

Silikatkeramische Restaurationen mit der LSD-Print-Technologie?

Silikatkeramiken werden in der Zahnmedizin vor allem für ihre ästhetischen Eigenschaften geschätzt. Konventionelle Techniken und subtraktive Verfahren zur Herstellung silikatkeramischer Restaurationen haben sich längst etabliert, doch was ist mit den additiven Technologien? Eine limitierte Materialauswahl, eingeschränkte mechanische Eigenschaften und die Prozesszeit werden immer wieder als Hürden zur Kommerzialisierung und den klinischen Einsatz genannt. Eine Technologie, die das Potential mit sich bringt, diese Hürden zu überwinden ist die Lage-weise-Schlicker-Deposition (LSD-Print).

LSD-print Technologie zur additiven Fertigung keramischer Bauteile

Das LSD-Print-Verfahren wurde als Schlicker-basierte Variante des Binder Jettings entwickelt und ist speziell für keramische Materialien geeignet ist. Dabei wird ein wasserbasierter Schlicker (Feedstock) schichtweise mittels Rakel aufgetragen, getrocknet und anschließend lokal durch ein flüssiges Polymer verfestigt. Zu den wesentlichen Vorteilen gegenüber klassischen pulverbasierten Binder-Jetting-Technologien zählt die

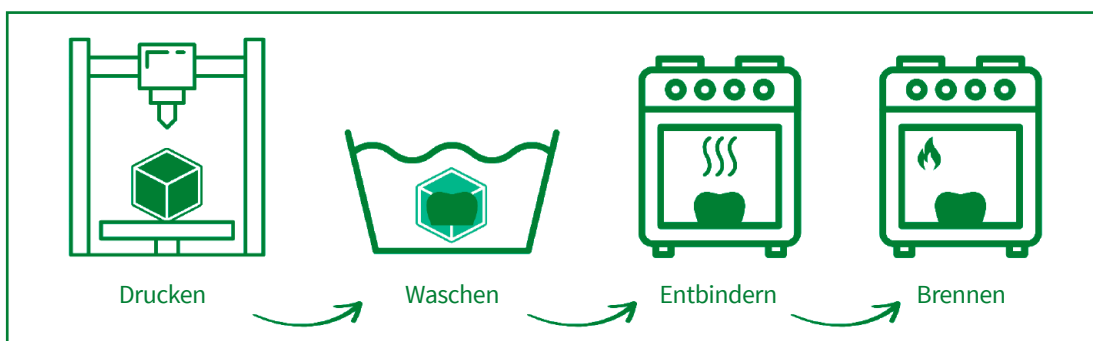
Möglichkeit, feinere Partikel einzusetzen, sowie das Erzielen einer höheren Gründichte (> 60 %). Dadurch können keramische Bauteile mit erhöhter Präzision und erhöhten mechanischen Eigenschaften, gegenüber anderen additiven Verfahren hergestellt werden und können sogar das Niveau technischer Keramiken erreichen.

Feedstock-Rezeptur als zentraler Entwicklungsschritt

Die Entwicklung des Feedstocks spielt eine große Rolle für den Erfolg des Gesamtprozesses. Ausgehend vom keramischen Rohstoffpulver, über Wasseranteil bis hin zu verschiedenen Additiven wie Bindern und Plastifikatoren muss alles optimal abgestimmt sein, um ein prozessfähiges Produkt zu erhalten. Ein geringer Anteil organischer Bestandteile im Feedstock wirkt sich positiv auf die Gründichte und ermöglicht später beim Entbindern einen deutlichen Zeitvorteil gegenüber anderen Technologien mit sich.

Der Herstellungsprozess – Drucken, Waschen, Entbindern und Brennen

Der Herstellungsprozess ist in die Teilschritte (Abbildung ► 1) Drucken, Waschen, Entbindern und Brennen zu untergliedern.



► 1 Teilschritte des LSD-Print Prozesses.

Im Rahmen des Forschungsprojektes SikaPrint (KK5056001AG0) ist es dem Team der Werkstoffkundeforschung der Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik des Klinikums der LMU gelungen das Entbindern und Brennen in einem kombinierten Prozess zu vereinen und auf eine Gesamtzeit von circa 45 Minuten zu reduzieren. Genutzt wurde dazu ein modifizierter konventioneller dentaler Keramikofenbrennofen.

Was zeigen Untersuchungen im Hinblick die Qualität der Druckobjekte?

In einer neuen Untersuchung wurden neben Prüfkörper zur Beurteilung der materialcharakteristischen, mechanischen und physikalischen Eigenschaften, auch dentale Restaurationen als Demonstrationsobjekte gedruckt. Als Referenz fungierten gesägte Prüfkörper aus VITABLOCS Mark II – basierend auf vergleichbarer Rohstoffzusammensetzung. Der Druck der Prüfkörper erfolgte in unterschiedlicher Ausrichtung, um den Einfluss der Objektpositionierung (Abbildung ► 2) auf das Ergebnis beurteilen zu können.

Was konnte beobachtet werden:

- Defekte und Delaminationen traten überwiegend in YZ- und XZ-orientierten Prüfkörpern auf.
- Schrumpfung nach dem Brennen war in Z-Richtung signifikant höher als in X- und Y-Richtung.
- Biegefestigkeit: Proben in XY-Ausrichtung zeigten vergleichbare Werte zur Referenz.
- Bruchzähigkeit, Martenshärte und Indentationsmodul waren bei der Referenz höher.
- Mikrostruktur der gedruckten Prüfkörper ähnlich zur Referenz, jedoch mit geringerem Kristallanteil.

Die mechanischen Eigenschaften sind vor allem mikrostrukturell bedingt. Die Unterschiede in der Mikrostruktur zwischen den gedruckten Prüfkörpern und der Referenz sind vor allem auf den unterschiedlichen Herstellungsprozess zurückzuführen. Die Referenz – industriell vorgefertigte CAD/CAM Blöcke – werden im Grünzustand verdichtet und als Block optimiert, gebrannt. Weiterhin ist aber auch das Zusammenspiel von



► 2 Untersuchte Orientierungen der Druckobjekte in XY (links), XZ (mittig) und YZ (rechts).

Prozessparametern und Feedstock-Rezeptur ein entscheidender Faktor, der zum Beispiel Delamination, Porenbildung beeinflusst.

LSD-Print als Alternative zur subtraktiven Fertigung?

Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass mit der LSD-Print-Technologie monolithische Einzelzahnkronen im Frontzahnbereich, Veneers, Inlays oder Onlays, die intraoral adhäsiv befestigt werden (Klasse-1a-Restaurationen), aus einem Feldspat-Glaskeramikmaterial der Klasse 1a gemäß den Anforderungen der DIN EN ISO 6872:2019-01 hergestellt werden können. Insbesondere die hohe Verdichtung (> 99 % relative Dichte) unterstreichen die prinzipielle Eignung der Technologie für dentale Anwendun-

gen. Zudem belegt die hohe Produktivität des Verfahrens die Möglichkeit einer wirtschaftlichen Serienfertigung. Der neu entwickelte kombinierte Prozess aus Entbindern und Brennen bringt eine zusätzliche Zeitersparnis mit sich und ist mit 45 min zum aktuellen Zeitpunkt einzigartig in der Welt der additiven Fertigung von keramischen dentalen Restaurationen. Als wesentliche Herausforderungen sind der reduzierte Kristallanteil und die daraus resultierende Deformationsneigung während des Brennens zu nennen, sie limitieren aktuell die Maßhaltigkeit und klinische Passgenauigkeit. Um die Wettbewerbsfähigkeit gegenüber der subtraktiven Fertigung zu erhöhen, ist daher eine gezielte Optimierung notwendig.



Die präsentierten Ergebnisse sind aus folgender Untersuchung zusammengefasst: Hoffmann M, Schubert NH, Günster J, Stawarczyk B, Zocca A. **Additive manufacturing of glass-ceramic dental restorations by layerwise slurry deposition (LSD-print).** Journal of the European Ceramic Society 45 (2025) 117235; <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2025.117235>.