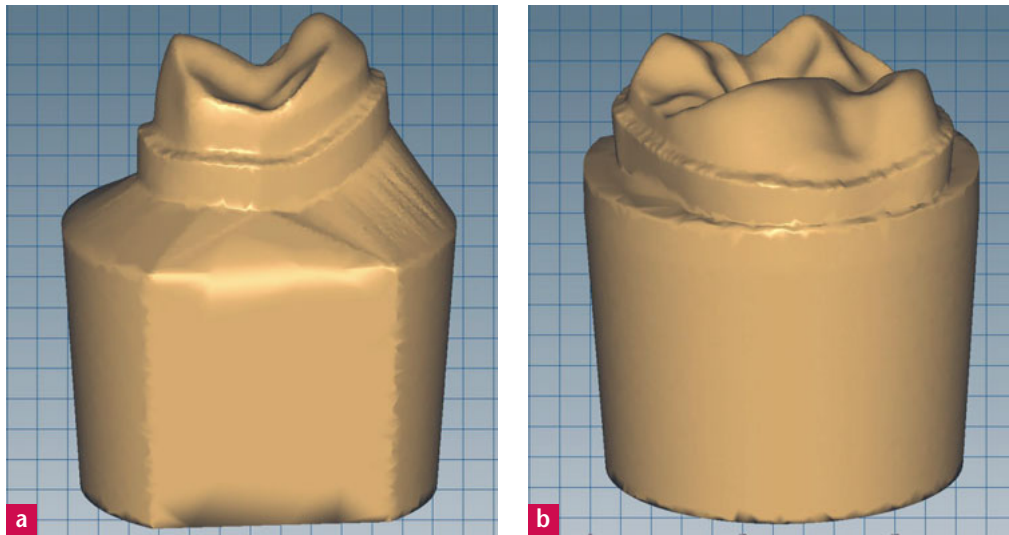


Abb. 6 Modelle mit klinisch relevanten Geometrien und okklusaler Reduktion auf definiertem Stumpf: **a** Prämolare; **b** Molar.

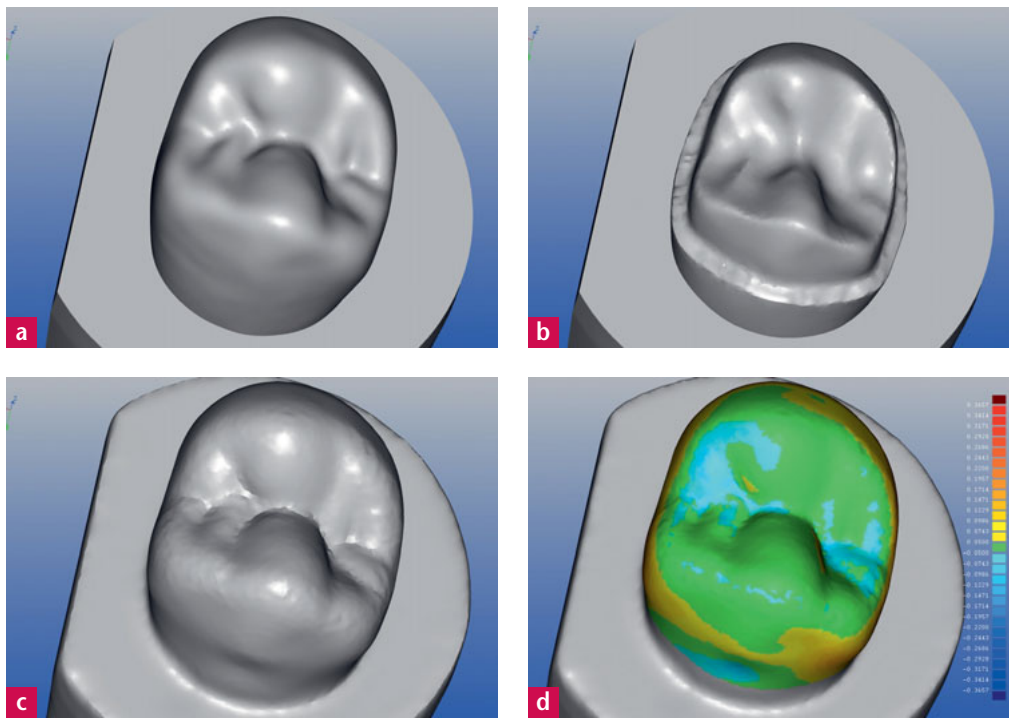


Abb. 7 Auswertung der Tiefziehversuche zur Entwicklung der Software für Prämolare: **a** CAD-Konstruktion der Kronenrestoration; **b** sequenzielle Reduzierung in Abhängigkeit vom analysierten Tiefziehverhalten; **c** Scan nach dem Tiefziehen; **d** Analyse der Abweichungen der tiefgezogenen Form im Vergleich zur Original-Kronenkonstruktion.

wurde die Dimensionierung der tiefgezogenen PEEK-Folien berechnet und das werkstoffseitige Tiefziehverhalten analysiert (Abb. 7). Ein extra programmierter Algorithmus verglich die einzelnen Tiefziehergebnisse in ihrer Dimensionierung in allen Bereichen des Prüfkörpers und berechnete hieraus ein mittleres Materialverhalten. Die ermittelten Werte ermöglichen so bei einer Offsetierung der reduzierten Außengeometrie der Prüfkörper eine Vorhersage über die Außengeometrie nach dem Tiefziehen. Dieses Materialverhalten reziprok angewandt ermöglicht nun, die Unterbaugeometrie zu berechnen, um eine vordefinierte Außengeometrie, z. B. Kronenkonstruktion, nach dem Tiefziehen zu erhalten.

Die Tiefziehversuche wurden nicht nur für die Entwicklung der Software, sondern auch für die Entwicklung und Optimierung der Funktionsmuster des Tiefziehgerätes genutzt.

Bei der Tiefziehtechnik muss das tiefziehende Material möglichst gleichmäßig erhitzt werden, bis die Schmelztemperatur erreicht ist. Nachdem der Tiefziehprozess ausgelöst wurde, kühlt sich das tiefgezogene Material schnell ab, wenn Druckluft einströmt. Da das Über- und Unterschreiten der Glasübergangstemperatur bei thermoplastischen Materialien ($T_g=143\text{ °C}$ von reinem PEEK⁹) einen erheblichen Einfluss auf die charakteristischen Eigenschaften haben kann, wurde der Tiefziehprozess in einer Untersuchung simuliert. Der Einfluss des Aufheizens/Abschreckens auf die optischen, mechanischen und thermodynamischen Eigenschaften wurde sowohl an ungefüllten als auch an gefüllten PEEK-Folien untersucht. Hier zeigte sich, dass das Aufheizen/Abschrecken – und damit der Tiefziehprozess – die untersuchten Parameter Transluzenz ($T\%$), Martenshärte (HM), Eindringmodul (E_{IT}), Glasübergangstemperatur (T_g), Schmelztemperatur (T_m) und Schmelzenthalpie (ΔH_f) signifikant beeinflusst. Am stärksten wurden die mechanischen Eigenschaften (HM und E_{IT}) beeinflusst.² Bei den gefüllten PEEK-Folien konnte jedoch kein Einfluss des Aufheizens/Abschreckens auf die Transluzenz beobachtet werden. Während die ungefüllten PEEK-Folien durch den aufeinanderfolgenden Temperatureinfluss nahezu transparent wurden, blieben die gefüllten PEEK-Folien opak und somit lichtundurchlässig. Diese Information war für die letzte Entwicklungskomponente von Bedeutung, bei der es um ein zuverlässiges Verbundkonzept geht zwischen dem okklusal reduzierten Zirkonoxidgerüst und der PEEK-basierten Tiefziehverblendung.

Erarbeiten eines Verbundkonzeptes

Um das Verbundkonzept zu erarbeiten, wurde im Rahmen des Projektes eine Reihe von Untersuchungen durchgeführt,^{4,5,6,7} die abschließend dazu führten, das folgende Verbundkonzept zu entwickeln (Tab. 2):

Sowohl das Zirkonoxidgerüst als auch die Innenseite der PEEK-Verblendung sollten bei einem geringen Druck von 0,5 bar und einer mittleren Korngröße von 50 μm mithilfe von Aluminiumoxid (Al_2O_3) korundgestrahlt werden. In dem Fall wird explizit darauf hingewiesen, dass der Abstrahl Druck gering sein muss, um zu verhindern, dass im Zirkonoxidgerüst Mikrorisse entstehen. Bei der PEEK-Verblendung spielt der Abstrahl Druck eine untergeordnete Rolle, wenn das empfohlene Adhäsiv (visio.link, bredent, Senden) verwendet wird.

Im Anschluss an das Korundstrahlen sollte das Zirkonoxidgerüst für 60 s in Ethanol und die PEEK-Verblendung für 60 s in destilliertem Wasser im Ultraschallbad gereinigt und

Tab. 2 Verbundkonzept für einen zuverlässigen Verbund zwischen Zirkonoxid und PEEK.

| Substrat | PEEK | Zirkonoxid |
|-----------------|---|---|
| Korundstrahlen | Al_2O_3 , 50 μm , 0,05 MPa, 10 mm, 45° | Al_2O_3 , 50 μm , 0,05 MPa, 10 mm, 90° |
| Reinigung | Ultraschallbad, destilliertes Wasser, 60 s | Ultraschallbad, Ethanol, 60 s |
| Konditionierung | visio.link (Bredent) – Polymerisation: 90 s (z. B. bre.Lux Power Unit, Bredent) | Clearfil Ceramic Primer (Kuraray Noritake), verblasen |
| Befestigung | Panavia 21 (Kuraray Noritake) | |



mithilfe von ölfreier Druckluft getrocknet werden. Optional kann das Zirkonoxidgerüst mit einem 10-Methacryloyloxydecyldihydrogenphosphat (MDP)-haltigen Primer (z. B. Clearfil Ceramic Primer, Kuraray Noritake, Tokio, Japan) konditioniert werden. Die Innenfläche der PEEK-Verblendung ist jedoch explizit mit einem Methylmethacrylat (MMA)-haltigen Adhäsiv zu konditionieren. Hierfür wird visio.link (bredent) empfohlen.

Das Adhäsiv sollte entsprechend der Herstellerangaben polymerisieren. Bei der Wahl des Befestigungsmaterials ist darauf zu achten, dass es weder licht- noch dualhärtend ist, da eine Polymerisation mittels Polymerisationslampe durch die opake PEEK-Verblendung nicht möglich ist. Das Befestigungsmaterial sollte im Verbundkonzept rein chemisch-härtend sein, um eine ausreichende Polymerisation sicherzustellen und zusätzlich MDP-Monomer enthalten, um einen guten Verbund zum Zirkonoxidgerüst zu gewährleisten. Die Produktempfehlung für das Befestigungsmaterial ist Panavia 21 (Kuraray Noritake).

Abschließend wurde das empfohlene Verbundkonzept anhand von klinisch relevanten Geometrien im Kronenabzugsversuch (Abb. 9) getestet. Hierzu wurden okklusale reduzierte Stümpfe in einer CAD-Software (Ceramill Mind, Amann Girrbach, Koblach, Österreich) modelliert, aus Zirkonoxid gefräst und nach Herstellerangaben gesintert. Die gesinterten Stümpfe wurden gescannt (Ceramill Map, Amann Girrbach) und eine Krone modelliert. Bei der Modellation der Kronen wurden zirkuläre Retentionen berücksichtigt, die für die Abzugsversuche notwendig waren. Für jeden Stumpf wurde eine passende Krone aus einem PEEK-Rohling (Dentokeep, nt-trading, Karlsruhe) gefräst. Der okklusale Bereich der Zirkonoxid-Stümpfe wurde entsprechend der Vorgaben des erarbeiteten Verbundkonzeptes oberflächenbehandelt und anschließend mit dem unteren Bereich des Stumpfes in einem Metallförmchen eingebettet. Um im späteren Versuchsverlauf die Verbundfestigkeit berechnen zu können, wurde die Fläche des okklusalen Bereichs eines jeden Stumpfes ermittelt. Dieser Bereich entspricht der Verbundfläche.

Testen des Verbundkonzeptes

Die Innenseite der gefrästen PEEK-Krone wurde ebenfalls entsprechend der Vorgaben des Verbundkonzeptes (Tab. 2) oberflächenbehandelt und auf Grundlage dessen auf dem Zirkonoxidstumpf befestigt.

Um die Verbundfestigkeit des Konzeptes auf ihre klinische Aussagekraft zu testen, wurden alle verklebten Kronen für 1,2 Millionen Zyklen im Kausimulator gealtert. Im Kausimulator werden sowohl die charakteristisch auftretenden mechanischen, aber auch thermischen Belastungen der Mundhöhle simuliert. Die Zyklenzahl von 1,2 Millionen Kauzyklen entspricht in etwa einer Simulationszeit von fünf Jahren. Die Kaubelastung entstand durch Schmelzantagonisten.

Nach der Alterung wurden auch die PEEK-Kronen in ein Metallförmchen eingebettet. Um einen Verbund zwischen den Metallförmchen zu verhindern, wurden die Ränder mit Silikon isoliert. Die Konstruktion wurde in die Universalprüfmaschine (RetroLine, Zwick/Roell, Ulm) eingespannt (Abb. 8) und die Zugverbundfestigkeit in Bezug auf die Verbundfläche ermittelt. Zusätzlich wurden die Bruchflächen auf den Zirkonoxidstümpfen und der PEEK-Krone analysiert. Die Ergebnisse zeigten eine mittlere Verbundfestigkeit von 8,7 MPa und überwiegend kohäsive Bruchtypen, die durch Reste des Befestigungsmaterials in der PEEK-Kronen oder am Zirkonoxidgerüst charakterisiert wurden (Abb. 9). Dies spiegelt die



Abb. 8 Kronenabzugsversuch zwischen PEEK und Zirkonoxidgerüst.



Abb. 9 Kohäsiver Bruch nach Kronenabzugsversuch mit restlichem Befestigungsmaterial am Zirkonoxidstumpf.

Tab. 3 Zugverbundfestigkeiten zwischen PEEK und Dentin im Vergleich zu den Ergebnissen des Kronenabzugsversuchs für PEEK und Zirkonoxid, in Abhängigkeit vom Adhäsivsystem.

| Restoration | Befestigungsmaterial | Adhäsivsystem | Zugverbundfestigkeit |
|--------------------|-------------------------------|---------------------------|-----------------------|
| PEEK zu Dentin | RelyX Unicem (3M) | Signum PEEK Bond (Kulzer) | 2,97 MPa ⁷ |
| PEEK zu Dentin | RelyX Unicem (3M) | visio.link (Bredent) | 2,12 MPa ⁷ |
| PEEK zu Zirkonoxid | Panavia 21 (Kuraray Noritake) | visio.link (Bredent) | 8,7 MPa |

hohen, erzielten Verbundfestigkeiten wieder und bestätigt die Empfehlung des erarbeiteten Verbundkonzeptes. Auch im Vergleich zu bestehender Literatur zeichnen sich die erzielten Verbundfestigkeitswerte des erarbeiteten Verbundkonzeptes durch hohe Werte aus (Tab. 3).

Fazit Mit Rückblick auf die vergangenen zwei Jahre Projektlaufzeit und den erzielten Ergebnissen vor Augen berichtet das Projektteam insgesamt von einer erfolgreichen Umsetzung des geplanten Vorhabens. Der gesamte Prozess zur Herstellung eines okklusal reduzierten Zirkonoxidgerüsts, das mithilfe der Tiefziehtechnik mit dem biokompatiblen Hochleistungsthermoplasten Polyetheretherketon (PEEK) verblendet wird, konnte dank des ZIM-Kooperationsförderprogramms in einer spannenden, interdisziplinären Zusammenarbeit zwischen zwei Unternehmen und zwei Forschungseinrichtungen umgesetzt werden. Hierbei waren die Expertise und Kompetenz jedes einzelnen sowie der stetige Austausch untereinander von großer Bedeutung. Auch wenn das offizielle Projektziel erreicht ist, ist das Projektteam mit seiner Kreativität noch nicht am Ende. Die erzielten Ergebnisse bilden eine gute Grundlage für weitere Entwicklungsideen, Forschungsvorhaben und spannende Kooperationsprojekte.

1. Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsgemeinschaften: Innovationsförderung. <https://www.aif.de/innovationsfoerderung/zim-kooperationen.html> (Zugriff: 02.10.2018).
2. Bodden L, Lümke mann N, Köhler V, Eichberger M, Stawarczyk B. Impact of the heating/quenching process on the mechanical, optical and thermodynamical properties of polyetheretherketone (PEEK) films. *Dent Mater* 2017;33:1436–1444.
3. Eichberger M, Edelhoff D, Schäfer J, Schweiger J, Stawarczyk B. Die Tiefziehverblendung. *Quintessenz Zahntech* 2014;40:548–569.
4. Lümke mann N, Eichberger M, Stawarczyk B. Bonding to different PEEK qualities: impact of different light curing units. *Materials* 2017;10:1–10.
5. Lümke mann N, Eichberger M, Stawarczyk B. Different PEEK qualities irradiated with light of different wavelengths: Impact on Martens hardness. *Dent Mater* 2017;33:968–975.
6. Lümke mann N, Strickstro ck M, Eichberger M, Zylla IM, Stawarczyk B. Impact of air-abrasion pressure and adhesive systems on bonding parameters for polyetheretherketone dental restorations. *Int J Adhes* 2018;80:30–38.
7. Lümke mann N, Eichberger M, Stawarczyk B. Plasma vs. air-particle abrasion combined with universal adhesives: impact on bonding properties of zirconia to resin composite cement. Eingereicht bei *J Prosthet Dent*, 16. Februar 2018.
8. Uhrenbacher J, Schmidlin PR, Keul C, Eichberger M, Roos M, Gernet W, Stawarczyk B. The effect of surface modification on the retention strength of polyetheretherketone crowns adhesively bonded to dentin abutments. *J Prosthet Dent* 2014;112:1489–1497.
9. Wintermantel E, Ha SW. *Medizintechnik. Life Science Engineering*. 5. Auflage. Heidelberg: Springer, 2009.

Literatur

**Nina Lümke mann, MSc**

Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik
 Klinikum der Universität München
 Campus Innenstadt
 Goethestr. 70
 80336 München
 E-Mail: nina.luemkemann@med.uni-muenchen.de

ZT Marlis Eichberger

(Adresse wie Nina Lümke mann)

ZTM Ralph Riquier

r2dental
 Niemandenberg 77
 75196 Remchingen

Dr.-Ing. Dipl. Math. Norbert Schuhmann

Pagoda Systems Software Solutions GbR
 Tannenackerstrasse 8
 70469 Stuttgart

Dipl.-Inform. Andreas Gesewsky

(Adresse wie Dr. Norbert Schuhmann)

PD Dr. Dipl.-Ing. (FH) Bogna Stawarczyk, MSc

(Adresse wie Nina Lümke mann)