

Aus der Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik
der Ludwig-Maximilians-Universität München
Direktor: Prof. Dr. med. dent. Daniel Edelhoff



**Innovationen in der
Herstellung, Verarbeitung und Befestigung
ästhetischer zahnfarbener Restaurationsmaterialien**

Habilitation
an der Medizinischen Fakultät
der Ludwig-Maximilians-Universität München

vorgelegt von
Dr. med. dent. Felicitas Mayinger (geb. Wiedenmann)

2021

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Originalarbeiten	4
2.1. Herstellung ästhetischer zahnfarbener Restaurationsmaterialien	4
2.1.1. Mayinger F, Lümke N, Musik M, Eichberger M, Stawarczyk B. Comparison of mechanical properties of different reinforced glass-ceramics. J Prosthet Dent 2020; advance online publication (IF: 2.444)	4
2.1.2. Micovic D, Mayinger F, Bauer S, Roos M, Eichberger M, Stawarczyk B. Is the high-performance thermoplastic polyetheretherketone indicated as a clasp material for removable dental prostheses? Clin Oral Investig 2020; advance online publication (IF: 2.812)	6
2.1.3. Mayinger F, Micovic D, Schleich A, Roos M, Eichberger M, Stawarczyk B. Retention force of polyetheretherketone and cobalt-chrome-molybdenum removable dental prosthesis clasps after artificial aging. Clin Oral Investig 2020; advance online publication (IF: 2.812)	8
2.1.4. Schönhoff LM, Mayinger F, Eichberger M, Lösch A, Reznikova E, Stawarczyk B. Three-dimensionally printed and milled polyphenylene sulfone materials in dentistry: Tensile bond strength to veneering composite resin and surface properties after different pretreatments. J Prosthet Dent 2020; in press (IF: 2.444)	10
2.1.5. Jerman E, Wiedenmann F, Eichberger M, Reichert A, Stawarczyk B. Effect of high-speed sintering on the flexural strength of hydrothermal and thermo-mechanically aged zirconia materials. Dent Mater 2020; 36(9):1144-1150 (IF: 4.495)	12
2.1.6. Wiedenmann F, Pfefferle R, Reichert A, Jerman E, Stawarczyk B. Impact of high-speed sintering, layer thickness and artificial aging on the fracture load and two-body wear of zirconia crowns. Dent Mater 2020; 36(7):846-853 (IF: 4.495)	14

2.1.7. Mayinger F, Pfefferle R, Reichert A, Stawarczyk B. Impact of high-speed sintering of three-unit 3Y-TZP and 4Y-TZP fixed dental prostheses on fracture load with and without artificial aging. <i>Int J Prosthodont</i> 2020; in press (IF: 1.490)	15
2.2. Verarbeitung ästhetischer zahnfarbener Restaurationsmaterialien	16
2.2.1. Mayinger F, Reymus M, Liebermann A, Richter M, Kubryk P, Großekappenberg H, Stawarczyk B. Impact of polymerization and storage on the degree of conversion and mechanical properties of veneering resin composites. <i>Dent Mater J</i> 2020; advance online publication (IF: 1.359)	16
2.2.2. Wiedenmann F, Böhm D, Eichberger M, Edelhoff D, Stawarczyk B. Influence of different surface treatments on two-body wear and fracture load of monolithic CAD/CAM ceramics. <i>Clin Oral Investig</i> 2020; 24(9):3049-3060 (IF: 2.812)	18
2.2.3. Pfefferle R, Lümekemann N, Wiedenmann F, Stawarczyk B. Different polishing methods for zirconia: impact on surface, optical, and mechanical properties. <i>Clin Oral Investig</i> 2020; 24(1):395-403 (IF: 2.812)	20
2.2.4. Wiedenmann F, Liebermann A, Spintzyk S, Eichberger M, Stawarczyk B. Influence of Different Cleaning Procedures on Tensile Bond Strength Between Zirconia Abutment and Titanium Base. <i>Int J Oral Maxillofac Implants</i> 2019; 34(6):1318-1327 (IF: 2.320)	22
2.3. Befestigung ästhetischer zahnfarbener Restaurationsmaterialien	24
2.3.1. Wiedenmann F, Becker F, Eichberger M, Stawarczyk B. Measuring the polymerization stress of self-adhesive resin composite cements by crack propagation. <i>Clin Oral Investig</i> 2020; advance online publication (IF: 2.812)	24
2.3.2. Wiedenmann F, Klören M, Edelhoff D, Stawarczyk B. Bond strength of CAD/CAM and conventional veneering materials to different frameworks. <i>J Prosthet Dent</i> 2020; advance online publication (IF: 2.444)	26

2.3.3. Mayinger F, Fiebig M, Roos M, Eichberger M, Lümke mann N, Stawarczyk B. Bonding behavior between polyetheretherketone and polymethylmethacrylate acrylic denture polymer. J Adhes Dent 2020; in press (IF: 2.379)	28
3. Diskussion	30
4. Zusammenfassung	43
5. Literaturverzeichnis	46
6. Danksagung	59

1. Einleitung

Der Ersatz von Zähnen und verlorengegangener Zahnhartsubstanz zum Erhalt oder der Wiederherstellung von Funktion und Ästhetik durch eine prothetische Restauration erfordert eine Vielzahl zahnärztlicher und zahntechnischer Arbeitsschritte. Diese beginnen in der Regel mit der Zahnpräparation, gefolgt von einer analogen oder digitalen Abformung und der Wahl eines adäquaten Restaurationsmaterials. Die Herstellung erfolgt zunehmend in digitalisierten Prozessketten, wie der Konstruktion in Softwaremodulen (Computer-Aided Design [CAD]) und einer darauffolgenden maschinellen Fertigung (Computer-Aided Manufacturing [CAM]) im subtraktiven oder additiven Verfahren [71, 78]. Am Ende dieses Prozesses steht die Befestigung und/oder Eingliederung der Restauration am Patienten. Jede zahnmedizinische Indikation verlangt hier nach einer individuellen Lösung, die u. a. durch den Einsatz verschiedenster Werkstoffe sichergestellt werden kann.

Infolge der steigenden Ansprüche der Patienten an die Biokompatibilität und Ästhetik des Restaurationsmaterials wächst der Marktanteil dentaler Keramiken zusehends. Während leuzitverstärkte Keramiken im Frontzahnbereich auf Grund ihrer zahnschmelzähnlichen Transluzenz ein hohes ästhetisches Potential aufweisen [39], ist ihre Anwendung auf Grund der geringen Festigkeit im Seitenzahngebiet limitiert [30]. Die Weiterentwicklung von Lithiumsilikatkeramiken ermöglicht dem Anwender vor diesem Hintergrund einen hervorragenden Kompromiss zwischen Ästhetik und Funktion [39, 135]. Diese Materialgruppe besitzt aufgrund der hohen mechanischen Eigenschaften ein breites Indikationsspektrum für Einzelzahnrestorationen, von ästhetischen Veneer- und Kronenversorgungen im Frontzahnbereich bis hin zu monolithischen Onlays, Teilkronen und Kronen im Seitenzahngebiet [32, 44]. Zirkonoxide erweitern den Indikationsbereich dentaler Keramiken in den Bereich verschiedener Formen von Brücken, sowohl als monolithische als auch verblendete Variante [82, 120]. Während die erste und zweite Generation der Zirkonoxide durch herausragende mechanische Eigenschaften bestach [115], ermöglicht die Erhöhung des Yttriumoxid Gehalts in der dritten und vierten Generation eine Verbesserung der Transluzenz und damit des ästhetischen Erscheinungsbildes [14, 115].

Eine weitere große Werkstoffklasse stellen die Polymere dar, welche sowohl im direkten als auch indirekten Herstellungsverfahren breite Anwendung finden.

Die optischen und mechanischen Eigenschaften dimethacrylat-basierter Kunststoffe hängen stark von deren chemischer Zusammensetzung, wie dem Füllkörpergehalt, und deren Verarbeitung, von der Schichtung über die Aushärtung mit Polymerisationsgeräten, ab [12, 38, 48]. Ein wichtiger Punkt bei der Betrachtung dieser Werkstoffklasse ist auch deren Biokompatibilität, die eng mit der Konversionsrate der C=C Doppelbindungen verknüpft ist [23, 65]. Die rasante Entwicklung dentaler Werkstoffe in den letzten Jahren hat im Bereich der Hochleistungsthermoplaste zur Etablierung einer weiteren Materialgruppe geführt. Vertreter der Polyaryletherketon (PAEK) Familie stehen hier in einem besonderen Fokus, da sie eine Vielzahl an herausragenden Eigenschaften, wie eine hohe Biokompatibilität und Abrasionsbeständigkeit, hohe mechanische Festigkeiten und eine geringe Verfärbungsrate vorweisen [6, 50, 105, 110, 131]. Ihr weites Indikationsspektrum in der festsitzenden und herausnehmbaren Prothetik erlaubt neben der Herstellung von Kronen und Brücken auch die Verwendung als Implantatmaterial sowie die Substitution von Werkstoffen bei Klammer- oder Teleskopprothesen [6, 10, 77, 83, 90].

Neben der Materialelektion kommt der Herstellung, Verarbeitung und Befestigung der prothetischen Restauration eine wichtige Bedeutung zu. Während das Herausfräsen/-schleifen (subtraktives Herstellungsverfahren) aus industriell hergestellten Rohlingen bereits weitläufig eingesetzt wird [78], bietet ein Herstellungsverfahren im 3D-Druck (additives Herstellungsverfahren) zahlreiche Vorteile [59, 85]. Diese spiegeln sich neben der Einsparung von Zeit und Kosten in vielen Fällen auch in einem reduzierten Materialausschuss wider. Die additive Fertigung dentaler Versorgungen bringt hier neue Anforderungen hinsichtlich der zu verdruckenden Werkstoffe und deren Verarbeitung und Befestigung mit sich. Eine Optimierung des Herstellungsprozesses wird auch bei der Sinterung von Keramiken angestrebt: High-Speed-Sintern stellt hier eine zukunftssträchtige Alternative zu herkömmlichen Sinterprotokollen bei der Zirkonoxidkeramik dar [31, 116, 137].

Die Oberfläche einer zahnmedizinischen Restauration sollte im Labor und nach intraoralen Korrekturen gegebenenfalls am Patientenstuhl optimal vorbehandelt werden, um die Anlagerung von Plaque zu reduzieren, Rissbildungen und Frakturen zu unterbinden und die Gegenbezaahnung langfristig zu schonen [35, 55, 67, 87, 97, 98, 103]. Hier kommt der Oberflächenvergütung durch Glasur oder Hochglanzpolitur eine wichtige Bedeutung zu [5, 55, 67, 87, 97, 103].

Der letzte und grundlegende Schritt im zahntechnischen Labor ist die Reinigung der Restauration von Verschmutzungen, die während der Herstellung und Verarbeitung entstehen können. Hier werden unter anderem Ultraschall, Autoklav oder Kaltplasma angewendet, um z. B. nach der Verklebung von Metallbasis und Abutment einer Implantatkonstruktion die später den Klebespalt umgebenden Gewebe zu schützen und einer bakteriellen Infektion vorzubeugen [84]. Die sequentielle Reinigung ist auch essentiell, um eine stabile Verbindung des Befestigungsmaterials an die Innenfläche der Restauration und in Folge an die Zahnhartsubstanz zu gewährleisten [3].

Weitere wichtige Voraussetzungen für die dauerhaft erfolgreiche Befestigung von Restaurationen, sowohl an anderen Werkstoffen, als auch an der Zahnhartsubstanz, ist deren adäquate Vorbehandlung und die Wahl des geeigneten Befestigungsmaterials [89]. Je nach Werkstoff findet hier eine Vielzahl von aufeinanderfolgenden Arbeitsschritten statt, von einem primären Abstrahlen mit Aluminiumoxidpartikeln über eine sekundäre Ätzung bis hin zur finalen Applizierung eines Adhäsivsystems [130].

Die Herstellung, Verarbeitung und Befestigung einer prothetischen Versorgung umfasst somit eine Vielzahl diffiziler und potentiell fehlerbehafteter Schritte, die einen wesentlichen Einfluss auf den Langzeiterfolg einer Versorgung ausüben können. In diesem Rahmen sind werkstoffwissenschaftliche Untersuchungen zur Bestimmung der ästhetischen, chemischen und mechanischen Eigenschaften der gefertigten Restaurationen von großer Bedeutung. Die neuesten Entwicklungen in der Zusammensetzung dentaler Werkstoffe, deren Herstellungs- und Verarbeitungsprozesse und deren adhäsiver Befestigung sind zum jetzigen Zeitpunkt nur unzureichend erforscht.

Das Ziel dieser Arbeit war die In-vitro-Untersuchung der optischen, chemischen und mechanischen Eigenschaften zahnfarbener Restaurationsmaterialien und ihrer Langzeitstabilität in Hinblick auf deren Herstellung, Verarbeitung und adhäsiver Befestigung.

2. Originalarbeiten

2.1. Herstellung ästhetischer zahnfarbener Restaurationsmaterialien

Nachfolgend werden sieben Publikationen, in denen neu optimierte Materialzusammensetzungen im Bereich der Silikatkeramiken und Hochleistungsthermoplasten, und der zukunftssträngige Herstellungsprozess des High-Speed-Sinterns von Zirkonoxid untersucht wurden, vorgestellt.

2.1.1. Mayinger F, Lümckemann N, Musik M, Eichberger M, Stawarczyk B. Comparison of mechanical properties of different reinforced glass-ceramics. J Prosthet Dent 2020; advance online publication (IF: 2.444)

Das Ziel dieser Untersuchung war es, die Biegefestigkeit, die Martens Härte, das elastische Eindringmodul, die Bruchlast und die Abrasionsbeständigkeit der weiterentwickelten Lithiumdisilikatkeramik HS10PC im Vergleich mit der etablierten Lithiumdisilikatkeramik IPS e.max Press und der Leuzitkeramik IPS Empress Esthetic zu analysieren.

Hierzu wurden aus vier Presskeramiken (HS10PC, estetic ceram; IPS e.max Press low translucency und high translucency, sowie IPS Empress Esthetic, Ivoclar Vivadent) jeweils 85 Prüfkörper hergestellt (N = 340, n = 85/Gruppe). Die Prüfkörper wurden für die Untersuchung der Biegefestigkeit (n = 30/Untergruppe), der Martens Härte und des elastischen Eindringmoduls (n = 10/Untergruppe) und der Bruchlast gemäß dem Voss-Test nach künstlicher Alterung im Autoklav (n = 15/Untergruppe), künstlicher Alterung im Kausimulator (n = 15/Untergruppe) und keiner künstlichen Alterung (n = 15/Untergruppe) in vier Gruppen unterteilt. Darüber hinaus wurde die Abrasionsbeständigkeit (n = 10/Untergruppe) nach 240 000, 600 000 und 1 200 000 Kauzyklen gemessen. Die Daten wurden unter Verwendung einer globalen univariaten ANOVA, des post-hoc Scheffé-Tests, gepaarter t-Tests und der Weibull-Verteilung statistisch ausgewertet ($\alpha = 0,05$).

Die Ergebnisse zeigten, dass IPS e.max Press high translucency von allen Gruppen die höchste und IPS Empress Esthetic die niedrigste Biegefestigkeit und charakteristische Festigkeit aufwies. IPS Empress Esthetic zeigte für die Martens Härte, das elastische Eindringmodul und die Bruchlast bei Prüfkörpern, die im Autoklav und Kausimulator gealtert wurden, im Vergleich mit allen anderen Gruppen niedrigere Werte. Bei allen Gruppen wurde eine Zunahme der Abrasion der Keramik und des Schmelzantagonisten zwischen 240 000 und 1 200 000 Kauzyklen beobachtet. Nach 1 200 000 Kauzyklen zeigte HS10PC eine geringere Abrasion der Keramik als die anderen drei Werkstoffe.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Lithiumdisilikatkeramik HS10PC für die Biegefestigkeit, die Martens Härte, das elastische Eindringmodul, die Bruchlast und die Abrasionsbeständigkeit vergleichbare Ergebnisse zu der etablierten IPS e.max Press Keramik zeigte. Lithiumdisilikatkeramiken demonstrierten höhere mechanische Werte als die leuzitverstärkte Keramik IPS Empress Esthetic, während alle Keramiken ähnliche Ergebnisse für die Abrasionsbeständigkeit des Schmelzantagonisten zeigten. HS10PC kann somit im Hinblick auf die beobachteten mechanischen Eigenschaften für die klinische Anwendung empfohlen werden.

Originalarbeit: <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2020.06.027>

2.1.2. Micovic D, Mayinger F, Bauer S, Roos M, Eichberger M, Stawarczyk B.
Is the high-performance thermoplastic polyetheretherketone indicated as
a clasp material for removable dental prostheses? Clin Oral Investig 2020;
advance online publication (IF: 2.812)

Das Ziel dieser Untersuchung war es, die Retentionskraft von Prothesenklammern aus Polyetheretherketon im Vergleich mit einer Kobalt-Chrom-Molybdän-Kontrollgruppe nach Lagerung in künstlichem Speichel zu analysieren.

Hierzu wurden Klammern aus Polyetheretherketon gefräst (Dentokeep [PEEKmilled1], nt-trading; breCAM BioHPP Blank [PEEKmilled2], bredent) und gepresst (BioHPP Granulat für 2 press [PEEKpressed], bredent) oder aus Kobalt-Chrom-Molybdän gegossen (remanium GM 800+ [Kobalt-Chrom-Molybdän], DENTAURUM; N = 60, n = 15/Gruppe). Die Retentionskraft wurde in einem Abzugsversuch mit der Universalprüfmaschine (Zwick 1445) für jeden Prüfkörper 50 Mal ermittelt, wobei die Abzugskraft mit einer Traversengeschwindigkeit von 5 mm/min aufgebracht wurde, bis die Maximalkraft bei den verschiedenen Alterungsgraden um 10 % abfiel: I. initial, nach Lagerung in künstlichem Speichel für II. 90 und III. 180 Tage. Die Daten wurden unter Verwendung einer einfachen ANOVA, des post-hoc Scheffé-Tests und gemischten Modellen statistisch ausgewertet ($\alpha = 0,05$).

Die Ergebnisse zeigten, dass Kobalt-Chrom-Molybdän die höchste Retentionskraft aufwies. Es wurden keine Unterschiede zwischen den Polyetheretherketonmaterialien beobachtet. Kobalt-Chrom-Molybdän zeigte eine signifikante Abnahme seiner Werte nach künstlicher Alterung, während die Polyetheretherketonmaterialien im Laufe der Alterung konstante Ergebnisse vorwiesen. Obwohl PEEKmilled2 und Kobalt-Chrom-Molybdän anfänglich einen Anstieg der Retentionskraft im Rahmen einer wiederholten Ein- und Ausgliederung zeigten, konnte letztendlich bei allen getesteten Gruppen eine Abnahme der Retentionskraft beobachtet werden.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass weder der Herstellungsprozess noch die künstliche Alterung einen Einfluss auf die Retentionskraft der Polyetheretherketonklammern ausübten.

Obwohl die Kontrollgruppe signifikant höhere Ergebnisse zeigte, deutet die für die Polyetheretherketonmaterialien beobachtete Retentionskraft auf eine mögliche klinische Anwendung hin.

Originalarbeit: <https://doi.org/10.1007/s00784-020-03603-y>

2.1.3. Mayinger F, Micovic D, Schleich A, Roos M, Eichberger M, Stawarczyk B. Retention force of polyetheretherketone and cobalt-chrome-molybdenum removable dental prosthesis clasps after artificial aging. Clin Oral Investig 2020; advance online publication (IF: 2.812)

Das Ziel dieser Untersuchung war es, die Retentionskraft von Prothesenklammern aus Polyetheretherketon im Vergleich mit einer Kobalt-Chrom-Molybdän- Kontrollgruppe nach Lagerung in Wasser und künstlicher Alterung zu analysieren.

Hierzu wurden für jedes Material fünfzehn Bonwill-Klammern mit retentiven bukkalen und reziproken lingualen Armen für den zweiten Prämolaren und den ersten Molaren aus Polyetheretherketon gefräst (Dentokeep [PEEKmilled1], nt-trading; breCAM BioHPP Blank [PEEKmilled2], bredent) und gepresst (BioHPP Granulat für 2 press [PEEKpressed], bredent) oder aus Kobalt-Chrom-Molybdän gegossen (remanium GM 800+ [Kobalt-Chrom-Molybdän], DENTAURUM; N = 60, n = 15/Gruppe). Insgesamt wurden für jeden Prüfkörper pro Alterungsstufe (I. initial, II. nach Lagerung [30 Tage, 37 °C] und 10 000 Thermozyklen und III. nach Lagerung [60 Tage, 37 °C] und 20 000 Thermozyklen) 50 Retentionskraftmessungen in einem Abzugsversuch durchgeführt. Die Daten wurden unter Verwendung einer einfachen ANOVA, des post-hoc Scheffé-Tests und gemischten Modellen statistisch ausgewertet ($\alpha = 0,05$).

Die Ergebnisse zeigten, dass PEEKpressed und PEEKmilled1 initial die niedrigsten Ergebnisse vorwiesen, während PEEKmilled2 die höchsten Werte präsentierte. Nach künstlicher Alterung wurde die höchste Retentionskraft bei der Kontrollgruppe beobachtet. Der Einfluss der künstlichen Alterung war bei Polyetheretherketonmaterialien signifikant höher. Während PEEKmilled2 und PEEKpressed eine anfängliche Abnahme der Retentionskraft vorwiesen, zeigten alle anderen Gruppen keinen Einfluss oder eine Zunahme der Retentionskraft bei wiederholter Ein- und Ausgliederung der Klammern.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass PEEKmilled2 innerhalb der getesteten Polyetheretherketonmaterialien bessere Ergebnisse als PEEKpressed vorwies.

Obwohl Kobalt-Chrom-Molybdän nach künstlicher Alterung höhere Werte zeigte, wiesen alle Materialien eine ausreichende Retention auf, um eine Verwendung unter klinischen Bedingungen empfehlen zu können.

Originalarbeit: <https://doi.org/10.1007/s00784-020-03642-5>

- 2.1.4. Schönhoff LM, Mayinger F, Eichberger M, Lösch A, Reznikova E, Stawarczyk B. Three-dimensionally printed and milled polyphenylene sulfone materials in dentistry: Tensile bond strength to veneering composite resin and surface properties after different pretreatments. J Prosthet Dent 2020; in press (IF: 2.444)

Das Ziel dieser Untersuchung war es, die Oberflächeneigenschaften und die Zugfestigkeit von Polyphenylsulfon (PPSU) zu einem Verblendkomposit im Vergleich mit einer Polyetheretherketon Kontrollgruppe zu analysieren.

Hierzu wurden Substrate aus den Rohmaterialien Gehr PPSU (PPSU-B1, GEHR), Radel R-5000 NT (PPSU-B2, Solvay) und Juvora Dental Disc (PEEK-CG, JUVORA) herausgeschnitten, während Substrate aus FIL-A-GEHR PPSU (PPSU-3D, GEHR) dreidimensional gedruckt wurden (N = 504, n = 126/Gruppe). Die Zugfestigkeit zu einem Verblendkomposit (CeramageUp, SHOFU DENTAL) wurde initial, nach 5 000 und 10 000 Thermozyklen untersucht und die Frakturtypen analysiert. Die freie Oberflächenenergie und Oberflächenrauigkeit wurden nach Vorbehandlung mit Aluminiumoxid (Al₂O₃)-Partikeln verschiedener Korngrößen (50 µm und 110 µm), die mit unterschiedlichem Druck (0,1 MPa, 0,2 MPa oder 0,4 MPa) appliziert wurden, nach Vorbehandlung mit Siliziumdioxid (SiO₂)-beschichtetem Al₂O₃-Partikeln (0,28 MPa), nach Vorbehandlung mit Schwefelsäure oder nach Politur bestimmt. Eine qualitative Oberflächencharakterisierung wurde mit einem Rasterelektronenmikroskop durchgeführt. Die Daten wurden unter Verwendung einer einfachen ANOVA, des Kruskal-Wallis- und Mann-Whitney-U-Tests und der Spearman Korrelation statistisch ausgewertet ($\alpha = 0,05$).

Die Ergebnisse zeigten, dass PPSU-3D und PEEK-CG höhere Zugfestigkeitswerte als PPSU-B1 und PPSU-B2 vorwiesen. Die Zugfestigkeitswerte waren initial höher als nach 10 000 Thermozyklen. Ein adhäsives Versagen der Bindung zwischen Substrat und Verblendkomposit wurde am häufigsten beobachtet. Mit wenigen Ausnahmen zeigte PEEK-CG innerhalb einer Vorbehandlung höhere freie Oberflächenenergiewerte als alle anderen Werkstoffe, während PPSU-3D und PEEK-CG beständig hohe Rauigkeitswerte vorwiesen. Die Erhöhung des Drucks und der Partikelgröße führte zu einer Zunahme der freien Oberflächenenergie und Rauigkeit.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass additiv hergestellte PPSU-3D Substrate vergleichbare Zugfestigkeitswerte zu dem Verblendkomposit wie das etablierte Polyetheretherketon zeigten. Die für Polyetheretherketon entwickelten Vorbehandlungsmethoden stellen valide Strategien dar, um sowohl die freie Oberflächenenergie, als auch die Rauigkeit des Hochleistungskunststoffes Polyphenylsulfon zu erhöhen und eine klinisch erfolgreiche ästhetische Verblendung von Polyphenylsulfonrestorationen zu ermöglichen.

Originalarbeit: <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2020.12.042>

2.1.5. Jerman E, Wiedenmann F, Eichberger M, Reichert A, Stawarczyk B. Effect of high-speed sintering on the flexural strength of hydrothermal and thermo-mechanically aged zirconia materials. Dent Mater 2020; 36(9):1144-1150 (IF: 4.495)

Das Ziel dieser Untersuchung war es, den Einfluss von High-Speed- und herkömmlichen Sinterprotokollen auf die Biegefestigkeit von drei Zirkonoxidwerkstoffen initial und nach künstlicher Alterung zu analysieren.

Hierzu wurden gefräste Zirkonoxidprüfkörper (3Y-TZP: ZI und Zolid, 4Y-TZP: Zolid HT+, Amann Girrbach; N = 288, n = 96/Gruppe) in einem High-Speed-Sinterprotokoll (Endtemperatur 1580 °C;) oder einem herkömmlichen Sinterprotokoll (Kontrollgruppe; Endtemperatur 1450 °C; n = 48/Untergruppe) gesintert. Die Biegefestigkeit wurde initial und nach künstlicher Alterung (zehn Stunden im Autoklav bei 134 ± 2 °C und 0,2 MPa oder 1 200 000 Kauzyklen; n = 16/Untergruppe) getestet. Die Daten wurden unter Verwendung univariater ANOVAs, des partiellen Eta-Quadrats, des post-hoc Scheffé-, Kolmogorov-Smirnov-, Kruskal-Wallis- und Mann-Whitney-U-Tests statistisch ausgewertet und der Weibull-Modul bestimmt ($\alpha = 0,05$).

Die Ergebnisse zeigten, dass unabhängig von den Sinterprotokollen und Alterungsschemata ZI die höchste und HT+ die niedrigste Biegefestigkeit vorwies. High-Speed gesintertes HT+ präsentierte höhere initiale Biegefestigkeitswerte als die Kontrollgruppe. ZI und Zolid zeigten nach thermo-mechanischer Alterung höhere Biegefestigkeitswerte. High-Speed gesintertes HT+ wies initial eine höhere Biegefestigkeit vor.

Der Weibull-Modul der drei thermomechanisch gealterten Werkstoffe wurde durch das High-Speed-Sintern negativ beeinflusst.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass das 3Y-TZP Material ZI die höchste und das 4Y-TZP Material HT+ die niedrigste Biegefestigkeit vorwies. Während die Wahl des Sinterprotokolls bei den untersuchten 3Y-TZP Zirkonoxidmaterialien keine Auswirkung auf die Biegefestigkeit zeigte, konnte für 4Y-TZP eine Steigerung der Biegefestigkeitswerte beobachtet werden.

Das kosten- und zeiteffiziente High-Speed-Sintern kann somit im Hinblick auf die beobachteten mechanischen Eigenschaften für die klinische Anwendung empfohlen werden.

Originalarbeit: <https://doi.org/10.1016/j.dental.2020.05.013>

2.1.6. Wiedenmann F, Pfefferle R, Reichert A, Jerman E, Stawarczyk B. Impact of high-speed sintering, layer thickness and artificial aging on the fracture load and two-body wear of zirconia crowns. *Dent Mater* 2020; 36(7):846-853 (IF: 4.495)

Das Ziel dieser Untersuchung war es, den Einfluss des High-Speed-Sinterns, der Schichtdicke und der künstlichen Alterung im Kausimulator auf den Zwei-Körper-Verschleiß und die Bruchlast von 4Y-TZP Kronen zu analysieren.

Hierzu wurden aus 4Y-TZP Zirkonoxid (Ceramill Zolid HT+, Amann Girrbach) Kronen in drei verschiedenen Schichtstärken (0,5 mm, 1,0 mm, 1,5 mm; N = 192, n = 64/Gruppe) mittels CAD/CAM-Technologie hergestellt und bei 1580 °C (High-Speed-Sintern) oder 1450 °C (Kontrollgruppe) gesintert. Die Prüfkörper wurden in zwei Schritten poliert und mit Hilfe von Multilink Automix (Ivoclar Vivadent) auf standardisierten Kobalt-Chromstümpfen befestigt. Der Zwei-Körper-Verschleiß wurde nach 6 000 Thermo- und 1 200 000 Kauzyklen unter Verwendung von Schmelzantagonisten mittels Best Fit Methodik bestimmt. Die Bruchlast wurde vor und nach der künstlichen Alterung getestet. Die Daten wurden unter Verwendung univariater ANOVAs, des post-hoc Scheffé-Tests, ungepaarter t-Tests und des Kruskal-Wallis- und Mann-Whitney-U-Tests statistisch ausgewertet ($\alpha = 0,05$).

Die Ergebnisse zeigten, dass das High-Speed-Sintern in weniger Zwei-Körper-Verschleiß des Zirkonoxids resultierte als das herkömmliche Sintern. Das High-Speed-Sintern und die Zunahme der Schichtdicke führten zu höheren Bruchlastwerten, während die künstliche Alterung eine Verringerung der Bruchlast Werte nach sich zog.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass das kosten- und zeiteffiziente High-Speed-Sintern vielversprechende mechanische Ergebnisse zeigte, da es sowohl zu einem geringeren Zwei-Körper-Verschleiß des Zirkonoxids als auch zu vergleichbaren oder sogar höheren Bruchlastergebnissen wie die Kontrollgruppe führte. Die klinische Implementierung von High-Speed-Sinterprotokollen könnte somit neben der Einsparung von Zeit und Kosten die mechanischen Eigenschaften von Zirkonoxidrestorationen verbessern.

Originalarbeit: <https://doi.org/10.1016/j.dental.2020.04.004>

2.1.7. Mayinger F, Pfefferle R, Reichert A, Stawarczyk B. Impact of high-speed sintering of three-unit 3Y-TZP and 4Y-TZP fixed dental prostheses on fracture load with and without artificial aging. *Int J Prosthodont* 2020; in press (IF: 1.490)

Das Ziel dieser Untersuchung war es, den Einfluss des High-Speed-Sinterns und der künstlichen Alterung im Kausimulator auf die Bruchlast von dreigliedrigen Zirkonoxid Brücken zu analysieren.

Hierzu wurden aus 3Y-TZP (Ceramill Zolid, Amann Girrbach) und 4Y-TZP (Ceramill Zolid HT+, Amann Girrbach; N = 128, n = 64/Gruppe) dreigliedrige Brücken hergestellt und bei 1580 °C (High-Speed-Sintern) oder 1450 °C (Kontrollgruppe; n = 32/Untergruppe) gesintert. Die Prüfkörper wurden mit Hilfe von Multilink Automix (Ivoclar Vivadent) auf Stahlstümpfen befestigt und initial oder nach künstlicher Alterung mit 6 000 Thermo- (5 °C/55 °C) und 1 200 000 Kauzyklen (50 N; n = 16/Untergruppe) auf Bruchlast untersucht. Die Daten wurden unter Verwendung univariater ANOVAs, ungepaarter t-Tests statisch ausgewertet und der Weibull-Modul bestimmt ($\alpha = 0,05$).

Die Ergebnisse zeigten, dass weder das Sinterprotokoll, noch die künstliche Alterung, noch das Zirkonoxidmaterial einen Einfluss auf die Bruchlast der dreigliedrigen Brücken ausübte. Das High-Speed-Sintern führte bei künstlich gealterten HT+ Prüfkörpern zu einem überlegenen Weibull-Modul, während alle anderen Gruppen Resultate im gleichen Wertebereich vorwiesen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass das 4Y-TZP Material ähnliche Bruchlastergebnisse wie das bewährte 3Y-TZP Zirkonoxid vorwies. Die künstliche Alterung hatte weder bei 3Y-TZP noch bei 4Y-TZP einen Einfluss auf die Bruchlast des Zirkonoxids. Die vorliegende Untersuchung zeigt vielversprechende Ergebnisse für die klinische Anwendung des fortschrittlichen High-Speed-Sinterprotokolls, da es zu einer vergleichbaren Bruchlast und einem ähnlichen oder sogar überlegenen Weibull-Modul führte, wie sie für die Kontrollgruppe beobachtet wurden.

Originalarbeit: <https://doi.org/10.11607/ijp.6775>

2.2. Verarbeitung ästhetischer zahnfarbener Restaurationsmaterialien

Entwicklungen in der Herstellung dentaler Restaurationsmaterialien bringen neue Anforderungen an die Verarbeitung dieser Werkstoffe mit sich. Nachfolgend werden vier Publikationen, in denen der Einfluss unterschiedlicher Nachbearbeitungen, von der Nachbelichtung über die Politur zur abschließenden Reinigung, untersucht wurde, vorgestellt.

2.2.1. Mayinger F, Reymus M, Liebermann A, Richter M, Kubryk P, Großekappenberg H, Stawarczyk B. Impact of polymerization and storage on the degree of conversion and mechanical properties of veneering resin composites. Dent Mater J 2020; advance online publication (IF: 1.359)

Das Ziel dieser Untersuchung war es, die Konversionsrate, die Martens Härte, das elastische Eindringmodul und die Biegefestigkeit von drei Verblendkompositen, die mit fünf unterschiedlichen Polymerisationslampen ausgehärtet wurden, nach Lagerung zu analysieren.

Hierzu wurden Prüfkörper aus SR Nexco Paste (Ivoclar Vivadent), Ceramage Incisal (SHOFU DENTAL) und Gradia Plus (GC Europe; N = 180, n = 60/Gruppe) mit I. bre.Lux Power Unit (bredent), II. Labolight DUO (GC Europe), III. Otoflash G171 (NK Optik), IV. LC-3DPrint Box (NextDent) oder V. PCU-LED (Dreve ProDiMed) polymerisiert (n = 12/Untergruppe). Die Konversionsrate, die Martens Härte und das elastische Eindringmodul wurden nach unterschiedlichen Lagerungsintervallen (23 °C; natürliches Licht: direkt nach Polymerisation, sieben Stunden nach Polymerisation und einen, zwei, drei, vier, sieben und vierzehn Tage nach Polymerisation) untersucht. Anschließend wurde die Biegefestigkeit bestimmt. Die Daten wurden unter Verwendung univariater ANOVAs, des Kruskal-Wallis-, Mann-Whitney-U-, Wilcoxon- und Friedman-Tests statistisch ausgewertet ($\alpha = 0,05$).

Die Ergebnisse zeigten, dass eine Polymerisation mit Otoflash G171 und Labolight DUO zu einem Anstieg der Konversionsrate, der Martens Härte und des elastischen Eindringmoduls führte. Ceramage Incisal zeigte die niedrigste Konversionsrate und die höchsten Martens Parameter, während SR Nexco Paste die höchste Konversionsrate und die niedrigsten Martens Parameter vorwies.

Innerhalb der Gruppen, die mit Otoflash G171, Laboligth DUO und PCU LED polymerisiert wurden, zeigte Ceramage Incisal die höchste Biegefestigkeit. Die Lagerung hatte bei Prüfkörpern, die mit Otoflash G171 oder Labolight DUO ausgehärtet wurden, keinen Einfluss auf die Konversionsrate, die Martens Härte oder das elastische Eindringmodul.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass bei den untersuchten Verblendkompositen eine inverse Beziehung zwischen der Konversionsrate einerseits und der Menge an Füllstoffen und den mechanischen Eigenschaften andererseits beobachtet wurde. Eine Verlängerung der Lagerzeit kann klinisch nicht empfohlen werden, da die Lagerung bei Prüfkörpern, welche mit den Polymerisationsgeräten ausgehärtet wurden, die ansonsten überlegene Ergebnisse lieferten, keinen Einfluss auf die analysierten Parameter zeigte.

Originalarbeit: <https://doi.org/10.4012/dmj.2019-394>

2.2.2. Wiedenmann F, Böhm D, Eichberger M, Edelhoff D, Stawarczyk B. Influence of different surface treatments on two-body wear and fracture load of monolithic CAD/CAM ceramics. Clin Oral Investig 2020; 24(9):3049-3060 (IF: 2.812)

Das Ziel dieser Untersuchung war es, den Zwei-Körper-Verschleiß und die Bruchlast monolithischer Keramiken nach verschiedenen Oberflächenbehandlungen zu analysieren.

Hierzu wurden mittels CAD/CAM Technologie Prüfkörper aus Zirkonoxid (ZENOS[®]Star ZR translucent, Wieland Dental + Technik), Lithiumdisilikat (IPS e.max CAD, Ivoclar Vivadent) und leuzitverstärkter Keramik (IPS Empress CAD, Ivoclar Vivadent; N = 180, n = 60/Gruppe) hergestellt und den folgenden Behandlungen unterzogen: I. Schleifen + Polieren, II. Schleifen + Glasieren, III. Schleifen oder IV. Glasieren (n = 15/Untergruppe). Um den Zwei-Körper Verschleiß nach 120 000 und 1 200 000 Kauzyklen zu bestimmen, wurden 3D-Messungen der keramischen Kronen und Antagonisten und rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen durchgeführt. Die Bruchlast wurde für alle Prüfkörper untersucht. Die Daten wurden unter Verwendung einer einfachen ANOVA, des post-hoc Scheffé-, Kolmogorov-Smirnov-, Kruskal-Wallis-, Mann-Whitney-U- und Wilcoxon-Tests statistisch ausgewertet ($\alpha = 0,05$).

Die Ergebnisse zeigten, dass ZENOS[®]Star ZR translucent unabhängig von der Vorbehandlung die höchsten Bruchlastwerte erreichte, während IPS Empress CAD die niedrigsten Werte vorwies. Der Zwei-Körper Verschleiß der Keramik und des Antagonisten nahm zwischen 120 000 und 1 200 000 Kauzyklen zu. Für die Vorbehandlungen Schleifen + Polieren, Schleifen + Glasieren und Glasieren zeigte ZENOS[®]Star ZR translucent den geringsten Verschleiß der Keramik, wobei es zeitgleich zum höchsten Verschleiß des Antagonisten führte. Schleifen + Polieren resultierte im geringsten Verschleiß für ZENOS[®]Star ZR translucent, während Schleifen zum höchsten Antagonistenverschleiß führte. IPS e.max CAD Prüfkörper wiesen nach dem alleinigen Glasieren den höchsten Verschleiß der Keramik und des Antagonisten auf, während Schleifen + Polieren zum geringsten Antagonistenverschleiß führte. Schleifen + Glasieren führte bei IPS Empress CAD zum höchsten Antagonistenverschleiß.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die drei getesteten Keramiken auch für Restaurationen im Seitenzahnbereich empfohlen werden können, da die Bruchlast die maximalen Kaukräfte überstieg.

Während die Glasur zu einem höheren Verschleiß und einer Beeinträchtigung der Bruchlast führte, verbesserte die Politur die mechanischen Eigenschaften bei weitgehender Erhaltung des Antagonisten. Die Politur monolithischer Keramiken ist der Glasur nach extra- und intraoralen Korrekturen im klinischen Alltag somit vorzuziehen.

Originalarbeit: <https://doi.org/10.1007/s00784-019-03173-8>

2.2.3. Pfefferle R, Lümke N, Wiedenmann F, Stawarczyk B. Different polishing methods for zirconia: impact on surface, optical, and mechanical properties. Clin Oral Investig 2020; 24(1):395-403 (IF: 2.812)

Das Ziel dieser Untersuchung war es, den Einfluss unterschiedlicher Polierstrategien auf die Transluzenz, die freie Oberflächenenergie, die Oberflächenrauigkeit und die Biegefestigkeit von Zirkonoxid zu analysieren.

Hierzu wurden 108 Zirkonoxidprüfkörper (Ceramill Zolid HT+, Amann Girrbach) in neun Gruppen aufgeteilt (N = 108, n = 12/Gruppe).

Sieben Gruppen wurden im Weißzustand entweder I. mit einer Filzscheibe, II. mit einer Filzscheibe in Kombination mit einer Polierpaste, III. mit einer Ziegenhaarbürste, IV. mit einer Ziegenhaarbürste in Kombination mit einer Polierpaste, V. mit einem Grünzustand Ausarbeitungsset, VI. mit einem Universalpolierer oder VII. mit SiC Schleifpapier poliert und anschließend gesintert. Danach wurden die sieben Gruppen in jeweils zwei Untergruppen aufgeteilt und mit i. einem Feinpolierer (einstufig; n = 6/Untergruppe) oder ii. einem Grob- und Feinpolierer (zweistufig; n = 6/Untergruppe) poliert. Die positive Kontrollgruppe wurde in zwei Schritten gesintert und poliert. Die nicht polierte Gruppe fungierte als negative Kontrollgruppe. Die Transluzenz wurde nach dem Polieren im Weißstadium und Sintern und nach dem Polieren im gesinterten Zustand gemessen. Die freie Oberflächenenergie, die Oberflächenrauigkeit und die Biegefestigkeit wurden bestimmt. Die Daten wurden unter Verwendung einer einfach ANOVA, des Tukey-B-Post-Hoc-, Wilcoxon- und t-Tests statistisch ausgewertet ($\alpha = 0,05$).

Die Ergebnisse zeigten, dass eine Politur mit einer Filzscheibe in Kombination mit einer Polierpaste, einer Ziegenhaarbürste, einem Grünzustand Ausarbeitungsset, einem Universalpolierer und SiC Schleifpapier nach einer einstufigen Politur reduzierte Transluzenzwerte vorwies, während eine Politur mit einer Filzscheibe in Kombination mit einer Polierpaste, einer Ziegenhaarbürste, einer Ziegenhaarbürste in Kombination mit einer Polierpaste, einem Grünzustand Ausarbeitungsset und einem Universalpolierer reduzierte Transluzenzwerte nach einer zweistufigen Politur zeigte. Die Vorbehandlung mit einer Filzscheibe wies sowohl nach einer Politur im Weißzustand, als auch nach einer Politur in ein oder zwei Schritten die höchsten Transluzenzwerte vor.

Die Vorbehandlung mit SiC Schleifpapier resultierte in der niedrigsten freien Oberflächenenergie. Eine zweistufige Politur führte für die Vorbehandlung mit einer Filzscheibe, einer Filzscheibe in Kombination mit einer Polierpaste, einer Ziegenhaarbürste, einem Grünzustand Ausarbeitungsset, einem Universalpolierer und SiC Schleifpapier zu einer niedrigeren Oberflächenrauigkeit und in allen Gruppen zu einer höheren Biegefestigkeit.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass das zweistufige Polieren im gesinterten Zustand, insbesondere in Kombination mit einer Polierpaste, die Oberflächenrauigkeit verringerte und die Transluzenz und Biegefestigkeit erhöhte. Die klinische Etablierung einer Politur im Weißzustand könnte neben der Einsparung von Materialien und Zeit auch die mechanischen und optischen Eigenschaften der gefertigten Zirkonoxidrestorationen optimieren.

Originalarbeit: <https://doi.org/10.1007/s00784-019-02953-6>

2.2.4. Wiedenmann F, Liebermann A, Spintzyk S, Eichberger M, Stawarczyk B. Influence of Different Cleaning Procedures on Tensile Bond Strength Between Zirconia Abutment and Titanium Base. Int J Oral Maxillofac Implants 2019; 34(6):1318-1327 (IF: 2.320)

Das Ziel dieser Untersuchung war es, die Zugfestigkeit zwischen Zirkonoxidabutments und Titanbasen, die mit zwei verschiedenen Befestigungsmaterialien verklebt wurden, nach unterschiedlichen Reinigungsprotokollen zu analysieren.

Hierzu wurden Zirkonoxidabutments (IPS e.max ZirCAD, Ivoclar Vivadent) und Titanbasen (CONELOG Titanbasen CAD/CAM, CAMLOG) mit einem Befestigungskomposit auf Dimethacrylat (DMA)/2-Hydroxyethylmethacrylat (HEMA)-Basis (Multilink Hybrid Abutment, Ivoclar Vivadent) oder Bisphenol-A-Glycidylmethacrylat (Bis-GMA)/Triethylenglykoldimethacrylat (TEGDMA)-Basis (Panavia V5, Kuraray Europe; N = 160, n = 80/Gruppe) verklebt. Der Klebespalt wurde bei der Hälfte der Prüfkörper poliert (n = 40/Untergruppe). Rauigkeitsmessungen und Rasterelektronenmikroskopieaufnahmen wurden an vier separaten Prüfkörpern durchgeführt. Die Prüfkörper wurden für die unterschiedlichen Reinigungsprotokolle in vier Gruppen aufgeteilt (n = 10/Untergruppe): I. nicht gereinigt, II. in einem Ultraschallbad gereinigt, III. in einem Autoklav gereinigt und IV. mit Niederdruckplasma behandelt. Nach der künstlichen Alterung mit 20 000 Thermozyklen wurde die Zugfestigkeit geprüft und die Frakturtypen analysiert. Die Daten wurden unter Verwendung einer univariaten ANOVA, des partiellen Eta-Quadrats, des Kolmogorov-Smirnov- und Mann-Whitney-U-Tests und einer Bonferroni-Korrektur statistisch ausgewertet ($\alpha = 0,003$).

Die Ergebnisse zeigten, dass die Zugfestigkeitswerte von Prüfkörpern, die mit dem Befestigungsmaterial auf DMA/HEMA-Basis befestigt wurden, höher waren als die Werte von Prüfkörpern, die mit dem Befestigungskomposit auf Bis-GMA/TEGDMA-Basis befestigt wurden. Die Politur und die Reinigungsprotokolle zeigten keinen Einfluss auf die Zugfestigkeit. Prüfkörper, die mit dem Befestigungsmaterial auf DMA/HEMA-Basis verklebt wurden, wiesen mehr kohäsive Frakturen auf, während Prüfkörper, die mit dem Befestigungskomposit auf Bis-GMA/TEGDMA-Basis verklebt wurden, mehr Frakturen an der Grenzfläche zwischen dem Befestigungsmaterial und dem Zirkonoxidabutment zeigten. Die Rauigkeitswerte nahmen bei beiden Befestigungskomposite nach der Politur ab.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass weder die Politur noch die Anwendung verschiedener Reinigungsprotokolle einen Einfluss auf die Zugfestigkeit zeigten. Da das Befestigungsmaterial auf DMA/HEMA-Basis höhere Zugfestigkeitswerte vorwies, kann dieser Befestigungskomposit für die Verklebung von Implantatabutments und Titanbasen im klinischen Arbeitsablauf empfohlen werden.

Originalarbeit: <https://doi.org/10.11607/jomi.7638>

2.3. Befestigung ästhetischer zahnfarbener Restaurationsmaterialien

Die Verarbeitung dentaler Restaurationsmaterialien, von der Vorbehandlung durch Oberflächenvergrößerung und -konditionierung mit Adhäsivsystemen zu unterschiedlichen Reinigungsprotokollen, bestimmt auch den Verbund zwischen den unterschiedlichen Werkstoffen sowie zum natürlichen Zahn. Nachfolgend werden drei Publikationen, in denen zum einen der Einfluss des Befestigungsmaterials auf den Restaurationswerkstoff, und zum anderen der Verbund zu CAD/CAM gefertigten Werkstoffen und dem Hochleistungsthermoplast Polyetheretherketon untersucht wurden, vorgestellt.

2.3.1. Wiedenmann F, Becker F, Eichberger M, Stawarczyk B. Measuring the polymerization stress of self-adhesive resin composite cements by crack propagation. Clin Oral Investig 2020; advance online publication (IF: 2.812)

Das Ziel dieser Untersuchung war es, die Polymerisationsspannung von neun selbstadhäsiven Befestigungskompositen und einem Glasionomerzement zu analysieren.

Hierzu wurde der Risswachstum einer Silikatkeramik (VITABLOCS Mark II, VITA Zahnfabrik; N = 130) durch die Messung von Risslängen, die von Vickers-Eindrücken herrührten, vor und nach dem Aufbringen und der Polymerisation unterschiedlicher Befestigungsmaterialien (I. G-CEM, GC Europe; II. iCEM, Kulzer; III. Bifix SE, VOCO; IV. Maxcem Elite, KerrHawe; V. PANA VIA SA, Kuraray Europe; VI. SoloCem, Coltène/Whaledent; VII. SmartCem 2, Dentsply Sirona; VIII. SpeedCEM, Ivoclar Vivadent; IX. RelyX Unicem 2, 3M; X. Ketac Cem, 3M) bestimmt. Die Ergebnisse für das Risswachstum wurden in Polymerisationsspannungswerte umgerechnet. Die Daten wurden unter Verwendung einer einfachen ANOVA und des post-hoc Scheffé-Tests statistisch ausgewertet ($\alpha = 0,05$).

Die Ergebnisse zeigten, dass SmartCem 2 höhere Polymerisationsspannungswerte als iCEM, SoloCem und Ketac Cem vorwies, während Ketac Cem niedrigere Werte als Bifix SE, Maxcem Elite, SmartCem 2, SpeedCEM und RelyX Unicem 2 präsentierte.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass sich selbstadhäsive Befestigungskomposite in ihrer Polymerisationsspannung, einem Faktor, der die Haltbarkeit einer Restauration beeinträchtigen kann, unterscheiden. In der klinischen Anwendung sollten Materialien mit niedrigerer Polymerisationsspannung für die Befestigung von Silikatkeramikrestorationen, welche eine geringe Biegefestigkeit vorweisen, bevorzugt werden.

Originalarbeit: <https://doi.org/10.1007/s00784-020-03391-5>

2.3.2. Wiedenmann F, Klören M, Edelhoff D, Stawarczyk B. Bond strength of CAD/CAM and conventional veneering materials to different frameworks. J Prosthet Dent 2020; advance online publication (IF: 2.444)

Das Ziel dieser Untersuchung war es, die Scherfestigkeit zwischen zwei digitalen und drei konventionellen Verblendungen und drei verschiedenen Substraten zu analysieren.

Hierzu wurden Substrate aus Zirkonoxid (Lava CNC 500, 3M), Kobalt-Chrom (ZENOTEC NP, Wieland Dental + Technik) und Titan (Reintitan Grad 4) und CAD/CAM-gefertigte (Lava Ultimate [LVU], 3M und VITABLOCS Mark II [VMII], VITA Zahnfabrik) und konventionell hergestellte Verblendzylinder (VM9, VM13 und VITA TITANKERAMIK [VTI], VITA Zahnfabrik) mit drei verschiedenen Kompositen (RelyX Unicem, RelyX Ultimate und Sinfony; 3M) nach unterschiedlichen Vorbehandlungen verklebt (n = 18/Untergruppe). Die Hälfte der Prüfkörper wurde vor der Scherfestigkeitsprüfung einer künstlichen Alterung mit 10 000 Thermozyklen unterzogen. Die Frakturtypen wurden analysiert. Die Daten wurden unter Verwendung einer einfachen univariaten ANOVA, des Kruskal-Wallis- und des Mann-Whitney-U-Tests statistisch ausgewertet ($\alpha = 0,05$).

Die Ergebnisse zeigten, dass die mit RelyX Unicem verklebten Kobalt-Chrom-Substrate die höchsten Scherfestigkeitswerte vorwiesen. Mit RelyX Ultimate verklebte Zirkonoxidsubstrate zeigten höhere Scherfestigkeitswerte als Reintitansubstrate, während mit Sinfony verklebte Zirkonoxidsubstrate eine höhere Scherfestigkeit als Kobalt-Chrom-Substrate aufwiesen. Gruppen, die mit Sinfony verblendet wurden, zeigten niedrigere Scherfestigkeitswerte als sie für VM9, VM13 oder VTI beobachtet wurden. Mit Sinfony verblendete LVU- und VMII-Substrate wiesen eine niedrigere Scherfestigkeit auf.

Die künstliche Alterung mit Thermozyklen führte bei den meisten Gruppen zu einer Verringerung der Scherfestigkeit. Mit Sinfony verblendete Substrate und mit RelyX Ultimate verblendete VMII-Substrate zeigten niedrigere Scherfestigkeitswerte als sie für VM9, VM13, VTI und verblendete Zirkonoxidsubstrate, die mit Sinfony oder RelyX Ultimate verklebt wurden, festgestellt werden konnten. Ein adhäsives Versagen der Bindung wurde am häufigsten beobachtet.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass Zirkonoxidsubstrate nach Konditionierung mit einem 10-Methacryloyloxydecyl-dihydrogen-phosphat (MDP)-haltigen Primer bei Verwendung von RelyX Ultimate oder Sinfony eine höhere Scherfestigkeit erreichten als bei RelyX Unicem, während RelyX Unicem in der Lage war, ohne Vorbehandlung eine stabile Bindung zu Kobalt-Chrom auszubilden. Vorbehandelte CAD/CAM verblendete Zirkonoxidsubstrate, die mit Sinfony oder RelyX Ultimate verklebt wurden, führten zu ähnlichen Scherfestigkeitsergebnissen wie sie für konventionelle Verblendungen beobachtet wurden, während das Verblenden mit Sinfony in niedrigeren Scherfestigkeitswerte resultierte. Die korrekte Vorbehandlung der jeweiligen Substratoberfläche und die abgestimmte Auswahl des Befestigungsmaterials ist hier unerlässlich, um optimale klinische Ergebnisse zu erzielen.

Originalarbeit: <https://doi.org/10.3290/j.jad.b1079579>

2.3.3. Mayinger F, Fiebig M, Roos M, Eichberger M, Lümke N, Stawarczyk B. Bonding behavior between polyetheretherketone and polymethylmethacrylate acrylic denture polymer. J Adhes Dent 2020; in press (IF: 2.379)

Das Ziel dieser Untersuchung war es, den Einfluss von Vorbehandlung und Konditionierung auf die freie Oberflächenenergie, die Oberflächenrauigkeit und die Scherfestigkeit zwischen Polyetheretherketon und Polymethylmethacrylat (PMMA)-Kaltpolymerisat zu analysieren.

Hierzu wurden Polyetheretherketonsubstrate (Dentokeep PEEK Disc, nt-trading) mit Al_2O_3 -Partikeln unterschiedlicher Korngröße, die mit unterschiedlichem Druck appliziert wurden, sandgestrahlt: I. 0,2 MPa - 50 μm Al_2O_3 , II. 0,4 MPa - 50 μm Al_2O_3 , III. 0,2 MPa - 110 μm Al_2O_3 , IV. 0,4 MPa - 110 μm Al_2O_3 oder V. ohne Korundstrahlen (N = 860, n = 172/Gruppe). Die Oberflächeneigenschaften wurden durch die Bestimmung der freien Oberflächenenergie und der Oberflächenrauigkeit und rasterelektronenmikroskopischer Aufnahmen quantifiziert. Die Substrate wurden mit i. visio.link (VL, bredent), ii. Scotchbond Universal (SU, 3M), iii. Bonding Fluid (BF, Schütz Dental) oder iv. ohne Konditionierung (WC; n = 40/Untergruppe) vorbehandelt und mit rosa Prothesenkunststoff verklebt (Futura Jet, Schütz Dental). Die Scherfestigkeit und die Frakturtypen wurden vor und nach 10 000 Thermozyklen bestimmt (n = 20/Untergruppe). Die Daten wurden unter Verwendung einer univariaten ANOVA, des Kruskal-Wallis- und Mann-Whitney-U-Tests, der Kaplan-Meier-Schätzungen und der Weibull-Verteilung statistisch ausgewertet ($\alpha = 0,05$). Zur Analyse der Frakturtypen wurden Ciba-Geigy-Tabellen und der Chi-Quadrat-Test verwendet.

Die Ergebnisse zeigten, dass eine Zunahme der Partikelgröße und des Drucks zu ähnlichen oder höheren Werten für die Scherfestigkeit, die charakteristische Weibull-Festigkeit und dem Weibull-Modul führte. Die niedrigsten Ergebnisse wurden für die Kontrollgruppe (ohne Korundstrahlen) beobachtet, während die Vorbehandlung mit 0,4 MPa - 110 μm Al_2O_3 die höchsten Werte vorwies. Im Vergleich mit den anderen Konditionierungsverfahren zeigte visio.link hohe Scherfestigkeitswerte, während Prüfkörper, welche mit Scotchbond Universal und ohne Konditionierung vorbehandelt wurden, niedrigere Scherfestigkeitswerte vorwiesen. Obwohl eine Zunahme der Partikelgröße und des Drucks keinen Einfluss auf die freie Oberflächenenergie ausübte, wurde eine höhere Oberflächenrauigkeit beobachtet.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass eine Vorbehandlung mit 0,4MPa - 110µm Al₂O₃ und die Anwendung von Adhäsivsystemen wie visio.link zu höheren Scherfestigkeitswerten führte. Um eine klinisch erfolgreiche Verbindung zwischen Polyetheretherketon und rosa Prothesenkunststoff zu erreichen, ist eine Oberflächenvergrößerung durch Abstrahlen und eine anschließende Konditionierung von entscheidender Bedeutung.

Originalarbeit: <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2020.01.048>

3. Diskussion

Der Implementierung innovativer Techniken und Verfahren in der Herstellung zahnfarbener Restaurationen sollte eine werkstoffwissenschaftliche Untersuchung der ästhetischen und mechanischen Eigenschaften vorangehen. Damit wird eine erhöhte Sicherheit von neu entwickelten und/oder optimierten Werkstoffen wie auch der in innovativen Fertigungsprozessen hergestellten Restaurationen im Rahmen der klinischen Anwendung erzielt. Die Lithiumdisilikatkeramik HS10PC wurde mit dem Ziel, die optischen und mechanischen Eigenschaften von Silikatkeramiken zu optimieren, entwickelt. Um eine valide Aussage über die mechanischen Eigenschaften dieses Materials treffen zu können, wurde HS10PC im Vergleich mit der etablierten Lithiumdisilikatkeramik IPS e.max Press und der Leuzitkeramik IPS Empress Esthetic auf die Biegefestigkeit, die Martens Härte, das elastische Eindringmodul, die Bruchlast und die Abrasionsbeständigkeit geprüft. Die untersuchten Lithiumdisilikatkeramiken zeigten höhere mechanische Werte als die leuzitverstärkte Keramik. Dies wurde bereits in früheren Untersuchungen, welche u. a. die 3-Punkt-Biegefestigkeit und Bruchzähigkeit analysierten, beschrieben [4, 24, 47]. HS10PC erreichte im Vergleich zur etablierten IPS e.max Presskeramik ähnliche Werte. Das Indikationsspektrum für diese neu entwickelte Keramik könnte auf Grund der beobachteten vielversprechenden mechanischen Eigenschaften bei strenger Indikationsstellung auch dreigliedrige Brücken bis zum zweiten Prämolaren als Endpfeilerzahn beinhalten. Von einer weiteren Ausdehnung des Indikationsspektrums sollte aufgrund der negativen Ergebnisse klinischer Langzeituntersuchungen vergleichbarer Materialien abgesehen werden [42, 124]. Selbst nach einer künstlichen Alterung, die der klinischen Situation nach fünf Jahren in vivo entsprechen soll [101], wiesen alle vier Keramiken höhere Bruchlastergebnisse, als die beobachteten maximalen Okklusionskräfte im Molarenbereich [34, 129], auf. Es kann somit geschlussfolgert werden, dass alle untersuchten Werkstoffe den auftretenden Kaukräften langfristig standhalten könnten. Zahnersatzmaterialien sollten im Hinblick auf die Abrasion ähnliche Eigenschaften wie der menschliche Zahnschmelz aufweisen, da Abweichungen zu okklusalen Fehlfunktionen, Muskelverspannungen und Schädigungen der natürlichen Gegenbezaahnung führen können. Leuzit- oder Lithiumsilikatkristalle können sich während der Kausimulation lösen und zu einer rauen Oberfläche führen, weswegen bei Silikatkeramiken ein höherer Verschleiß des Antagonisten als z. B. bei Kompositen beobachtet wird [117]. HS10PC zeigte nach 1 200 000 Kauzyklen den vergleichsweise geringsten Substanzverlust, während alle Keramiken ähnliche Ergebnisse für die Abrasionsbeständigkeit des Schmelzantagonisten zeigten.

Da HS10PC eine höhere Menge an Siliziumdioxid-, Aluminiumoxid- und Kaliumoxidkristallen besitzt, könnte man zu dem Schluss kommen, dass diese Kristalle die mechanischen Eigenschaften einer Lithiumdisilikatkeramik verbessern können. Parameter wie die Biegefestigkeit, die Martens Härte, das elastische Eindringmodul und die Bruchlast sollten immer im Hinblick auf den Verschleiß des Antagonisten beurteilt werden, da der geringe Substanzverlust des Restaurationsmaterials, den hohe Härtewerte nach sich ziehen, auf Kosten des Zahnschmelzes entstehen kann [63, 106]. Während die In-vitro-Untersuchung der mechanischen Eigenschaften von HS10PC vielversprechende erste Ergebnisse zeigte, sollte diese Keramik u. a. in Hinblick auf ihre Bruchzähigkeit, ihre optischen Eigenschaften und ihr klinisches Langzeitverhalten weiter erforscht werden, um ein umfassendes Verständnis ihrer ästhetischen und mechanischen Eigenschaften zu ermöglichen.

Im Bereich der Hochleistungsthermoplaste eröffnen Innovationen in der Materialentwicklung neue Indikationsbereiche. Prothesenklammern aus Polyetheretherketon könnten hier eine Alternative zu silberfarbenen Kobalt-Chrom-Molybdän-Klammern darstellen. Neben einer ansprechenden Ästhetik und Biokompatibilität verlangt die moderne Klammerprothese nach einer langfristig ausreichenden Retentionskraft der Verankerungselemente, da über einzelne Klammern oft mehrere künstlich ersetzte Zähne an der Restbezaahnung befestigt werden. Die Retentionskraft ist hier besonders unter Funktion, z. B. dem Zerkleinern von Nahrung oder beim Sprechen, essentiell. Um eine valide Aussage zu dem Einsatz von Polyetheretherketon als Klammermaterial treffen zu können, wurde die Retentionskraft unterschiedlich hergestellter Polyetheretherketonklammern im Vergleich zu solchen aus Kobalt-Chrom-Molybdän nach künstlicher Alterung analysiert. Die Kontrollgruppe zeigte hierbei höhere Retentionskräfte. Diese Beobachtung wird durch frühere Untersuchungen, welche die Retentionskraft und Ermüdungsbeständigkeit von Polyetheretherketon und Kobalt-Chrom-Molybdän ermittelten, bestätigt [92, 123, 127]. Da die beobachteten Werte der Polyetheretherketonmaterialien jedoch die geforderten 5 bis 10 N Retentionskraft pro Halteelement überschritten [126, 133], ist eine klinische Anwendung durchaus denkbar. Insbesondere bei parodontal vorgeschädigter Restbezaahnung, wo exzessive Retentionskräfte die verbleibenden Pfeilerzähne überbeanspruchen könnten [81], stellen Polyetheretherketone eine valide Alternative dar. Da PEEKmilled2 innerhalb der getesteten Polyetheretherketonmaterialien zum Teil bessere Ergebnisse als PEEKpressed aufwies, kann eine Herstellung von Polyetheretherketon Restaurationen in standardisierten Fräsprozessen, ein zeitsparendes Verfahren, welches sich durch eine geringere Fehleranfälligkeit auszeichnet [121], empfohlen werden [76, 111].

Obwohl auch bei Kobalt-Chrom-Molybdän eine Abnahme der Werte nach künstlicher Alterung nachgewiesen werden konnte, war der Einfluss der künstlichen Alterung bei Polyetheretherketonmaterialien signifikant höher. Für Kobalt-Chrom-Molybdän wurden eine Abnahme der Dauerfestigkeit und eine bleibende Verformung nach künstlicher Alterung im Rahmen von Korrosionserscheinungen, die in feuchter Umgebung auftreten, bereits beschrieben [7, 66], während für Polyetheretherketon sowohl eine hohe Alterungsbeständigkeit als auch eine Abnahme der mechanischen Eigenschaften beobachtet wurden [41, 94]. Weitere Untersuchungen sind hier indiziert, um das langfristige Verhalten von Polyetheretherketon in der klinischen Situation abschätzen zu können. Der Einfluss einer wiederholten Ein- und Ausgliederung der Prothesenklammern auf die Retentionskraft zeigte ein kontroverses Bild. Während in der ersten Untersuchung (2.1.2) letztendlich bei allen getesteten Gruppen eine Abnahme der Retentionskraft beobachtet werden konnte, wurde in der zweiten Untersuchung (2.1.3) kein Einfluss oder eine Zunahme der Retentionskraft im Rahmen einer wiederholten Ein- und Ausgliederung festgestellt. Auf der einen Seite können Materialermüdungen für die Abnahme der Retentionskräfte ursächlich sein [123]. Auf der anderen Seite könnten Abriebphänomene, welche sowohl an dem Modell als auch an den Prothesenklammern auftreten können, zu einem verbesserten Sitz der Klammern und in Folge zu einer höheren Retentionskraft führen [123]. Auf Grund der deutlich divergierenden Elastizitätsmodule von 220 GPa für Kobalt-Chrom-Molybdän [2] und 4 GPa für Polyetheretherketon [105], einem Parameter, der einen entscheidenden Einfluss auf die Fähigkeit eines Materials, nach Kraftereinwirkung seine Struktur ohne bleibende Deformationen wieder anzunehmen, besitzt, könnte Polyetheretherketon das Klammermaterial der Wahl für Pfeilerzähne im Frontzahnbereich, die wenig anatomischen Unterschnitt aufweisen und in Folge bei der Ein- und Ausgliederung einer geringe Verformung erfordern, darstellen. Kobalt-Chrom-Molybdän würde sich dagegen als Material für den Seitenzahnbereich anbieten, wo Molaren eine große retentive Fläche bieten und hohe Kaukräfte überlegene Retentionskapazitäten und funktionelle Stabilität erfordern [21]. Da die Materialwahl das Design der Klammer maßgeblich bestimmt, kann bei dem flexiblen Polyetheretherketon ein tieferer Unterschnitt erforderlich sein, um eine ausreichende Haltekraft zu gewährleisten [92, 123]. Individuelle Situationen am Patienten können hier eine adaptierte Behandlungsplanung hinsichtlich der Wahl des Klammermaterials erfordern.

Während gefräste oder gepresste Polyetheretherketon Restaurationen bereits für eine Vielzahl zahnmedizinischer Indikationen erfolgreich eingesetzt werden [6, 10, 77, 83, 90], erfordert die Fertigung im additiven Verfahren eine aufwendige Nachbearbeitung [95]. Die mechanischen und optischen Eigenschaften 3D-gedruckter Polyetheretherketon Restaurationen werden durch das Verhältnis der amorphen zu kristallinen Phase bestimmt, eine Eigenschaft die durch den additiven Fertigungsprozess beeinflusst wird [134]. In diesem Zusammenhang könnte der Thermoplast Polyphenylsulfon, welcher ausschließlich im amorphen Zustand vorliegt [22], eine höhere Reliabilität der Ergebnisse ermöglichen. Da sich Hochleistungsthermoplaste durch eine inerte Oberfläche auszeichnen, ist deren adäquate Vorbehandlung unerlässlich, um eine erfolgreiche Bindung zu anderen Werkstoffen zu gewährleisten [40, 58, 113]. Bei Polyaryletherketonmaterialien hat sich die Oberflächenmodifikation durch Korundstrahlen gefolgt von der Applikation eines Methylmethacrylat-basierten Adhäsivsystems zur Steigerung der Verbundfestigkeit bewährt [60, 114, 118]. Die erste Untersuchung der Oberflächen- und Verbundeigenschaften von Polyphenylsulfon konnte zeigen, dass additiv gefertigte Polyphenylsulfonsubstrate vergleichbare Zugfestigkeitswerte zu einem Verblendkomposit wie das etablierte Polyetheretherketon vorwies [58, 60, 113, 114, 118]. 3D-gedruckte Polyphenylsulfonsubstrate erzielten hier höhere Werte als direkt aus Rohmaterial gefertigte Substrate. Die vorliegenden Ergebnisse könnten durch die intrinsisch inhomogene Oberfläche von additiv hergestellten Restaurationen erklärt werden. Während des komplexen Schicht für Schicht Druckprozesses werden Mängel wie Lufteinschlüsse und Blasen oder unzureichende Vernetzungen zwischen den 150 µm dicken Schichten in das Substrat eingearbeitet [59]. Hierdurch nehmen die Oberfläche, die Oberflächenrauigkeit und in Folge, wie in der vorliegenden Studie beobachtet, auch die Zugfestigkeit zu. Da eine Steigerung des Strahldruckes und der Korngröße zu einer Zunahme der freien Oberflächenenergie und Rauigkeit führte, kann die Vorbehandlung einer Polyphenylsulfonrestauration mit 110 µm Al₂O₃-Partikeln bei 0,4 MPa Druck zur Steigerung der Oberflächeneigenschaften unter Vorbehalt der Integrität marginaler Bereiche empfohlen werden. Während zukünftige Untersuchungen im Blick auf die Biokompatibilität und die ästhetischen und mechanischen Eigenschaften von Polyphenylsulfon unter Funktion zur umfassenden Bewertung dieses Thermoplasts unabdingbar sind, versprechen die vorliegenden Ergebnisse eine potentiell erfolgreiche Anwendung in der additiven Fertigung von Zahnersatz. Vorbehandlungsstrategien, welche ursprünglich für Polyetheretherketon ausgearbeitet wurden, stellen hier wirksame Methoden zur Verbesserung der Oberflächeneigenschaften von Polyphenylsulfon dar und ermöglichen eine ästhetische Verblendung des monolithischen Hochleistungsthermoplasts.

Bahnbrechende Entwicklungen in der Fertigung dentaler Werkstoffe ermöglichen heutzutage die Versorgung eines Patienten mit einer keramischen Restauration in nur einer Sitzung. Bei Zirkonoxiden spielt hier die Sinterdauer eine ausschlaggebende Rolle. Während herkömmliche Sinterprotokolle bis zu zwölf Stunden in Anspruch nehmen, ermöglichen das Speed-Sintern bei ~1510 °C in dreißig bis hundertzwanzig Minuten und das High-Speed-Sintern bei ~1580 °C in unter dreißig Minuten eine deutliche Einsparung von Zeit und Kosten seitens des Behandlers und des Patienten. Die Untersuchung dieses optimierten Fertigungsprozesses hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften von 3Y-TZP und 4Y-TZP Zirkonoxidkeramiken konnte zeigen, dass High-Speed-Sintern keinen oder einen positiven Einfluss auf die Biegefestigkeit und Bruchlast ausübte. Eine Zunahme der Korngröße durch eine Verlängerung der Haltezeiten oder eine Steigerung der Brenntemperatur wurde in den ersten Untersuchungen zu diesem innovativen Herstellungsverfahren bereits beschrieben [52, 54, 112, 116] und scheint die mechanischen Eigenschaften der gefertigten Zirkonoxidrestauration, wie die Biegefestigkeit oder die Bruchlast, zu verbessern [31, 116, 137]. Dieser Zusammenhang besteht jedoch nur bis zu Sintertemperaturen von 1600 °C, oberhalb derer eine Abnahme der Biegefestigkeit beobachtet werden konnte [116]. Des Weiteren zeigten frühere Untersuchungen eine positive Korrelation zwischen einer Zunahme der Korngröße und einem höheren Anteil tetragonaler zu monokliner Phasenumwandlungen und berichten, dass eine größere Korngröße zu einer Beeinträchtigung der Festigkeit führen kann [72, 136]. Auch die Berechnung des Weibull-Moduls zeigte in den vorliegenden Untersuchungen widersprüchliche Ergebnisse. So wurde in Untersuchung 2.1.5 ein negativer und in Untersuchung 2.1.7 ein positiver Einfluss des High-Speed-Sinterns beobachtet. Diese teils kontroversen Beobachtungen verlangen hier nach weiterführenden Analysen auf Kristallebene. In Untersuchung 2.1.6 konnte nach dem High-Speed-Sintern auch ein geringerer Zwei-Körper-Verschleiß beobachtet werden. Generell zeichnen sich Zirkonoxide im Vergleich mit Silikatkeramiken durch ein reduziertes Abrasionsverhalten aus [55, 67, 80, 109]. Die überlegenen mechanischen Eigenschaften High-Speed gesinterter Zirkonoxide [31, 116, 137] könnten mit einer verbesserten Oberflächenstruktur einhergehen, welche für Phasenumwandlungen vom tetragonalen in den monoklinen Zustand weniger anfällig sein könnten. In Folge könnten auch Verschleißerscheinungen reduziert werden. Im Widerspruch zu den vorliegenden Ergebnissen und dem beschriebenen Gedankengang berichtet eine frühere Untersuchung nach dem herkömmlichen Sintern über eine homogenere Oberflächenstruktur mit weniger Mulden, während das Hoch- und Geschwindigkeitssintern zu einer zerkratzten Steatitoberfläche führten, die mit einem größeren Volumenverlust assoziiert war [57].

Die Sinterparameter beeinflussen jedoch nicht nur die mechanischen, sondern auch die optischen Eigenschaften einer gefertigten Zirkonoxidrestauration. Der Einfluss des innovativen Fertigungsprozesses des High-Speed-Sinterns auf die Transluzenz ist zum jetzigen Zeitpunkt umstritten. Während einige Untersuchungen eine Abnahme der Transluzenz beobachteten [27, 54], was gerade im Hinblick auf die inhärent schwachen ästhetischen Eigenschaften des Materials einen höchst unerwünschten Effekt darstellt, berichteten andere von überlegenen optischen Eigenschaften im Vergleich mit herkömmlichen Sinterprotokollen [57, 61]. Auch unter diesem Gesichtspunkt sind weitere Untersuchungen zu den Auswirkungen der Aufheizrate, der Brenntemperatur und der Haltezeit indiziert. Die ersten Ergebnisse deuten hier jedoch bereits auf eine starke Konkurrenzfähigkeit der Zirkonoxide zu den etablierten Chairside-Systemen der Silikatkeramiken hin.

Innovationen in der Herstellung dentaler Restaurationsmaterialien eröffnen neue Fragestellungen zu der Verarbeitung dieser Werkstoffe. Die korrekte Nachbearbeitung, z. B. im Rahmen einer Oberflächenvergrößerung durch Abstrahlen oder einer Nachbelichtung, ist besonders bei Polymeren essentiell, um suffiziente chemische und mechanische Eigenschaften zu erreichen. Die Untersuchung mit einem Raman Mikroskop erlaubt hier Rückschlüsse auf die Umsetzung chemischer Bindungen. Während die durch Photoinitiation ausgelöste Kettenreaktion unter idealen Bedingungen so lange fortgesetzt werden würde, bis alle Monomere in ein Polymer Netzwerk umgewandelt wurden, ist die Konversionsrate bei Kompositen von einer Vielzahl von Faktoren wie der Materialzusammensetzung, der Schichtdicke und der Polymerisationsart und -dauer abhängig [20, 102]. Durch die kontinuierliche Weiterentwicklung der Leuchtdioden zeichnen sich die neuesten Polymerisationsgeräte durch spezifische Lichtemissionsspektren, eine hohe Aushärtungseffizienz, eine lange Lebensdauer, einen geringen Energieverbrauch und eine kompakte Geräteform aus [53]. Die Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Polymerisationseinheiten auf die chemischen und mechanischen Eigenschaften von Verblendkompositen konnte zeigen, dass eine Belichtung mit Otofash G171 und Labolight DUO zu einem Anstieg der Konversionsrate, der Martens Härte und des elastischen Eindringmoduls führte. Die Polymerisation mit Otofash G171 erfolgte unter Stickstoffatmosphäre mit zwei Blitzlichtlampen, die ein breites Wellenlängenspektrum von 280 – 580 nm abdeckten.

Otoflash G171 zeichnet sich im Vergleich mit anderen Polymerisationsgeräten, die eine konstante Bestrahlung zuführen, durch seine wiederholten konzentrierten Lichtblitze aus. Die hohe Lichtintensität könnte hier die Polymerisationsgeschwindigkeit steigern, was sich in einer höheren Umsatzrate der Doppelbindungen und besseren mechanischen Eigenschaften widerspiegeln könnte. Das ausgedehnte Wellenlängenspektrum gewährleistet des Weiteren die Photoinitiation einer großen Bandbreite an Initiatorsystemen, während die Belichtung unter Stickstoffatmosphäre die Bildung einer Sauerstoffinhibitionsschicht verhindert und somit auch eine Polymerisation der äußersten Oberfläche der Restauration ermöglicht [20, 102]. Die vielversprechenden Ergebnisse des Polymerisationsgerätes Otoflash G171 werden durch eine frühere Untersuchung, welche die Auswirkung der Nachbelichtung auf die Bruchlast von 3D-gedruckten dreigliedrigen Brücken analysierte, untermauert. Auch hier wurden nach Polymerisation mit Otoflash G171 höhere Werte beobachtet [100]. Beim Vergleich des Polymerisationsgerätes Labolight DUO mit den in der vorliegenden Untersuchung weniger wirksamen Belichtungseinheiten fällt die Verwendung von zwölf blauen und drei violetten LEDs ins Auge. Auch hier wurde durch eine Kombination des violetten Wellenlängenbereichs von 350 – 420 nm mit dem blauen Wellenlängenbereich, der besonders auf die maximale Absorption von Campherchinon bei 468 nm abgestimmt ist, ein breites Spektrum an Photoinitatorsystemen abgedeckt. Ein spannender Aspekt in diesem Zusammenhang war die Beobachtung, dass der Parameter „Lagerung“ bei Prüfkörpern, die mit Otoflash G171 oder Labolight DUO ausgehärtet wurden, keinen Einfluss auf die Konversionsrate, die Martens Härte oder das elastische Eindringmodul zeigte. Während frühere Untersuchungen eine Zunahme der Konversionsrate im zeitlichen Verlauf beobachten konnten [45, 79, 125], scheinen diese beiden Polymerisationsgeräte eine sofortige und endgültige Umsetzung der verfügbaren Doppelbindungen zu induzieren. Während der Zusammenhang zwischen einer höheren Konversionsrate und der Biokompatibilität von Kompositen in Hinblick auf die Elution von Restmonomeren umstritten ist [26, 86], sprechen die überlegenen mechanischen Eigenschaften für den Einsatz der fortschrittlichen Polymerisationsgeräte Otoflash G171 und Labolight DUO.

Sowohl im Dentallabor als auch in der zahnärztlichen Praxis folgt der abschließenden Polymerisation von Kompositrestaurationen eine Oberflächenvergütung. Diese bestimmt auch bei keramischen Werkstoffen maßgeblich den langfristigen Erfolg der gefertigten Versorgung.

Eine optimale Bearbeitung kann hier u. a. die Plaqueaffinität der Restauration reduzieren, den Antagonisten schonen und Rissbildungen, welche unter kaufunktioneller Belastung fortschreiten, vorbeugen [11, 51, 75, 99]. Die korrekte Aufbereitung der keramischen Oberfläche ist besonders nach approximalen und okklusalen Korrekturen im Rahmen der klinischen Einprobe einer Restauration interessant. Die Untersuchung einer Zirkonoxid-, Lithiumdisilikat- und leuzitverstärkten Keramik konnte zeigen, dass eine anschließende Glasur zu einem höheren Verschleiß und einer Beeinträchtigung der Bruchlast führte, während die Politur die mechanischen Eigenschaften bei weitgehendem Erhalt des Antagonisten verbessern konnte. Obwohl eine Glasur initial Mikrorisse abdichten vermag, wurde eine sukzessive Ablösung von Glasurpartikeln unter funktioneller Belastung in der Literatur bereits ausführlich beschrieben [97]. Die zurückbleibende raue Oberfläche kann zu einem höheren Antagonistenverschleiß, zur Ausbildung und Weiterentwicklung von Mikrorissen und einem verringerten Bruchwiderstand führen, während polierte Oberflächen die Gegenbezahnung langfristig schonen [55, 67, 87, 97, 103]. Während diese eindeutigen Ergebnisse die herausragende Stellung der Politur monolithischer Keramiken in der Oberflächenvergütung unterstreichen, stellt sich angesichts der Vielzahl verfügbarer Polierprotokolle die Frage, mit welchem Verfahren hier die besten Ergebnisse zu erzielen sind. Bei Zirkonoxiden könnte auch die Politur im weißen ungesinterten Zustand ein innovatives Konzept darstellen, welches neben der zeitlichen Komponente den Bedarf an kostspieligen Poliermaterialien reduzieren könnte. Die vorliegende erste Untersuchung, welche unterschiedliche Polierstrategien von Zirkonoxid im Weißzustand analysierte, konnte hier vielversprechende Ergebnisse beobachten. Sowohl die Transluzenz als auch die Biegefestigkeit profitierten von einer zusätzlichen Politur vor der Sinterung. Da die Opazität einer polykristallinen Zirkonoxidoberfläche mit zunehmender Oberflächenrauigkeit aufgrund von Streueffekten zunimmt [107], sollte eine verminderte Oberflächenrauigkeit in der Theorie eine höhere Transluzenz induzieren, eine Überlegung, welche durch die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung bestätigt werden konnte. Des Weiteren konnte das zweistufige Polieren im gesinterten Zustand, insbesondere in Kombination mit einer Polierpaste, die Oberflächenrauigkeit weiter verringern und sowohl die optischen als auch die mechanischen Eigenschaften steigern. Diese Beobachtung unterstreicht die Vorteile einer mehrstufigen Polierstrategie, in welcher die zusätzliche Reduzierung von Defekten eine glattere Oberfläche und höhere Festigkeitswerte nach sich zieht [19, 75, 96].

Während zum jetzigen Zeitpunkt noch unklar ist, inwieweit Rückstände einer Politur im Weißzustand einen negativen Einfluss auf die gefertigten Zirkonoxidrestaurationen ausüben, verspricht diese Polierstrategie destruktive Phasenumwandlungen, die durch eine Nachbearbeitung im gesinterten Zustand induziert werden können [91], zu reduzieren.

Verschmutzungen, die im Rahmen der Herstellung und Verarbeitung dentaler Werkstoffe entstehen, beeinflussen jedoch nicht nur in Vorstadien wie dem Weißzustand, sondern auch im Endzustand den langfristigen Erfolg einer Restauration. Die adäquate Reinigung bestimmt neben den chemischen und mechanischen Eigenschaften der gefertigten Versorgungen auch deren Bindungseigenschaften zu anderen Restaurationsmaterialien. Die Biokompatibilität dentaler Werkstoffe ist ein Aspekt, der besonders im Bereich der Implantologie einen hohen Stellenwert einnimmt. Der direkte Kontakt zu periimplantären Geweben verlangt hier nach einer adäquaten Reinigung [84]. Diese kann u. a. durch eine Vorbehandlung im Ultraschallbad, im Autoklav oder mittels innovativer Kaltplasmatechnologie erfolgen. Inwiefern unterschiedliche Reinigungsprotokolle einen Einfluss auf mechanische Eigenschaften, wie die Zugfestigkeit zwischen Zirkonoxidabutment und Titanbasis, ausüben, wurde in Untersuchung 2.2.4 analysiert. Da die Analyse der Ergebnisse hier keinen signifikanten Einfluss zeigte, kann aus mechanischer Sicht das Reinigungsprotokoll, welches die besten biologischen Eigenschaften liefert, angewendet werden. Frühere Untersuchungen konnten sowohl für eine Plasmavorbehandlung, als auch eine Reinigung im Ultraschallbad vielversprechende Ergebnisse hinsichtlich der Entfernung von Verschmutzungen, der Weichgewebsheilung, der Zellproliferation und des periimplantären Knochenniveaus beobachten [15, 16, 18, 43]. Dennoch hebt die große Heterogenität in der Behandlung individuell gefertigter Abutments weltweit, wie sie in einer internationalen Umfrage dargelegt werden konnte [17], die Notwendigkeit standardisierter Reinigungsprotokolle in diesem kritischen Arbeitsfeld hervor. Ferner kann in Anbetracht der vorliegenden Ergebnisse der Einsatz eines Befestigungskomposites auf DMA/HEMA-Basis zur Befestigung von Zirkonoxidabutments und Titanbasen empfohlen werden. Die überlegenen Verbundwerte, die bei der Verwendung dieses Befestigungsmaterials beobachtet wurden, könnten u. a. durch den positiven Effekt einer längeren Applikationszeit des Primers, der Zusammensetzung des Befestigungskomposites aus Partikeln $\leq 3,0 \mu\text{m}$ mit einem Gesamtvolumen anorganischer Füllstoffe $\leq 36 \%$ und der Aushärtung durch Selbstpolymerisation bedingt sein.

Befestigungsmaterialien unterscheiden sich nicht nur in der Stärke ihres Verbundes zum Substrat, einem Parameter, der im Labor durch die Messung der Zug- oder Scherfestigkeit bestimmt werden kann, sondern auch hinsichtlich der Spannung, welche sie auf die umgebenden Strukturen (z. B. die natürliche Zahnhartsubstanz oder die prothetische Versorgung) durch Polymerisationsschrumpfung ausüben. Klinisch kann das Auftreten von Polymerisationsspannungen zu Spaltformationen und einer daraus resultierenden Verfärbung der Restauration, der Entwicklung von Sekundärkaries, Ermüdungsfrakturen und dem vollständigen Versagen einer Restauration führen [13, 64]. Während eine frühere Untersuchung für selbstadhäsive Befestigungskomposite niedrigere Spannungswerte im Vergleich mit konventionellen Befestigungsmaterialien beobachtete [37], ist die Datenlage in diesem klinisch hoch relevanten Feld rudimentär. Die Analyse des Rissfortschrittes einer Silikatkeramik konnte hier für das selbstadhäsive Befestigungsmaterial SmartCem 2 höhere Polymerisationsspannungswerte als für iCEM und SoloCem zeigen. Die Polymerisationsschrumpfung wird sowohl durch die Zusammensetzung des Materials [9, 46] als auch den Polymerisationsprozess selbst beeinflusst [33]. Für SmartCem 2 wurde eine hohe Kontraktionsspannung im Vergleich mit sechs anderen selbstadhäsiven Befestigungskompositen bereits beschrieben [108]. Während eine höhere Polymerisationsspannung auf der einen Seite auf eine stärkere Schrumpfung während der Polymerisation zurückgeführt werden kann, könnte auch ein starker Verbund zwischen Keramik und Befestigungsmaterial ursächlich sein, da der Riss in der Keramik fortschreitet, bis sich der Verbund zum Befestigungsmaterial löst [132]. Diese Überlegung wird durch zwei frühere Untersuchungen, welche für SmartCem 2 hohe Scherfestigkeitswerte beobachteten, unterstützt [49, 69]. Im Vergleich mit den anderen selbstadhäsiven Befestigungsmaterialien wiesen iCEM und SoloCem in der vorliegenden Untersuchung niedrige Polymerisationsspannungswerte vor. Auch die Verbundfestigkeit, marginale Adaptation, Radioopazität und Verfärbungsrate dieser Materialien zeigten hier vielversprechende erste Ergebnisse [8, 25, 36, 70]. Während die Kontrollgruppe mit dem Glasionomermazement Ketac Cem wie erwartet die niedrigsten Spannungswerte vorwies, sollte dessen reduzierte Langzeitstabilität [29, 74] und Verbundfestigkeit [1, 62] bei der Wahl eines selbstadhäsiven Befestigungskomposites oder konventionellen Zementes berücksichtigt werden. Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung verdeutlichen den Stellenwert der Befestigung für den langfristigen Erfolg einer prothetischen Versorgung. Restaurationen, die aus Werkstoffen mit geringer Biegefestigkeit (z. B. Silikatkeramik) gefertigt wurden, können hier von dem Einsatz eines Befestigungsmaterials mit geringer Polymerisationsspannung profitieren.

Ein der individuellen Situation angepasstes Befestigungsprotokoll ist nicht nur bei keramischen Werkstoffen indiziert. So konnte die Untersuchung der Scherfestigkeit zwischen CAD/CAM oder konventionell gefertigten Verblendungen und Substraten aus drei unterschiedlichen Gerüstmaterialien (Zirkonoxid, Kobalt-Chrom oder Titan) zeigen, dass sowohl die korrekte Vorbehandlung der jeweiligen Substratoberfläche als auch die abgestimmte Auswahl des Befestigungsmaterials unerlässlich sind. Zirkonoxidsubstrate wiesen hier nach Konditionierung mit einem MDP-haltigen Primer bei Verwendung von RelyX Ultimate und Sinfony höhere Scherfestigkeitswerte als bei der Befestigung mit RelyX Unicem vor. Der positive Einfluss der Vorbehandlung einer Zirkonoxidoberfläche durch Abstrahlen und Applikation eines MDP-haltigen Primers auf die Stärke des Verbundes ist in der Literatur bereits beschrieben [88, 104, 122]. Die guten Bindungseigenschaften von Metalllegierungen stellen hier jedoch nach wie vor eine starke Konkurrenz dar. So konnte RelyX Unicem in der vorliegenden Untersuchung auch ohne Vorbehandlung eine stabile Bindung zu Kobalt-Chrom aufbauen. Bei der Verblendung von Restaurationen spielt auch der thermische Ausdehnungskoeffizient des Gerüst- und Verblendmaterials eine essentielle Rolle. Diskrepanzen können hier zu Ausbrüchen der Verblendung und einem geringeren Versagenswiderstand der Restauration führen [56]. Im Einklang mit früheren Untersuchungen, die für Verblendkomposite im Vergleich mit konventionellen Verblendkeramiken, deren Eigenschaften an die Ausdehnungskoeffizienten der zugehörigen Substrate angepasst wurden, eine reduzierte Scherfestigkeit beobachten [68, 93], resultierte eine Verblendung mit Sinfony in der vorliegenden Untersuchung in niedrigeren Werten. Die mit CAD/CAM-Technik innovativ verblendeten Zirkonoxidsubstrate erzielten jedoch ähnliche Scherfestigkeitsergebnisse wie konventionelle Verblendungen. Die Vielfalt der heute verfügbaren dentalen Werkstoffe ermöglicht hier in Kombination mit präzisen Produktionsverfahren neue Möglichkeiten in der Herstellung von festsitzendem und herausnehmbarem Zahnersatz.

Polyaryletherketone stellen im Hinblick auf ihre hohen mechanischen Eigenschaften, ihre herausragende Biokompatibilität und dem einfachen Arbeitsablauf im Labor eine weitere Alternative zu klassischen Metallgerüsten dar. Bei herausnehmbarem Zahnersatz konnte eine Pilotstudie, welche die elastischen Eigenschaften eines Arylketonpolymers und dessen Verbundfestigkeit zu Prothesenkunststoff untersuchte, feststellen, dass diese Materialkombination gut für herausnehmbare Teilprothesen geeignet ist [73].

Wie bereits für Polyphenylsulfon beschrieben, ist die Vorbehandlung der inerten Polyetheretherketonoberfläche, z. B. durch Abstrahlen mit Al_2O_3 -Partikeln, ein entscheidender Schritt, um einen erfolgreichen Verbund zu gewährleisten [40, 58, 113]. Die Ergebnisse der ersten Untersuchung zum Verbund zwischen Polyetheretherketon und PMMA konnten hier zeigen, dass eine Steigerung der Partikelgröße und des Druckes einen positiven Effekt auf die Scherfestigkeit, die charakteristische Weibull-Festigkeit und den Weibull-Modul ausübte. Die Berechnung von Kaplan-Meier-Schätzungen untermauerte diese Resultate. Prüfkörper, welche mit $110\ \mu\text{m}$ Aluminiumoxidpartikeln bei $0,4\ \text{MPa}$ Druck vorbehandelten wurden, zeigten hier bei einer angewandten Scherkraft von $20\ \text{MPa}$ eine kumulative Überlebensrate von $70 - 90\ \%$, während die mit $50\ \mu\text{m}$ Al_2O_3 -Partikeln bei $0,2\ \text{MPa}$ Druck vorbehandelten Prüfkörper stark reduzierte kumulative Überlebensraten von $20 - 70\ \%$ vorwiesen. Die aus der Vorbehandlung mit größeren Al_2O_3 -Partikeln und einem erhöhten Druck resultierende höhere Oberflächenrauigkeit kann die Bindungseigenschaften des Hochleistungsthermoplasts stärken [118]. Auch die zusätzliche Applikation von Adhäsiven wie visio.link, dessen Bestandteil Pentaerythritol-Triacrylat (PETIA) eine entscheidende Rolle bei der Modifizierung von Polyetheretherketonoberflächen spielt, zeigte eine positive Wirkung auf die Scherfestigkeit. Dieser Effekt wurde für die Zugfestigkeit, die Retentionskraft und die Bruchlast bereits beschrieben [60, 113, 114, 118, 119, 128]. Der erfolgreiche Verbund von Polyetheretherketon zu PMMA Prothesenkunststoff eröffnet hier neue Indikationsfelder.

Innovationen in der Herstellung dentaler Restaurationsmaterialien werden von Entwicklungen in der Verarbeitung und Befestigung dieser Werkstoffe ergänzt. So folgt der innovativen Herstellung von Prothesenklammern aus dem Hochleistungsthermoplast Polyetheretherketon das Abstrahlen mit Aluminiumoxidpartikeln und die Konditionierung mit einem Adhäsivsystem. Dieser Vorbehandlung schließt sich der adhäsive Verbund zu dem Prothesenkunststoff an. Die erfolgreiche klinische Behandlung eines Patienten mit einer ästhetischen zahnfarbenen festsitzenden oder herausnehmbaren prothetischen Versorgung setzt eine Vielzahl aufeinander abgestimmter zahnärztlicher und zahntechnischer Arbeitsschritte voraus. Verbesserte Werkstoffeigenschaften eröffnen hier neue Indikationen und ermöglichen die Umsetzung minimalinvasiver Behandlungskonzepte [28], während optimierte Herstellungsverfahren eine gesteigerte Effizienz und eine Einsparung von Material und Kosten seitens des Patienten, des Zahntechnikers und des Zahnarztes erlauben. Im Bereich der additiven Fertigung deuten Fortschritte in der Genauigkeit des Druckprozesses und der Nachbearbeitung sowie die Möglichkeit, neben Thermoplasten zukünftig Silikatkeramiken zu verarbeiten, auf eine vielversprechende Zukunft hin. Während standardisierte digitale Prozesse eine hohe Reliabilität der Ergebnisse sicherstellen, ermöglichen Entwicklungen in der Verarbeitung und Befestigung dentaler Werkstoffe eine kontinuierliche Verbesserung der ästhetischen, chemischen und mechanischen Eigenschaften prothetischer Versorgungen.

4. Zusammenfassung

Die langfristig erfolgreiche Versorgung eines Patienten mit einer prothetischen Restauration zum Ersatz von Zähnen und verlorengangener Zahnhartsubstanz beruht neben der adäquaten Indikationsstellung auf der korrekten Herstellung, Verarbeitung und Befestigung der gefertigten Restauration. Werkstoffwissenschaftliche Untersuchungen von neu entwickelten und/oder optimierten Materialien wie auch der in innovativen Prozessen hergestellt und adhäsiv befestigten Restaurationen ermöglichen hier eine erhöhte Sicherheit im Rahmen der klinischen Anwendung. Das Ziel dieser Arbeit war die In-vitro-Untersuchung der optischen, chemischen und mechanischen Eigenschaften zahnfarbener Restaurationsmaterialien und ihrer Langzeitstabilität in Hinblick auf deren Herstellung, Verarbeitung und adhäsiver Befestigung.

Im Bereich der Silikatkeramiken zeigte die Untersuchung der weiterentwickelten Lithiumdisilikatkeramik HS10PC vielversprechende mechanische Ergebnisse, welche ein weites Indikationsspektrum ermöglichen.

Innovationen in der Herstellung prothetischer Restaurationen eröffnen auch im Bereich der Thermoplaste neue Einsatzgebiete. So wiesen Prothesenklammern aus Polyetheretherketon im Vergleich mit einer Kobalt-Chrom-Molybdän-Kontrollgruppe nach künstlicher Alterung eine ausreichende Retention auf, um eine Verwendung unter klinischen Bedingungen empfehlen zu können.

Die beobachteten Oberflächeneigenschaften und Zugfestigkeitswerte des Hochleistungsthermoplasts Polyphenylsulfon, einem sich in der Entwicklungsphase für dentale Restaurationen befindenden Werkstoff mit hohem Potential in der additiven Fertigung von Zahnersatz, deuten auf eine klinisch langfristig erfolgreiche ästhetische Verblendung des monolithischen Werkstoffes hin.

Auch die werkstoffwissenschaftlichen Untersuchungen des innovativen Fertigungsprozesses des High-Speed-Sinterns von Zirkonoxid zeigten hinsichtlich der Biegefestigkeit, der Abrasionsbeständigkeit und der Bruchlast vielversprechende Ergebnisse. Die klinische Implementierung von High-Speed-Sinterprotokollen könnte somit neben der Einsparung von Zeit und Kosten die mechanischen Eigenschaften von Zirkonoxidversorgungen verbessern.

Bei der Verarbeitung dentaler Restaurationsmaterialien auf Polymerbasis kann der Einsatz fortschrittlicher Polymerisationsgeräte zu einem Anstieg der Konversionsrate, der Martens Härte und des elastischen Eindringmoduls von Kompositen führen.

Die optischen und mechanischen Eigenschaften prothetischer Versorgungen können durch eine Oberflächenvergütung weiter optimiert werden. Die Vorbehandlung von Zirkonoxid-, Lithiumdisilikat- und leuzitverstärkten Keramiken durch eine Politur ist hier einer Glasur im Hinblick auf die Abrasionsbeständigkeit und die beobachteten Bruchlastwerte vorzuziehen.

Bei Zirkonoxiden konnte die Untersuchung der Transluzenz und Biegefestigkeit nach unterschiedlichen Polierstrategien zeigen, dass beide Parameter von einer zusätzlichen Politur im weißen ungesinterten Zustand profitierten, einem innovativen Konzept, welches zusätzlich zur zeitlichen Komponente den Bedarf an kostspieligen Poliermaterialien reduziert.

Neben der Herstellung und Verarbeitung prothetischer Restaurationen kommt der Befestigung eine wichtige Bedeutung zu. Bei der Untersuchung des Verbunds zwischen Zirkonoxidabutments und Titanbasen konnte festgestellt werden, dass der Einsatz eines Befestigungsmaterials auf DMA/HEMA-Basis in höheren Zugfestigkeitswerten resultierte.

Befestigungsmaterialien unterschieden sich jedoch nicht nur in der Stärke ihres Verbundes zum Substrat, sondern auch hinsichtlich der Spannung, welche sie auf die umgebenden Strukturen durch Polymerisationsschrumpfung ausübten. In der klinischen Anwendung sollten hier Befestigungskomposite mit niedrigerer Polymerisationsspannung beim Einsetzen von Silikatkeramikrestaurationen, welche eine geringe Biegefestigkeit vorweisen, bevorzugt werden.

Neben der Wahl des geeigneten Befestigungsmaterials bestimmt die Vorbehandlung der Restaurationsoberfläche maßgeblich den Verbund zwischen den unterschiedlichen Werkstoffen sowie zum natürlichen Zahn. So konnte eine Untersuchung der Scherfestigkeit zwischen digitalen und konventionellen Verblendungen und verschiedenen Substraten zeigen, dass die korrekte Vorbehandlung der jeweiligen Substratoberfläche und die abgestimmte Auswahl des Befestigungsmaterials unerlässlich ist, um optimale Ergebnisse zu erzielen.

Eine Oberflächenvergrößerung durch Abstrahlen und anschließende Konditionierung war auch für die erfolgreiche Verbindung zwischen Polyetheretherketon und rosa Prothesenkunststoff von entscheidender Bedeutung.

Während verbesserte Werkstoffeigenschaften und standardisierte Herstellungsverfahren eine gesteigerte Effizienz und eine hohe Reliabilität der Ergebnisse sicherstellen, neue Indikationsspektren eröffnen und die Umsetzung minimalinvasiver Behandlungskonzepte ermöglichen, erlauben Entwicklungen in der Verarbeitung und Befestigung dentaler Werkstoffe eine kontinuierliche Verbesserung der ästhetischen, chemischen und mechanischen Eigenschaften prothetischer Versorgungen.

5. Literaturverzeichnis

1. Abo-Hamar SE, Hiller KA, Jung H, Federlin M, Friedl KH, Schmalz G. Bond strength of a new universal self-adhesive resin luting cement to dentin and enamel. *Clin Oral Investig* 2005; 9:161-167.
2. Al Jabbari YS. Physico-mechanical properties and prosthodontic applications of Co-Cr dental alloys: a review of the literature. *J Adv Prosthodont* 2014; 6:138-145.
3. Aladağ A, Elter B, Çömlekoğlu E, Kanat B, Sonugelen M, Kesercioğlu A, Özcan M. Effect of different cleaning regimens on the adhesion of resin to saliva-contaminated ceramics. *J Prosthodont* 2015; 24:136-145.
4. Albakry M, Guazzato M, Swain MV. Biaxial flexural strength, elastic moduli, and x-ray diffraction characterization of three pressable all-ceramic materials. *J Prosthet Dent* 2003; 89:374-380.
5. Albakry M, Guazzato M, Swain MV. Effect of sandblasting, grinding, polishing and glazing on the flexural strength of two pressable all-ceramic dental materials. *J Dent* 2004; 32:91-99.
6. Alexakou E, Damanaki M, Zoidis P, Bakiri E, Mouzis N, Smidt G, Kourtis S. PEEK High Performance Polymers: A Review of Properties and Clinical Applications in Prosthodontics and Restorative Dentistry. *Eur J Prosthodont Restor Dent* 2019; 27:113-121.
7. Arda T, Arikan A. An in vitro comparison of retentive force and deformation of acetal resin and cobalt-chromium clasps. *J Prosthet Dent* 2005; 94:267-274.
8. Aschenbrenner CM, Lang R, Handel G, Behr M. Analysis of marginal adaptation and sealing to enamel and dentin of four self-adhesive resin cements. *Clin Oral Investig* 2012; 16:191-200.
9. Baroudi K, Saleh AM, Silikas N, Watts DC. Shrinkage behaviour of flowable resin-composites related to conversion and filler-fraction. *J Dent* 2007; 35:651-655.
10. Bathala L, Majeti V, Rachuri N, Singh N, Gedela S. The Role of Polyether Ether Ketone (Peek) in Dentistry - A Review. *J Med Life* 2019; 12:5-9.

11. Bollen CM, Lambrechts P, Quirynen M. Comparison of surface roughness of oral hard materials to the threshold surface roughness for bacterial plaque retention: a review of the literature. *Dent Mater* 1997; 13:258-269.
12. Calheiros FC, Daronch M, Rueggeberg FA, Braga RR. Degree of conversion and mechanical properties of a BisGMA:TEGDMA composite as a function of the applied radiant exposure. *J Biomed Mater Res B Appl Biomater* 2008; 84:503-509.
13. Calheiros FC, Sadek FT, Braga RR, Cardoso PE. Polymerization contraction stress of low-shrinkage composites and its correlation with microleakage in class V restorations. *J Dent* 2004; 32:407-412.
14. Camposilvan E, Leone R, Gremillard L, Sorrentino R, Zarone F, Ferrari M, Chevalier J. Aging resistance, mechanical properties and translucency of different yttria-stabilized zirconia ceramics for monolithic dental crown applications. *Dent Mater* 2018; 34:879-890.
15. Canullo L, Micarelli C, Lembo-Fazio L, Iannello G, Clementini M. Microscopical and microbiologic characterization of customized titanium abutments after different cleaning procedures. *Clin Oral Implants Res* 2014; 25:328-336.
16. Canullo L, Peñarrocha D, Clementini M, Iannello G, Micarelli C. Impact of plasma of argon cleaning treatment on implant abutments in patients with a history of periodontal disease and thin biotype: radiographic results at 24-month follow-up of a RCT. *Clin Oral Implants Res* 2015; 26:8-14.
17. Canullo L, Tallarico M, Chu S, Peñarrocha D, Özcan M, Pesce P. Cleaning, Disinfection, and Sterilization Protocols Employed for Customized Implant Abutments: An International Survey of 100 Universities Worldwide. *Int J Oral Maxillofac Implants* 2017; 32:774-778.
18. Canullo L, Tallarico M, Peñarrocha M, Corrente G, Fiorellini J, Peñarrocha D. Plasma of Argon Cleaning Treatment on Implant Abutments in Periodontally Healthy Patients: Six Years Postloading Results of a Randomized Controlled Trial. *Int J Periodontics Restorative Dent* 2017; 37:683-690.
19. Chavali R, Lin CP, Lawson NC. Evaluation of Different Polishing Systems and Speeds for Dental Zirconia. *J Prosthodont* 2017; 26:410-418.
20. Cramer NB, Stansbury JW, Bowman CN. Recent advances and developments in composite dental restorative materials. *J Dent Res* 2011; 90:402-416.

21. Davenport JC, Basker RM, Heath JR, Ralph JP, Glantz PO, Hammond P. Clasp design. *Br Dent J* 2001; 190:71-81.
22. Dorf T, Perkowska K, Janiszewska M, Ferrer I, Ciurana J. Effect of the main process parameters on the mechanical strength of polyphenylsulfone (PPSU) in ultrasonic micro-moulding process. *Ultrason Sonochem* 2018; 46:46-58.
23. dos Santos RL, de Sampaio GA, de Carvalho FG, Pithon MM, Guênes GM, Alves PM. Influence of degree of conversion on the biocompatibility of different composites in vivo. *J Adhes Dent* 2014; 16:15-20.
24. Drummond JL, King TJ, Bapna MS, Koperski RD. Mechanical property evaluation of pressable restorative ceramics. *Dent Mater* 2000; 16:226-233.
25. Dukic W. Radiopacity of Composite Luting Cements Using a Digital Technique. *J Prosthodont* 2019; 28:e450-e459.
26. Durner J, Obermaier J, Draenert M, Ilie N. Correlation of the degree of conversion with the amount of elutable substances in nano-hybrid dental composites. *Dent Mater* 2012; 28:1146-1153.
27. Ebeid K, Wille S, Hamdy A, Salah T, El-Etreby A, Kern M. Effect of changes in sintering parameters on monolithic translucent zirconia. *Dent Mater* 2014; 30:e419-e424.
28. Edelhoff D, Liebermann A, Beuer F, Stimmelmayer M, Güth JF. Minimally invasive treatment options in fixed prosthodontics. *Quintessence Int* 2016; 47:207-216.
29. Ehlers V, Kampf G, Stender E, Willershausen B, Ernst CP. Effect of thermocycling with or without 1 year of water storage on retentive strengths of luting cements for zirconia crowns. *J Prosthet Dent* 2015; 113:609-615.
30. El-Mowafy O, Brochu JF. Longevity and clinical performance of IPS-Empress ceramic restorations--a literature review. *J Can Dent Assoc* 2002; 68:233-237.
31. Ersoy NM, Aydoğdu HM, Değirmenci BU, Çökük N, Sevimay M. The effects of sintering temperature and duration on the flexural strength and grain size of zirconia. *Acta Biomater Odontol Scand* 2015; 1:43-50.

32. Fabbri G, Zarone F, Dellificorelli G, Cannistraro G, De Lorenzi M, Mosca A, Sorrentino R. Clinical evaluation of 860 anterior and posterior lithium disilicate restorations: retrospective study with a mean follow-up of 3 years and a maximum observational period of 6 years. *Int J Periodontics Restorative Dent* 2014; 34:165-177.
33. Ferracane JL. Developing a more complete understanding of stresses produced in dental composites during polymerization. *Dent Mater* 2005; 21:36-42.
34. Ferrario VF, Sforza C, Serrao G, Dellavia C, Tartaglia GM. Single tooth bite forces in healthy young adults. *J Oral Rehabil* 2004; 31:18-22.
35. Fischer H, Schäfer M, Marx R. Effect of surface roughness on flexural strength of veneer ceramics. *J Dent Res* 2003; 82:972-975.
36. Flury S, Lussi A, Peutzfeldt A, Zimmerli B. Push-out bond strength of CAD/CAM-ceramic luted to dentin with self-adhesive resin cements. *Dent Mater* 2010; 26:855-863.
37. Frassetto A, Navarra CO, Marchesi G, Turco G, Di Lenarda R, Breschi L, Ferracane JL, Cadenaro M. Kinetics of polymerization and contraction stress development in self-adhesive resin cements. *Dent Mater* 2012; 28:1032-1039.
38. Frauscher KE, Ilie N. Degree of conversion of nano-hybrid resin-based composites with novel and conventional matrix formulation. *Clin Oral Investig* 2013; 17:635-642.
39. Fu L, Engqvist H, Xia W. Glass-Ceramics in Dentistry: A Review. *Materials (Basel)* 2020; 13:1049.
40. Fuhrmann G, Steiner M, Freitag-Wolf S, Kern M. Resin bonding to three types of polyaryletherketones (PAEKs)-durability and influence of surface conditioning. *Dent Mater* 2014; 30:357-363.
41. Gao S, Gao S, Xu B, Yu H. Effects of Different pH-Values on the Nanomechanical Surface Properties of PEEK and CFR-PEEK Compared to Dental Resin-Based Materials. *Materials (Basel)* 2015; 8:4751-4767.
42. Garling A, Sasse M, Becker MEE, Kern M. Fifteen-year outcome of three-unit fixed dental prostheses made from monolithic lithium disilicate ceramic. *J Dent* 2019; 89:103178.

43. Gehrke P, Tabellion A, Fischer C. Microscopical and chemical surface characterization of CAD/CAM zirconia abutments after different cleaning procedures. A qualitative analysis. *J Adv Prosthodont* 2015; 7:151-159.
44. Gehrt M, Wolfart S, Rafai N, Reich S, Edelhoff D. Clinical results of lithium-disilicate crowns after up to 9 years of service. *Clin Oral Investig* 2013; 17:275-284.
45. Ghavami-Lahiji M, Firouzmanesh M, Bagheri H, Jafarzadeh Kashi TS, Razazpour F, Behroozibakhsh M. The effect of thermocycling on the degree of conversion and mechanical properties of a microhybrid dental resin composite. *Restor Dent Endod* 2018; 43:e26.
46. Goncalves F, Kawano Y, Braga RR. Contraction stress related to composite inorganic content. *Dent Mater* 2010; 26:704-709.
47. Guazzato M, Albakry M, Ringer SP, Swain MV. Strength, fracture toughness and microstructure of a selection of all-ceramic materials. Part I. Pressable and alumina glass-infiltrated ceramics. *Dent Mater* 2004; 20:441-448.
48. Halvorson RH, Erickson RL, Davidson CL. The effect of filler and silane content on conversion of resin-based composite. *Dent Mater* 2003; 19:327-333.
49. Hattar S, Hatamleh M, Khraisat A, Al-Rabab'ah M. Shear bond strength of self-adhesive resin cements to base metal alloy. *J Prosthet Dent* 2014; 111:411-415.
50. Heimer S, Schmidlin PR, Stawarczyk B. Discoloration of PMMA, composite, and PEEK. *Clin Oral Investig* 2017; 21:1191-1200.
51. Heintze SD, Cavalleri A, Forjanic M, Zellweger G, Rousson V. Wear of ceramic and antagonist--a systematic evaluation of influencing factors in vitro. *Dent Mater* 2008; 24:433-449.
52. Inokoshi M, Zhang F, De Munck J, Minakuchi S, Naert I, Vleugels J, Van Meerbeek B, Vanmeensel K. Influence of sintering conditions on low-temperature degradation of dental zirconia. *Dent Mater* 2014; 30:669-678.
53. Jandt KD, Mills RW. A brief history of LED photopolymerization. *Dent Mater* 2013; 29:605-617.
54. Jansen JU, Lümke N, Letz I, Pfefferle R, Sener B, Stawarczyk B. Impact of high-speed sintering on translucency, phase content, grain sizes, and flexural strength of 3Y-TZP and 4Y-TZP zirconia materials. *J Prosthet Dent* 2019; 122:396-403.

55. Janyavula S, Lawson N, Cakir D, Beck P, Ramp LC, Burgess JO. The wear of polished and glazed zirconia against enamel. *J Prosthet Dent* 2013; 109:22-29.
56. Juntavee N, Dangsuwan C. Role of coefficient of thermal expansion on bond strength of ceramic veneered yttrium-stabilized zirconia. *J Clin Exp Dent* 2018; 10:e279-e286.
57. Kaizer MR, Gierthmuehlen PC, Dos Santos MB, Cava SS, Zhang Y. Speed sintering translucent zirconia for chairside one-visit dental restorations: Optical, mechanical, and wear characteristics. *Ceram Int* 2017; 43:10999-11005.
58. Kern M, Lehmann F. Influence of surface conditioning on bonding to polyetheretherketon (PEEK). *Dent Mater* 2012; 28:1280-1283.
59. Kessler A, Hickel R, Reymus M. 3D Printing in Dentistry-State of the Art. *Oper Dent* 2020; 45:30-40.
60. Keul C, Liebermann A, Schmidlin PR, Roos M, Sener B, Stawarczyk B. Influence of PEEK surface modification on surface properties and bond strength to veneering resin composites. *J Adhes Dent* 2014; 16:383-392.
61. Kim MJ, Ahn JS, Kim JH, Kim HY, Kim WC. Effects of the sintering conditions of dental zirconia ceramics on the grain size and translucency. *J Adv Prosthodont* 2013; 5:161-166.
62. Kim MJ, Kim YK, Kim KH, Kwon TY. Shear bond strengths of various luting cements to zirconia ceramic: surface chemical aspects. *J Dent* 2011; 39:795-803.
63. Koletsi D, Iliadi A, Eliades T, Eliades G. In Vitro Simulation and In Vivo Assessment of Tooth Wear: A Meta-Analysis of In Vitro and Clinical Research. *Materials (Basel)* 2019; 12:3575.
64. Krämer N, Reinelt C, Richter G, Petschelt A, Frankenberger R. Nanohybrid vs. fine hybrid composite in Class II cavities: clinical results and margin analysis after four years. *Dent Mater* 2009; 25:750-759.
65. Lacerda-Santos R, De Farias MI, De Carvalho FG, Pithon MM, Alves PM, Tanaka OM, Guênes GM. In vivo biocompatibility versus degree of conversion of resin-reinforced cements in different time periods. *Microsc Res Tech* 2014; 77:335-340.
66. Lassila LV, Vallittu PK. Effect of water and artificial saliva on the low cycle fatigue resistance of cobalt-chromium dental alloy. *J Prosthet Dent* 1998; 80:708-713.

67. Lawson NC, Janyavula S, Syklawer S, McLaren EA, Burgess JO. Wear of enamel opposing zirconia and lithium disilicate after adjustment, polishing and glazing. *J Dent* 2014; 42:1586-1591.
68. Lee EY, Jun SG, Wright RF, Park EJ. Comparative study of the shear bond strength of various veneering materials on grade II commercially pure titanium. *J Adv Prosthodont* 2015; 7:69-75.
69. Lee S-E, Bae J-H, Choi J-W, Jeon Y-C, Jeong C-M, Yoon M-J, Huh J-B. Comparative Shear-Bond Strength of Six Dental Self-Adhesive Resin Cements to Zirconia. *Materials* 2015; 8:3306-3315.
70. Liebermann A, Roos M, Stawarczyk B. The Effect of Different Storage Media on Color Stability of Self-Adhesive Composite Resin Cements for up to One Year. *Materials (Basel)* 2017; 10:300.
71. Ligon SC, Liska R, Stampfl J, Gurr M, Mülhaupt R. Polymers for 3D Printing and Customized Additive Manufacturing. *Chem Rev* 2017; 117:10212-10290.
72. Lucas TJ, Lawson NC, Janowski GM, Burgess JO. Effect of grain size on the monoclinic transformation, hardness, roughness, and modulus of aged partially stabilized zirconia. *Dent Mater* 2015; 31:1487-1492.
73. Lümke N, Eichberger M, Murphy RJ, Stawarczyk B. Suitability of the new Aryl-Ketone-Polymer indicated for removable partial dentures: Analysis of elastic properties and bond strength to denture resin. *Dent Mater J* 2020; 39:539-546.
74. Lüthy H, Loeffel O, Hämmerle CH. Effect of thermocycling on bond strength of luting cements to zirconia ceramic. *Dent Mater* 2006; 22:195-200.
75. Mai HN, Hong SH, Kim SH, Lee DH. Effects of different finishing/polishing protocols and systems for monolithic zirconia on surface topography, phase transformation, and biofilm formation. *J Adv Prosthodont* 2019; 11:81-87.
76. Merk S, Wagner C, Stock V, Eichberger M, Schmidlin PR, Roos M, Stawarczyk B. Suitability of Secondary PEEK Telescopic Crowns on Zirconia Primary Crowns: The Influence of Fabrication Method and Taper. *Materials (Basel)* 2016; 9:908.
77. Mishra S, Chowdhary R. PEEK materials as an alternative to titanium in dental implants: A systematic review. *Clin Implant Dent Relat Res* 2019; 21:208-222.

78. Miyazaki T, Hotta Y, Kunii J, Kuriyama S, Tamaki Y. A review of dental CAD/CAM: current status and future perspectives from 20 years of experience. *Dent Mater J* 2009; 28:44-56.
79. Mohamad D, Young RJ, Mann AB, Watts DC. Post-polymerization of dental resin composite evaluated with nanoindentation and micro-Raman spectroscopy. *Arch Orofac Sci* 2007; 2:26-31.
80. Mörmann WH, Stawarczyk B, Ender A, Sener B, Attin T, Mehl A. Wear characteristics of current aesthetic dental restorative CAD/CAM materials: two-body wear, gloss retention, roughness and Martens hardness. *J Mech Behav Biomed Mater* 2013; 20:113-125.
81. Müller S, Eickholz P, Reitmeir P, Eger T. Long-term tooth loss in periodontally compromised but treated patients according to the type of prosthodontic treatment. A retrospective study. *J Oral Rehabil* 2013; 40:358-367.
82. Naenni N, Bindl A, Sax C, Hämmerle C, Sailer I. A randomized controlled clinical trial of 3-unit posterior zirconia-ceramic fixed dental prostheses (FDP) with layered or pressed veneering ceramics: 3-year results. *J Dent* 2015; 43:1365-1370.
83. Najeeb S, Zafar MS, Khurshid Z, Siddiqui F. Applications of polyetheretherketone (PEEK) in oral implantology and prosthodontics. *J Prosthodont Res* 2016; 60:12-19.
84. Nakajima K, Odatsu T, Shinohara A, Baba K, Shibata Y, Sawase T. Effects of cleaning methods for custom abutment surfaces on gene expression of human gingival fibroblasts. *J Oral Sci* 2017; 59:533-539.
85. Ngo TD, Kashani A, Imbalzano G, Nguyen KTQ, Hui D. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Compos B Eng* 2018; 143:172-196.
86. Obradović-Đuričić K, Medić V, Radišić M, Laušević M. Correlation between the degree of conversion and the elution of leachable components from dental resin-based cements. *J Serbian Chem Soc* 2011; 76:1307-1323.
87. Olivera AB, Matson E, Marques MM. The effect of glazed and polished ceramics on human enamel wear. *Int J Prosthodont* 2006; 19:547-548.
88. Özcan M, Bernasconi M. Adhesion to zirconia used for dental restorations: a systematic review and meta-analysis. *J Adhes Dent* 2015; 17:7-26.

89. Pameijer CH. A review of luting agents. *Int J Dent* 2012; 2012:752861.
90. Papathanasiou I, Kamposiora P, Papavasiliou G, Ferrari M. The use of PEEK in digital prosthodontics: A narrative review. *BMC Oral Health* 2020; 20:217.
91. Park C, Vang MS, Park SW, Lim HP. Effect of various polishing systems on the surface roughness and phase transformation of zirconia and the durability of the polishing systems. *J Prosthet Dent* 2017; 117:430-437.
92. Peng TY, Ogawa Y, Akebono H, Iwaguro S, Sugeta A, Shimoe S. Finite-element analysis and optimization of the mechanical properties of polyetheretherketone (PEEK) clasps for removable partial dentures. *J Prosthodont Res* 2020; 64:250-256.
93. Petridis H, Garefis P, Hirayama H, Kafantaris NM, Koidis PT. Bonding indirect resin composites to metal: Part 1. Comparison of shear bond strengths between different metal-resin bonding systems and a metal-ceramic system. *Int J Prosthodont* 2003; 16:635-639.
94. Prechtel A, Reymus M, Edelhoff D, Hickel R, Stawarczyk B. Comparison of various 3D printed and milled PAEK materials: Effect of printing direction and artificial aging on Martens parameters. *Dent Mater* 2020; 36:197-209.
95. Prechtel A, Stawarczyk B, Hickel R, Edelhoff D, Reymus M. Fracture load of 3D printed PEEK inlays compared with milled ones, direct resin composite fillings, and sound teeth. *Clin Oral Investig* 2020; 24:3457-3466.
96. Preis V, Grumser K, Schneider-Feyrer S, Behr M, Rosentritt M. The effectiveness of polishing kits: influence on surface roughness of zirconia. *Int J Prosthodont* 2015; 28:149-151.
97. Preis V, Weiser F, Handel G, Rosentritt M. Wear performance of monolithic dental ceramics with different surface treatments. *Quintessence Int* 2013; 44:393-405.
98. Quirynen M, Bollen CM. The influence of surface roughness and surface-free energy on supra- and subgingival plaque formation in man. A review of the literature. *J Clin Periodontol* 1995; 22:1-14.
99. Rashid H. The effect of surface roughness on ceramics used in dentistry: A review of literature. *Eur J Dent* 2014; 8:571-579.

100. Reymus M, Fabritius R, Kessler A, Hickel R, Edelhoff D, Stawarczyk B. Fracture load of 3D-printed fixed dental prostheses compared with milled and conventionally fabricated ones: the impact of resin material, build direction, post-curing, and artificial aging-an in vitro study. *Clin Oral Investig* 2020; 24:701-710.
101. Rosentritt M, Behr M, van der Zel JM, Feilzer AJ. Approach for valuating the influence of laboratory simulation. *Dent Mater* 2009; 25:348-352.
102. Rueggeberg FA. State-of-the-art: dental photocuring--a review. *Dent Mater* 2011; 27:39-52.
103. Saiki O, Koizumi H, Akazawa N, Kodaira A, Okamura K, Matsumura H. Wear characteristics of polished and glazed lithium disilicate ceramics opposed to three ceramic materials. *J Oral Sci* 2016; 58:117-123.
104. Samimi P, Hasankhani A, Matinlinna JP, Mirmohammadi H. Effect of Adhesive Resin Type for Bonding to Zirconia Using Two Surface Pretreatments. *J Adhes Dent* 2015; 17:353-359.
105. Schwitalla AD, Spintig T, Kallage I, Müller WD. Flexural behavior of PEEK materials for dental application. *Dent Mater* 2015; 31:1377-1384.
106. Seghi RR, Rosenstiel SF, Bauer P. Abrasion of human enamel by different dental ceramics in vitro. *J Dent Res* 1991; 70:221-225.
107. Shahmiri R, Standard OC, Hart JN, Sorrell CC. Optical properties of zirconia ceramics for esthetic dental restorations: A systematic review. *J Prosthet Dent* 2018; 119:36-46.
108. Sokolowski G, Szczesio A, Bociog K, Kaluzinska K, Lapinska B, Sokolowski J, Domarecka M, Lukomska-Szymanska M. Dental Resin Cements-The Influence of Water Sorption on Contraction Stress Changes and Hydroscopic Expansion. *Materials (Basel)* 2018; 11:973.
109. Sripetchdanond J, Leevailoj C. Wear of human enamel opposing monolithic zirconia, glass ceramic, and composite resin: an in vitro study. *J Prosthet Dent* 2014; 112:1141-1150.
110. Stawarczyk B, Beuer F, Wimmer T, Jahn D, Sener B, Roos M, Schmidlin PR. Polyetheretherketone-a suitable material for fixed dental prostheses? *J Biomed Mater Res B Appl Biomater* 2013; 101:1209-1216.

111. Stawarczyk B, Eichberger M, Uhrenbacher J, Wimmer T, Edelhoff D, Schmidlin PR. Three-unit reinforced polyetheretherketone composite FDPs: influence of fabrication method on load-bearing capacity and failure types. *Dent Mater J* 2015; 34:7-12.
112. Stawarczyk B, Emslander A, Roos M, Sener B, Noack F, Keul C. Zirconia ceramics, their contrast ratio and grain size depending on sintering parameters. *Dent Mater J* 2014; 33:591-598.
113. Stawarczyk B, Jordan P, Schmidlin PR, Roos M, Eichberger M, Gernet W, Keul C. PEEK surface treatment effects on tensile bond strength to veneering resins. *J Prosthet Dent* 2014; 112:1278-1288.
114. Stawarczyk B, Keul C, Beuer F, Roos M, Schmidlin PR. Tensile bond strength of veneering resins to PEEK: impact of different adhesives. *Dent Mater J* 2013; 32:441-448.
115. Stawarczyk B, Keul C, Eichberger M, Figge D, Edelhoff D, Lümke mann N. Three generations of zirconia: From veneered to monolithic. Part I. *Quintessence Int* 2017; 48:369-380.
116. Stawarczyk B, Özcan M, Hallmann L, Ender A, Mehl A, Hämmerle CH. The effect of zirconia sintering temperature on flexural strength, grain size, and contrast ratio. *Clin Oral Investig* 2013; 17:269-274.
117. Stawarczyk B, Özcan M, Trottmann A, Schmutz F, Roos M, Hämmerle CH. Two-body wear rate of CAD/CAM resin blocks and their enamel antagonists. *J Prosthet Dent* 2013; 109:325-332.
118. Stawarczyk B, Taufall S, Roos M, Schmidlin PR, Lümke mann N. Bonding of composite resins to PEEK: the influence of adhesive systems and air-abrasion parameters. *Clin Oral Investig* 2018; 22:763-771.
119. Stawarczyk B, Thrun H, Eichberger M, Roos M, Edelhoff D, Schweiger J, Schmidlin PR. Effect of different surface pretreatments and adhesives on the load-bearing capacity of veneered 3-unit PEEK FDPs. *J Prosthet Dent* 2015; 114:666-673.
120. Sulaiman TA, Abdulmajeed AA, Donovan TE, Cooper LF, Walter R. Fracture rate of monolithic zirconia restorations up to 5 years: A dental laboratory survey. *J Prosthet Dent* 2016; 116:436-439.

121. Tallarico M. Computerization and Digital Workflow in Medicine: Focus on Digital Dentistry. *Materials (Basel)* 2020; 13:2172.
122. Tanış MC, Akay C, Karakış D. Resin cementation of zirconia ceramics with different bonding agents. *Biotechnol Biotechnol Equip* 2015; 29:363-367.
123. Tannous F, Steiner M, Shahin R, Kern M. Retentive forces and fatigue resistance of thermoplastic resin clasps. *Dent Mater* 2012; 28:273-278.
124. Teichmann M, Göckler F, Weber V, Yildirim M, Wolfart S, Edelhoff D. Ten-year survival and complication rates of lithium-disilicate (Empress 2) tooth-supported crowns, implant-supported crowns, and fixed dental prostheses. *J Dent* 2017; 56:65-77.
125. Tonetto MR, Pinto SC, Rastelli Ade N, Borges AH, Saad JR, Pedro FL, de Andrade MF, Bandéca MC. Degree of conversion of polymer-matrix composite assessed by FTIR analysis. *J Contemp Dent Pract* 2013; 14:76-79.
126. Torii M, Nakata T, Takahashi K, Kawamura N, Shimpo H, Ohkubo C. Fitness and retentive force of cobalt-chromium alloy clasps fabricated with repeated laser sintering and milling. *J Prosthodont Res* 2018; 62:342-346.
127. Tribst JPM, Dal Piva AMO, Borges ALS, Araujo RM, da Silva JMF, Bottino MA, Kleverlaan CJ, de Jager N. Effect of different materials and undercut on the removal force and stress distribution in circumferential clasps during direct retainer action in removable partial dentures. *Dent Mater* 2020; 36:179-186.
128. 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.
129. van der Bilt A, Tekamp A, van der Glas H, Abbink J. Bite force and electromyography during maximum unilateral and bilateral clenching. *Eur J Oral Sci* 2008; 116:217-222.
130. Van Meerbeek B, Yoshihara K, Van Landuyt K, Yoshida Y, Peumans M. From Buonocore's Pioneering Acid-Etch Technique to Self-Adhering Restoratives. A Status Perspective of Rapidly Advancing Dental Adhesive Technology. *J Adhes Dent* 2020; 22:7-34.

131. Wimmer T, Huffmann AM, Eichberger M, Schmidlin PR, Stawarczyk B. Two-body wear rate of PEEK, CAD/CAM resin composite and PMMA: Effect of specimen geometries, antagonist materials and test set-up configuration. *Dent Mater* 2016; 32:e127-e136.
132. Yamamoto T, Ferracane JL, Sakaguchi RL, Swain MV. Calculation of contraction stresses in dental composites by analysis of crack propagation in the matrix surrounding a cavity. *Dent Mater* 2009; 25:543-550.
133. Yamazaki T, Murakami N, Suzuki S, Handa K, Yatabe M, Takahashi H, Wakabayashi N. Influence of block-out on retentive force of thermoplastic resin clasps: an in vitro experimental and finite element analysis. *J Prosthodont Res* 2019; 63:303-308.
134. Yang C, Tian X, Li D, Cao Y, Zhao F, Shi C. Influence of thermal processing conditions in 3D printing on the crystallinity and mechanical properties of PEEK material. *J Mater Process Technol* 2017; 248:1-7.
135. Zarone F, Di Mauro MI, Ausiello P, Ruggiero G, Sorrentino R. Current status on lithium disilicate and zirconia: a narrative review. *BMC Oral Health* 2019; 19:134.
136. Zhang Y. Making yttria-stabilized tetragonal zirconia translucent. *Dent Mater* 2014; 30:1195-1203.
137. Zimmermann M, Ender A, Mehl A. Influence of CAD/CAM Fabrication and Sintering Procedures on the Fracture Load of Full-Contour Monolithic Zirconia Crowns as a Function of Material Thickness. *Oper Dent* 2020; 45:219-226.

6. Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die diese Arbeit ermöglicht und unterstützt haben.

Besonders möchte ich Prof. Dr. med. dent. Daniel Edelhoff für die hervorragende fachliche wie auch persönliche Betreuung dieser Arbeit danken.

Prof. Dr. med. dent. Reinhard Hickel danke ich neben der Betreuung meiner Habilitation für seine langjährige Unterstützung in der Gestaltung der zahnmedizinischen Lehre.

Prof. Dr. med. Dennis Nowak danke ich für die Unterstützung und Betreuung meiner Habilitation.

Ein herzlicher Dank gilt meiner Mentorin Prof. Dr. Dipl. Ing. (FH) Bogna Stawarczyk, M.Sc., die mir das wissenschaftliche Arbeiten beigebracht und mein Interesse an der Forschung durch ihre Begeisterung und ihr unerschöpfliches Wissen in diesem Fach gefördert hat. Danke für deine grenzenlose Unterstützung und die großartige Zusammenarbeit.

Des Weiteren möchte ich mich bei meinen Freunden und Kollegen für die wunderschöne gemeinsame Zeit bedanken.

Abschließend möchte ich mich bei meiner Familie bedanken, die mir diesen Lebensweg durch ihre uneingeschränkte Unterstützung ermöglicht haben.