

Einfluss verschiedener Nachbelichtungsprotokolle sowie künstlicher Alterung auf die Materialeigenschaften verschiedener 3D-gedruckter Harze für festsitzenden Zahnersatz

Für die Herstellung von festsitzendem Zahnersatz gewinnen 3D-gedruckte Materialien immer mehr an Bedeutung, da diese Technologie stetig fortlaufender Entwicklung und Forschung unterliegt.

Um den Anforderungen für den permanenten Einsatz in der Mundhöhle gerecht zu werden, müssen die gedruckten Objekte neben entsprechender Biokompatibilität und Langlebigkeit auch in der Lage sein, den okklusalen Kräften in der Mundhöhle standzuhalten. Demnach ist der Nachbelichtungsprozess nach Beendigung des Druckvorganges, das sogenannte Postprocessing (PP) entscheidend für die Materialeigenschaften dieser Werkstoffe.

Trotz zunehmender Materialvielfalt und eines breiten Anwendungsspektrums gibt es keine einheitlichen Richtlinien zur Verwendung der unterschiedlichen Nachbelichtungsprotokolle oder Ausführungen darüber, wie weit die verschiedenen Geräte innerhalb des Druckobjektes nachbelichten, was insbesondere in den tieferen Schichten der Objekte maßgeblich die Materialeigenschaften beeinflusst.

Es stehen verschiedene Nachbelichtungsstrategien für 3D-gedruckten Zahnersatz zur Verfügung, in der nachfolgend dargestellten Studie soll der Einfluss von LED- und Blitzlichtquellen veranschaulicht werden.

Ziel der dargelegten Studie war es demnach, den Einfluss von insgesamt 5 unterschiedlichen Nachbelichtungsproto-

Chemical and mechanical properties of 3D-printed resins for fixed dental prostheses							
3D-printed specimens	Permanent 3D-printed resins			Provisional 3D-printed resin			
Post-polymerization protocol	Varseo Smile Crown Plus (VAR) (n=240)	Crowntec (CRO) (n=240)	Freeprint temp (FRE) (n=240)				
Square specimens / Rectangular specimens (n=360) / (n=360)							
Aging	LED at different wavelengths		Flashlight				
	385 nm, 350 mA, 76 mW/cm ² , 180 s (n=144)	400 nm, 350 mA, 77 mW/cm ² , 180 s (n=144)	460 nm, 350 mA, 49 mW/cm ² , 180 s (n=144)	1 Condensator, 37 mW/cm ² , 200 ms (n=144)	2 Condensators, 90 mW/cm ² , 200 ms (n=144)		
Determination of the chemical and mechanical properties	Square specimens / Rectngular specimens (n=216) / (n=216)			Square specimens / Rectangular specimens (n=144) / (n=144)			
	Initial (n=540)	Thermocycling (10.000 cycles; 30 s; 5/55 °C) (n=540)		Square specimens / Rectangular specimens (n=360) / n=(180)			
Square specimens (20x20x2 mm, 20x20x4 mm) Measurement at 0, 2 and 4 mm from the polymerized surface							
	Conversion rate (n=720)	Martens hardness x three different measurement times (n=720)		Rectangular specimens (25x2x2 mm)	Elastic modulus (n=360)		
	Flexural strength (n=360)						

► 1 Studiendesign der vorgestellten Untersuchung

tokollen sowie künstlicher Alterung auf die Umsetzungsrate (DC), Martenshärte (HM), Biegefestigkeit (FS) sowie den E-Modul (EM) in drei unterschiedlichen Schichten von insgesamt drei verschiedenen Harzen für den 3D-Druck von festsitzendem Zahnersatz zu analysieren. Es wurden insgesamt 720 Prüfkörper in zwei verschiedenen Geometrien hergestellt (Abbildung ▶ 1): quadratische Prüfkörper in zwei unterschiedlichen Dicken (20 mm × 20 mm × 2 oder 4 mm) für DC und HM sowie rechteckige Prüfkörper (25 mm × 2 mm × 2 mm) zur Bestimmung von FS und EM. Dabei wurden zwei Harze für den permanenten Einsatz (VAR=Varseo Smile Crownplus, BEGO Medical; CRO= Crowntec, Saremco Dental), und ein Harz für den temporären Gebrauch verwendet (FRE=Freeprint temp, Detax).

Unmittelbar nach dem Druckprozess wurden sämtliche Prüfkörper in der Zentrifuge (Multifuge 1 S-R; Heraeus, Hanau, Deutschland) für vier Minuten bei 20 °C und 1500 rpm gereinigt.

Im Anschluss wurden die gedruckten Objekte in zwei unterschiedlichen experimentellen Nachbelichtungsgeräten (NK Optik, Baierbrunn, Deutschland) von einer Seite nachbelichtet (Abbildung ▶ 2).

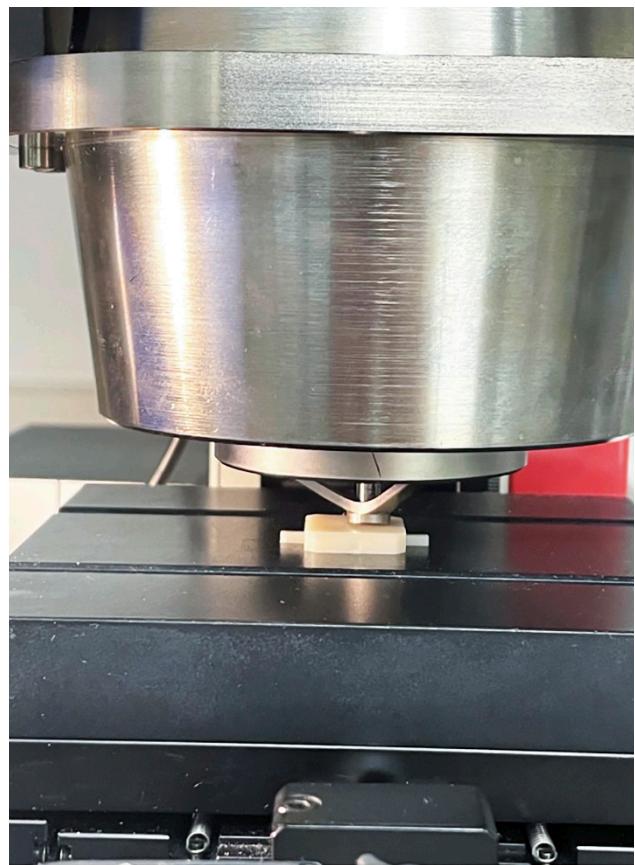


▶ 2 Gedruckter Prüfkörper in Prüfkörpervorrichtung zur einseitigen Nachbelichtung

Der Nachbelichtungsprozess wurde dabei in 5 verschiedene Gruppen eingeteilt:

- PP 1: 385 nm LED; 76 mW/cm², Zeit 180 s
- PP 2: 400 nm LED; 77 mW/cm², Zeit 180 s
- PP 3: 460 nm LED; 49 mW/cm², Zeit 180 s
- PP 4: Xenon-Blitzlichtlampe; 37 mW/cm², Zeit 2000 Blitze/200 ms
- PP 5: Xenon-Blitzlichtlampe; 90 mW/cm², Zeit 2000 Blitze/200 ms

Daraufhin wurden die initialen Messungen der DC im Raman Spectrophotometer (inVia Qontor; Renishaw, Pliezhausen, Deutschland) bei Wellenlängen von 1610 cm⁻¹ und 1640 cm⁻¹ durchgeführt. Die erste Messung der HM erfolgte mithilfe einer Universalprüfmaschine (ZHU 0.2; ZwickRoell, Ulm, Deutschland) indem die Spitze eines Vickersdiamanten mit einer maximalen Testkraft von 9,81 N auf die Oberfläche der Püfkörper aufsetzt (Abbildung ▶ 3).



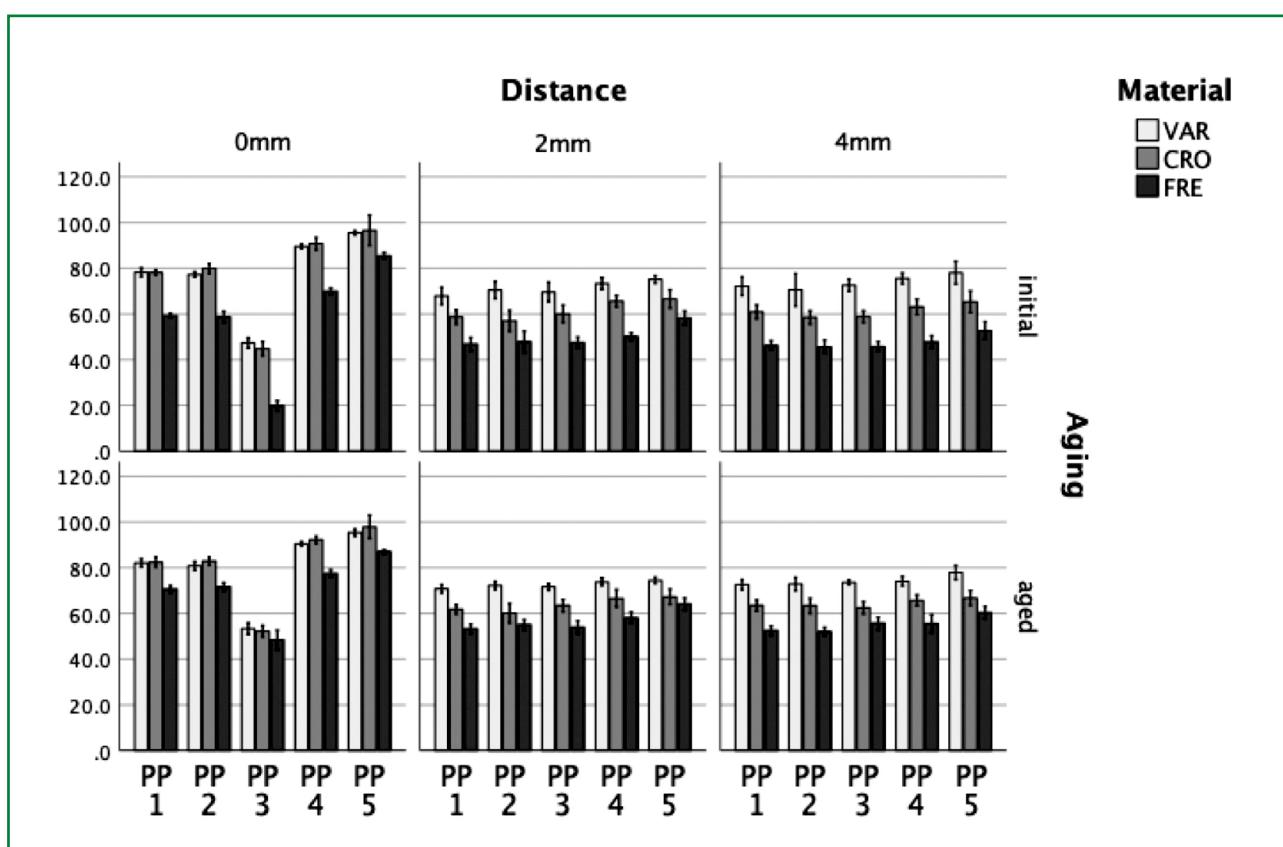
▶ 3 Abdruck der Pyramide auf der Prüfkörperoberfläche

Danach wurden die Prüfkörper für die DC- und HM-Messungen künstlich im Thermocycler (Thermocycler THE-1100; SD Mechatronik, Feldkirchen-Westerham, Deutschland) bei Wassertemperaturen von 5 °C und 55 °C mit einer Verweildauer von jeweils 30 Sekunden für insgesamt 10.000 Zyklen gealtert. Dies simulierte eine Verweildauer des Zahnersatzes in der Mundhöhle für 12 Monate. Im Anschluss erfolgten die Messungen der gealterten Prüfkörper.

Im Gegensatz zu der longitudinale Messung von DC und HM wurde die Hälfte der rechteckigen Prüfkörper für die Bestimmung von FS und EM direkt im Thermocycler mit denselben Parametern gealtert und daraufhin gleichermaßen zu den initialen Prüfkörper analysiert. FS wurde mit einer Universalprüfmaschine (Zwick 1445; ZwickRoell) bestimmt, indem vertikal Kraft mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 1 mm/min appliziert wurde. EM wurde rechnerisch aus den FS-Werten ermittelt.

Ergebnisse

Alle drei Materialien wiesen nach Nachbelichtung mit stroboskopischem Xenonlicht (PP 4 und PP 5) stets die höchsten Werte hinsichtlich DC und HM auf (Abbildung ▶4). Ebenfalls konnte anhand der ermittelten Werte die Tiefenabhängigkeit der Polymerisation verdeutlicht werden, da DC und HM mit zunehmender Tiefe abnehmen (0 mm > 2 mm > 4 mm). Eine gleichmäßige Lichtverteilung ist demnach unerlässlich, da nur die lichtzugewandte Fläche des gedruckten Objekts suffizient belichtet wird. Auch die FS- und EM- Werte stellten sich bei allen drei Harzen nach PP 4 und PP 5 signifikant höher als bei den LED-Gruppen dar. Die kurzen, intensive Lichtblitze des Xenon-Stroboskoplichtes führen zu einem breiteren Lichtspektrum und einer höheren Lichtintensität- optimal für die Materialeigenschaften der Harze. Die künstliche Alterung erhöhte DC und HM in den LED-Gruppen, vermutlich durch eine anhaltende Polymerisation durch die hohen Temperaturen des Wassers.



▶4 DC-Werte (%) aller Prüfkörpergruppen

Bedeutung für die klinische Anwendung

Ziel dieser Studie war es, den Einfluss unterschiedlicher Nachbelichtungsprotokolle sowie der künstlichen Alterung auf DC, HM, FS und EM verschiedener Harze für den 3D-Druck von festsitzendem Zahnersatz zu untersuchen. Folgende Schlüsse lassen sich für den klinischen Alltag daraus ziehen:

Die Selektion des Nachbelichtungsprotokolls sollte abhängig von der Indikation und Art des Harzes erfolgen. Die bevorzugte Nachbelichtungsart stellt Xenon-Stroboskoplicht dar, dennoch muss auch dort auf eine gleichmäßige Nachbelichtung geachtet werden, insbesondere bei großen und dicken Objekten um langlebige und belastbare Restaurationen für den permanenten Gebrauch zu erhalten.



Die hier vorgestellten Ergebnisse basieren auf der folgenden Studie: Gekle S, Mayinger F, Kreitmair U, Reymus M, Hoffmann M, Stawarczyk B. **Impact of different post-polymerization protocols on the material properties of three printed dental resins.** J Mech Behav Biomed Mater 2025;172:107164.