

Mechanische Eigenschaften, Passgenauigkeit und Verbundverhalten FFF-gedruckter Provisorien aus PET und PMMA

Die digitale Fertigung hat die Zahnmedizin in den vergangenen Jahren maßgeblich verändert und ermöglicht zunehmend effiziente, präzise und vielseitige Herstellungsprozesse in verschiedenen Bereichen der restaurativen Zahnheilkunde. Neben subtraktiven Verfahren wie dem computerunterstützten Fräsen (CNC) gewinnen additive Fertigungstechniken zunehmend an Bedeutung. Besonders die Vat-Photopolymerisation, zu der unter anderem das Digital Light Processing (DLP) zählt, hat sich bereits in der dentalen Herstellung etabliert. Gleichzeitig rücken extrusionbasierte Verfahren wie die Fused Filament Fabrication (FFF) zunehmend in den Fokus wissenschaftlicher Untersuchungen.

Beim FFF wird ein thermoplastisches Filament erhitzt und schichtweise über eine Düse auf eine Bauplattform aufgetragen. Das Verfahren zeichnet sich insbesondere durch geringe Materialkosten, einen reduzierten Materialverlust sowie eine vergleichsweise einfache Handhabung aus. Allerdings bestehen weiterhin Herausforderungen hinsichtlich Oberflächenqualität, Dimensionengenauigkeit und thermischer Prozesskontrolle, wodurch die klinische Anwendung derzeit noch eingeschränkt ist. Während FFF bislang überwiegend zur Herstellung dentaler Modelle eingesetzt wird, existieren nur wenige Untersuchungen zur Eignung dieses Verfahrens für die Herstellung provisorischer Restaurationen.

Provisorische Versorgung übernehmen in der klinischen Zahnmedizin eine wichtige Funktion. Sie schützen präparierte Zähne, stellen Ästhetik und Kaufunktion wieder her und unterstützen die Phonation während der Behandlungsphase. Die verwendeten Materialien müssen daher neben einer ausreichenden Biokompatibilität

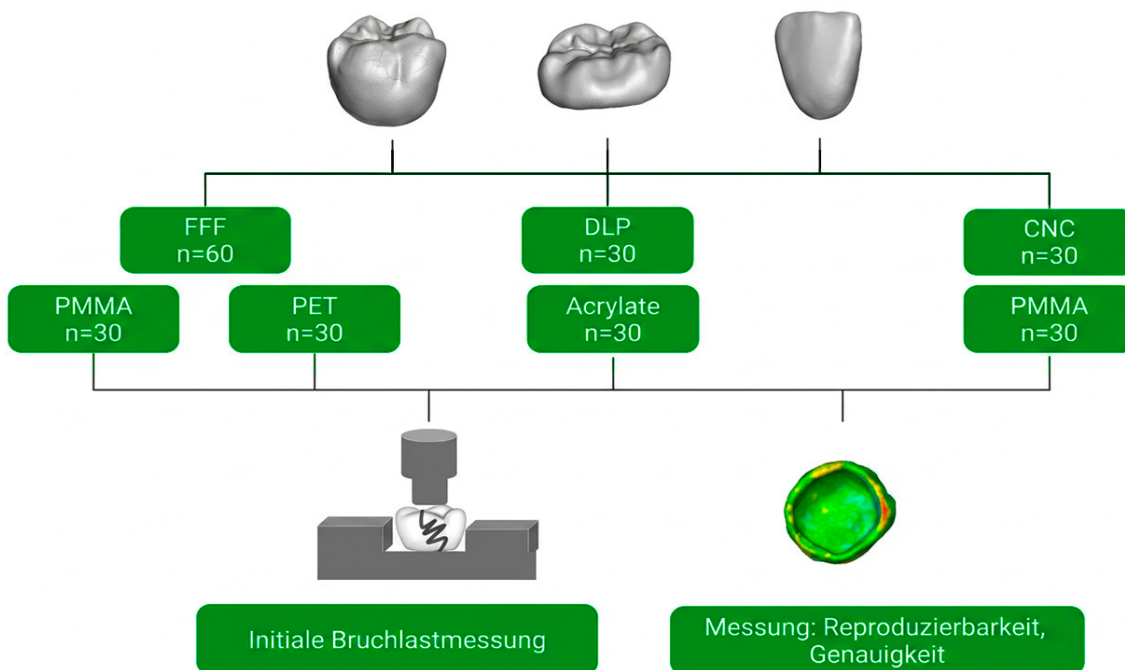
auch adäquate mechanische Eigenschaften aufweisen. Sowohl PMMA als auch PET weisen thermoplastische Eigenschaften auf, die eine schichtweise Verarbeitung ermöglichen. Trotz erster vielversprechender Ansätze liegen bislang jedoch nur begrenzte Daten zur Eignung FFF-gefertigter provisorischer Restaurationen vor.

Ziel dieser Studie war es, FFF-gedruckte provisorische Restaurationen aus PMMA und PET hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften, ihrer Dimensionsgenauigkeit sowie ihres Verbundverhaltens zu untersuchen und mit DLP-gedruckten beziehungsweise CNC-gefrästen Versorgung zu vergleichen. Dieser Auszug stellt Teilergebnisse der Gesamtuntersuchung dar.

Material und Methode

Initiale Bruchlastmessung

Zur Bestimmung der initialen Bruchlast wurden Seitenzahnkronen, okklusale Veneers und Frontzahnkronen hergestellt. Die Restaurationen wurden mittels FFF (SIMPLEX 2 SX, Renfert GmbH, Hilzingen, Deutschland) aus PMMA (The.r.mo.bridge, Pressing Dental S.r.l., San Marino) sowie PET (ELDY FILAMENT, DentalPlus GmbH, Bensheim, Deutschland) gefertigt. Als Kontrollgruppen dienten DLP-gedruckte Restaurationen (VarseoSmile Crown Plus, BEGO GmbH & Co. KG, Bremen, Deutschland) sowie CAD/CAM-gefräste PMMA-Restaurationen (Telio CAD LT, Ivoclar Vivadent AG, Schaan, Liechtenstein). Nach der Herstellung wurden alle Restaurationen digitalisiert (Ceramill Map 400, Amann Girrbach AG, Koblach, Österreich) und hinsichtlich ihrer Genauigkeit und Reproduzierbarkeit untersucht. Anschließend erfolgte die Bestimmung der initialen Bruchlast mittels einer Universalprüfmaschine (Zwick/Roell 1445 RetroLine, ZwickRoell GmbH & Co. KG, Ulm, Deutschland) (Abbildung ► 1).



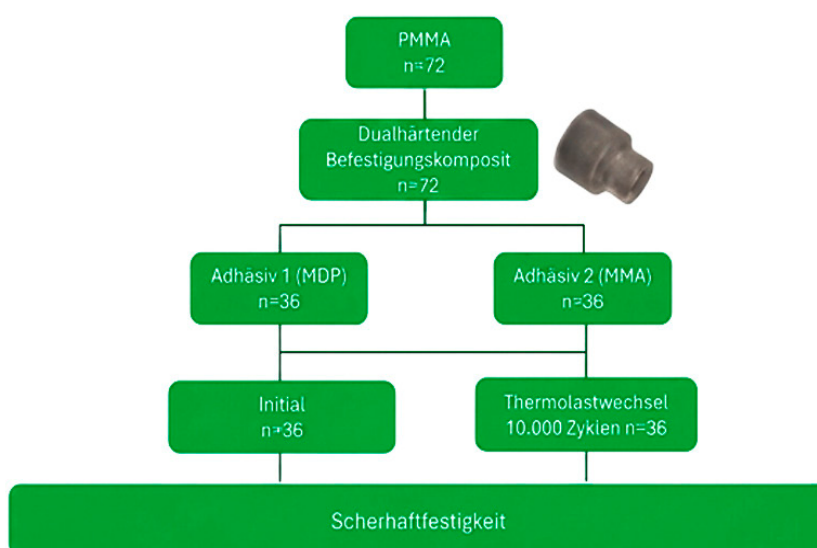
► 1 Study Design Bruchlast, Genauigkeit und Reproduzierbarkeit

Scherhaftfestigkeit

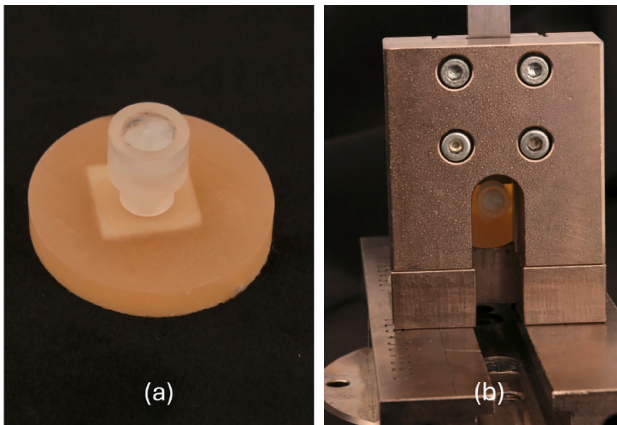
Zur Untersuchung der Verbundfestigkeit wurden zwei unterschiedliche Konditionierungssysteme verglichen und die Scherhaftfestigkeit bestimmt (Abbildung ► 2). Hierzu wurden insgesamt 72 rechteckige PMMA-Prüfkörper (10 × 10 × 2 mm) mittels FFF hergestellt. Nach dem Abstrahlen (50 µm Al₂O₃, 0,1 MPa, 10 s, 45° Winkel, 10

mm Abstand; Basic quattro IS, Renfert GmbH, Hilzingen, Deutschland) wurden die Prüfkörper in zwei Konditionierungsgruppen eingeteilt. Gruppe 1 wurde mit einem Universalprimer (Monobond Plus, Ivoclar Vivadent AG, Schaan, Liechtenstein), Gruppe 2 mit einem Adhäsiv (Visiolink, bredent GmbH & Co. KG, Senden, Deutschland)

konditioniert. Anschließend wurden Befestigungshülsen (SD Mechatronik GmbH, Feldkirchen-Westerham, Deutschland) mit einem dualhärtenden Befestigungskomposit (Variolink Esthetic DC, Ivoclar Vivadent AG, Schaan, Liechtenstein) auf den Prüfkörpern polymerisiert. Die Hälfte der Prüfkörper wurde unmittelbar der Scherhaftfestigkeitsprüfung (Zwick/Roell 1445 RetroLine, ZwickRoell GmbH & Co. KG, Ulm, Deutschland) unterzogen, während die übrigen Prüfkörper zunächst einen Thermolastwechsel (10.000 Zyklen, 5 °C/ 55 °C, 30 s Verweildauer, SD Mechatronik GmbH, Feldkirchen-Westerham, Germany), durchliefen (Abbildung ► 3).



► 2 Study Design Scherhaftfestigkeit

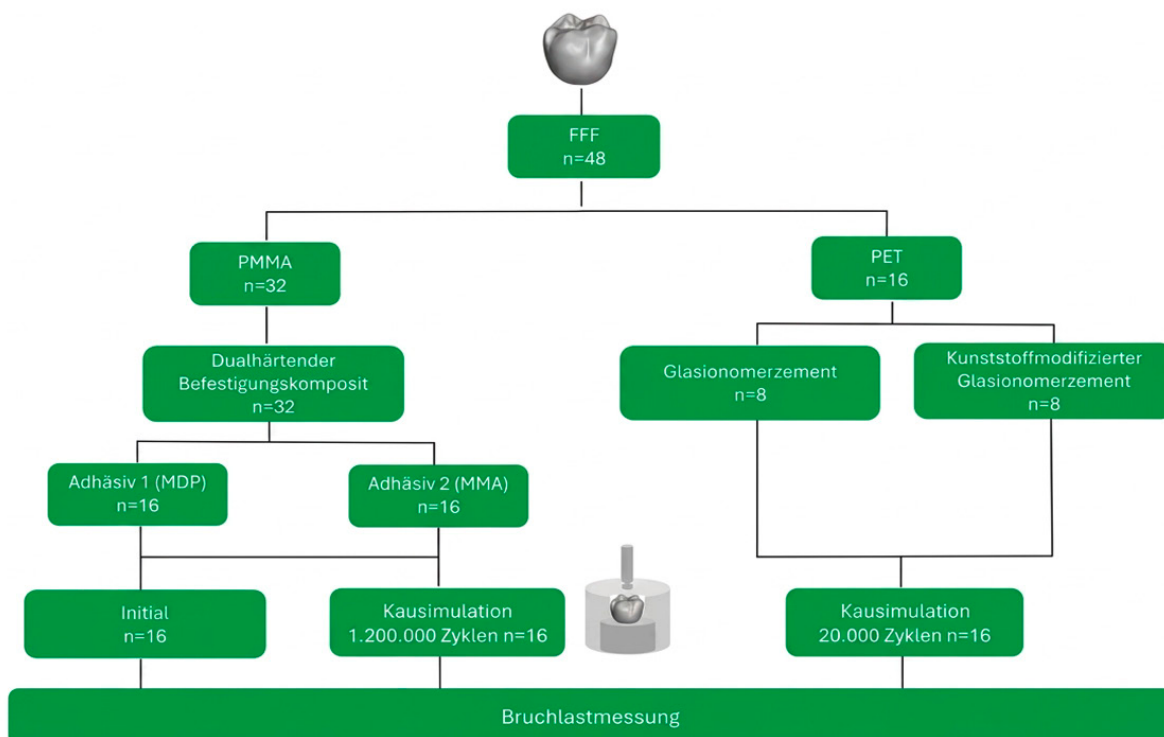


► 3 (a) Scherhaftfestigkeitsprüfkörper, (b) Scherhaftfestigkeitsmessung

Bruchlastmessung in Abhängigkeit vom Befestigungsmaterial

Zur Bestimmung der Bruchlast in Abhängigkeit vom Befestigungsmaterial wurden 48 Seitenzahnkronen mittels FFF aus PMMA und PET hergestellt. Die PET-Restaurationen wurden entsprechend des verwendeten Befestigungsmaterials in zwei Gruppen eingeteilt.

Gruppe 1 wurde mit einem Glasionomerzement (Meron, VOCO GmbH, Cuxhaven, Deutschland), Gruppe 2 mit einem kunststoffmodifizierten Glasionomerzement (Ketac Cem Plus, Solventum Germany GmbH, Neuss, Deutschland) befestigt. Die PMMA-Restaurationen wurden ebenfalls in zwei Gruppen eingeteilt. Gruppe 1 wurde mit einem Universalprimer (Monobond Plus, Ivoclar Vivadent AG, Schaan, Liechtenstein), Gruppe 2 mit einem Adhäsiv (Visiolink, bredent GmbH & Co. KG, Senden, Deutschland) konditioniert. Anschließend wurden beide Gruppen mit einem dualhärtenden Befestigungskomposit (Variolink Esthetic DC, Ivoclar Vivadent AG, Schaan, Liechtenstein) auf Prüfabutments (TRINIA, Bicon Europe Ltd., Madrid, Spanien) befestigt. Die Hälfte der PMMA-Restaurationen (1.200.000 Zyklen, 5 N, 5 °C/55 °C, 60 s Verweildauer, Kausimulator CS-4.10; SD Mechatronik GmbH, Feldkirchen-Westerham, Germany) sowie alle PET-Restaurationen (20.000 Zyklen, 5 N, 5 °C/55 °C, 60 s Verweildauer durchliefen eine Kausimulation. Anschließend wurden alle Prüfkörper mittels einer Universalprüfmaschine (Zwick/Roell 1445 RetroLine, ZwickRoell GmbH & Co. KG, Ulm, Deutschland) der Bruchlastprüfung unterzogen (Abbildung ► 4).



► 4 Bruchlastmessung in Abhängigkeit vom Befestigungsmaterial

Die statistische Analyse der erhobenen Daten wurde mit IBM SPSS Statistics v29.0 durchgeführt. Dabei kamen der Kolmogorov-Smirnov-Test, der Kruskal-Wallis-Test, der Mann-Whitney-U-Test, sowie unabhängige T-tests zum Einsatz. Ein Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$ wurde zugrunde gelegt.

Ergebnisse

Filamentgedruckte Restaurationen zeigten die geringsten Bruchlastwerte, während gefräste Restaurationen die höchsten Bruchlastwerte aufwiesen. Bei den DLP- und CAD/CAM-gefertigten Restaurationen erreichten okklusale Veneers die höchsten Bruchlastwerte, während bei den FFF-gefertigten Restaurationen Seitenzahnkronen die höchsten Werte zeigten. Frontzahnkronen wiesen unabhängig vom Herstellungsverfahren die geringsten Bruchlastwerte auf. Innerhalb der FFF-gefertigten Front- und Seitenzahnkronen erzielte PMMA höhere Bruchlastwerte als PET.

DLP-gefertigte Restaurationen zeigten die höchste Genauigkeit. CAD/CAM-gefertigte sowie FFF-PET-Restaurationen wiesen vergleichbare Ergebnisse auf, während FFF-PMMA die größten Abweichungen zeigte.

Bei der Scherhaftfestigkeit erzielte Visiolink signifikant höhere Werte als Monobond Plus. Der Thermolastwechsel hatte keinen Einfluss auf die Scherhaftfestigkeit von Visiolink, wohingegen sich alle mit Monobond Plus konditionierten Prüfkörper während des Thermolastwechsels lösten.

Bei den PET-Restaurationen zeigte das verwendete Befestigungsmaterial (Meron bzw. Ketac Cem Plus) keinen

Einfluss auf die Bruchlast. Auch bei den PMMA-Restaurationen wurden keine Unterschiede in Abhängigkeit vom Befestigungsmaterial festgestellt. Nach der Kausimulation verringerte sich die Bruchlast unabhängig vom verwendeten Befestigungsmaterial.

Fazit

CAD/CAM-gefertigte provisorische Restaurationen zeigten die höchsten Frakturlasten, während DLP die größte Genauigkeit erreichte. FFF-PET wies eine mit CAD/CAM vergleichbare Präzision auf, wohingegen FFF-PMMA die größten Abweichungen zeigte. Für FFF-PMMA erwies sich Visiolink als das geeignetere Adhäsivsystem. Thermomechanische Alterung reduzierte die Frakturlast beider Werkstoffe. Insgesamt stellt das FFF-Verfahren eine vielversprechende Option zur Herstellung provisorischer Restaurationen dar, sofern Materialwahl, Oberflächenbehandlung und die Auswirkungen der Alterung berücksichtigt werden. 

Die hier vorgestellten Ergebnisse basieren auf der folgenden Studie: Gmeiner J, Meinen J, Hoffmann M, Stawarczyk B. **FFF-Printed PET and PMMA for Provisional Restorations: An In Vitro Evaluation of Mechanical Properties, Dimensional Accuracy, and Bonding Behavior.** Polymers (Basel). 2026 May 2;18(9):1125. doi: 10.3390/polym18091125.