

Aus der Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik
Klinikum der Ludwig-Maximilians-Universität München



***Einfluss der Anzahl der Brände beim Verblenden von Zirkonoxid-
Restorationen auf die thermischen und mechanischen
Eigenschaften***

Dissertation

zum Erwerb des Doktorgrades der Zahnmedizin

an der Medizinischen Fakultät der

Ludwig-Maximilians-Universität München

vorgelegt von

Justine Hensel

aus

Starnberg

2022

Mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät der
Ludwig-Maximilians-Universität München

Erster Gutachter: Prof. Dr. Bogna Stawarczyk

Zweiter Gutachter: Priv. Doz. Dr. Anja Liebermann

Dritter Gutachter: Prof. Dr. Karin Huth

ggf. weitere Gutachter:

Mitbetreuung durch den
promovierten Mitarbeiter:

Dekan: Prof. Dr. med. Thomas Gudermann

Tag der mündlichen Prüfung: 12.09.2022



Eidesstattliche Versicherung

Hensel, Justine

Name, Vorname

Ich erkläre hiermit an Eides statt,

dass ich die vorliegende Dissertation mit dem Titel:

Einfluss der Anzahl der Brände beim Verblenden von Zirkonoxid-Restaurationen auf die thermischen und mechanischen Eigenschaften

selbständig verfasst, mich außer der angegebenen keiner weiteren Hilfsmittel bedient und alle Erkenntnisse, die aus dem Schrifttum ganz oder annähernd übernommen sind, als solche kenntlich gemacht und nach ihrer Herkunft unter Bezeichnung der Fundstelle einzeln nachgewiesen habe.

Ich erkläre des Weiteren, dass die hier vorgelegte Dissertation nicht in gleicher oder in ähnlicher Form bei einer anderen Stelle zur Erlangung eines akademischen Grades eingereicht wurde.

München, 26.09.2022

Justine Hensel

Ort, Datum

Unterschrift Doktorandin bzw. Doktorand

Meiner geliebten Familie.

Inhaltsverzeichnis

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	- 6 -
PUBLIKATIONSLISTE	- 7 -
EINLEITUNG.....	- 8 -
BEITRAG DER DOKTORANDIN	- 12 -
EIGENE ARBEITEN.....	- 14 -
HENSEL J, REISE M, LIEBERMANN A, BUSER R, STAWARCZYK B. IMPACT OF MULTIPLE FIRINGS ON THERMAL PROPERTIES AND BOND STRENGTH OF VENEERED ZIRCONIA RESTORATIONS. J MECH BEHAV BIOMED MAT 2022;128:E105134 (HTTPS://DOI.ORG/10.1016/J.JMBBM.2022.105134) IF 2022: 4.042.....	- 14 -
HENSEL J, REISE M, LIEBERMANN A, BUSER R, STAWARCZYK B. IMPACT OF MULTIPLE FIRINGS ON FRACTURE LOAD OF VENEERED ZIRCONIA RESTORATIONS. J MECH BEHAV BIOMED MAT 2022;130:E105213 (HTTPS://DOI.ORG/10.1016/J.JMBBM.2022.105213) IF 2022: 4.042	- 16 -
DISKUSSION	- 18 -
EINFLUSS VON WIEDERHOLTEN BRÄNDEN AUF DIE THERMISCHEN EIGENSCHAFTEN UND DIE VERBUNDFESTIGKEIT VERBLENDER ZRO ₂ -RESTAURATIONEN.....	- 18 -
EINFLUSS VON WIEDERHOLTEN BRÄNDEN AUF DIE BRUCHFESTIGKEIT VOLLVERBLENDER ZRO ₂ -RESTAURATIONEN	- 22 -
ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	- 27 -
ENGLISCHE ZUSAMMENFASSUNG.....	- 29 -
LITERATURVERZEICHNIS.....	- 31 -
DANKSAGUNG	- 36 -

Abkürzungsverzeichnis

WAK = Wärmeausdehnungskoeffizient

T_G = Glasübergangstemperatur

ZrO_2 = Zirkon(iumdi)oxid

3Y-TZP = mit 3 Mol-% Yttriumoxid teil-stabilisiertes ZrO_2

ZRO = zirkon (Herstellernamenname der Verblendkeramik)

ZRT = zirkon titan (Herstellernamenname der Verblendkeramik)

HFZ = zirkon HFZ (Herstellernamenname der Verblendkeramik)

STR = structure (Herstellernamenname der Verblendkeramik)

Al_2O_3 = (Di-)Aluminium(tri)oxid

Publikationsliste

- . Hensel J, Reise M, Liebermann A, Buser R, Stawarczyk B. Impact of multiple firings on thermal properties and bond strength of veneered zirconia restorations. J Mech Behav Biomed Mat 2022;128:e105134 (<https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2022.105134>)
IF 2022: 4.042

- . Hensel J, Reise M, Liebermann A, Buser R, Stawarczyk B. Impact of multiple firings on fracture load of veneered zirconia restorations. J Mech Behav Biomed Mat 2022;130:e105213 (<https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2022.105213>)
IF 2022: 4.042

Einleitung

Der Anspruch von Patient*innen nach ästhetisch hochwertigem Zahnersatz ist in den vergangenen Jahren deutlich gestiegen. Eine vollkeramische Restauration, die vom natürlichen Zahn kaum noch zu unterscheiden ist, erfährt bei Zahnärzt*innen und Techniker*innen eine wachsende Nachfrage, da sie nicht nur funktionell eine sehr verlässliche Versorgung mit hoher Stabilität darstellt, sondern gerade der metall-keramischen Versorgung gegenüber mit überlegener Ästhetik punktet (Fehmer et al., 2014; Stawarczyk et al., 2017).

Das Zirkoniumdioxid, oder kurz Zirkonoxid (ZrO_2), gehört zur Werkstoffgruppe der Oxidkeramiken. Durch seinen hohen kristallinen Anteil weist es sehr gute mechanische Eigenschaften (Stabilisierung mit Yttriumoxid) auf und zählt zu den dentalen Keramiken mit der höchsten Biegefestigkeit (500-1600 MPa) (Lümkemann & Stawarczyk, 2021; Stawarczyk et al., 2012; Zadeh et al., 2018) und Bruchzähigkeit ($3-8 \text{ MPa} \times \text{m}^{1/2}$) (Guazzato et al., 2004; Turon-Vinas & Anglada, 2018; Zadeh et al., 2018). Es überzeugt mit einer hervorragenden Biokompatibilität, da es in der höchsten Oxidationsstufe liegt und wird historisch als Gerüstmaterial verwendet (Babu et al., 2015; Piconi & Maccauro, 1999; Stawarczyk et al., 2017). Aufgrund seiner dichten kristallinen Struktur erscheint das ZrO_2 (3Y-TZP) jedoch opak und wird aus ästhetischen Gründen gerade im Frontzahnbereich meist mit transluzenteren (glasphasereicheren) Keramiken verblendet (Vichi et al., 2011; Zadeh et al., 2018).

Für eine solche Verblendung werden geeignete Silikatkeramiken verwendet, die aufgrund ihres hohen Anteils an Glasphase eine hervorragende Ästhetik gewährleisten, jedoch eine deutlich geringere Biegefestigkeit (60-150 MPa) als das Gerüstmaterial aufweisen (Fischer et al., 2008). Diese Verblendkeramiken beinhalten im Wesentlichen Kali- und Natronfeldspat, die nach dem Sinterbrand beim Erstarren neben kristallinen Phasen meist einen großen Anteil an Glasphase bilden (Kelly, 1997; Reise, 2004). Die kristalline Phase der Verblendkeramiken, z.B. Leuzit, steuert den WAK der Keramik, erhöht die Festigkeit, verlangsamt die Rissausbreitung durch das Material und sorgt für Standhaftigkeit während dem Brennvorgang (Babu et al., 2015; Cesar et al., 2005; McLaren & Giordano, 2010; Reise, 2004).

Die Verblendtechnik ist schon von den Metall-Keramik-Restaurationen bekannt und zeigte bislang sehr gute klinische Ergebnisse. Jedoch wurde das sogenannte „Chipping“, also die Entstehung einer Fraktur innerhalb der Verblendkeramik, häufig als Hauptfaktor für das Versagen der Restauration beobachtet (Heintze & Rousson, 2010). Ein solches Abplatzen hat sowohl funktionelle als auch ästhetische Einbußungen zur Folge und die Restauration muss je nach Ausmaß im ungünstigsten Falle ersetzt werden. In diesem Zusammenhang sind zahlreiche Studien vorhanden, die ein höheres Vorkommen von Abplatzungen bei vollkeramischen Restaurationen als bei jenen mit Metall als Gerüstmaterial beschreiben (Pjetursson et al., 2015; Pjetursson et al., 2018).

Ein vorherrschender Grund für dieses Versagen scheint wohl die Entstehung innerer Spannungen zu sein, die das spröde Material ZrO_2 weniger gut kompensieren kann als das bislang häufig verwendete Metall-Gerüst (Baldassarri et al., 2012; Guess et al., 2008; Swain, 2009). Es ist daher wichtig den Gesamtspannungszustand der Restauration, also die Summe aus Spannungen, die von außen durch Funktion (Kauen) und Dysfunktion (Knirschen, Pressen) auftreten, und Eigenspannungen möglichst gering zu halten. Diese Eigenspannungen sind vor Allem Wärmespannungen, die der Restauration während der Fertigung zugeführt und beim Abkühlen „gespeichert“ werden (Benetti et al., 2014; Tholey et al., 2011). In einigen Studien, die sich mit diesen Eigen- bzw. Wärmespannungen beschäftigt haben, wurden Empfehlungen ausgesprochen, die unter Anderem langsamere Aufheiz- und Abkühlraten (Al-Amleh et al., 2014; Benetti et al., 2013; Benetti et al., 2014; Rues et al., 2010; Swain et al., 2019; Tan et al., 2012; Tang et al., 2017), ein anatomisch gestaltetes Gerüst mit Unterstützung der Verblendung und entsprechender Mindestschichtstärke der Verblendung als Ziel fordern (Stawarczyk et al., 2017; Swain, 2009). Da die Fraktur meist innerhalb der Verblendung auftritt (= kohäsiver Bruch), kann eine zu geringe Verbundfestigkeit zwischen dieser und dem Gerüstmaterial ausgeschlossen werden (Heintze & Rousson, 2010). Ebenso genügt die Biegefestigkeit der Verblendkeramik den Mindestanforderungen der Norm von 50 MPa (ISO6872, 2019) und ist den Werten der Verblendkeramik für Metallgerüste ähnlich (Fischer et al., 2008).

In großer Übereinstimmung wird berichtet, dass die thermischen Eigenschaften der jeweiligen Materialien, der Wärmeausdehnungskoeffizient (WAK) und die Glasübergangstemperatur (T_G), eine entscheidende Rolle für die Entstehung dieser Wärme-Eigenspannungen spielen (Rodrigues et al., 2019; Swain, 2009). Der WAK beschreibt die lineare Dimensionsänderung $\Delta\alpha$ von Raumtemperatur bis meist T_G . Die T_G ist der spezifische Temperaturbereich eines Materials, in dem sich der Aggregatzustand von viskös zu fest ändert und umgekehrt. Zur Ermittlung beider Parameter gilt laut Norm die Dilatometrie als Methode der Wahl.

Bestehen nun Unterschiede zwischen dem WAK-Wert des Gerüstwerkstoffes (ZrO_2) und dem WAK-Wert des Verblendmaterials, bedeutet dies, dass die beiden Schichten unterschiedlich stark kontrahieren und dadurch innere Spannungen entstehen. Sind diese Spannungen aufgrund eines zu großen Unterschiedes der beiden Werte groß, spricht man von einem sogenannten ‚thermal misfit‘. Um dies zu vermeiden und damit die Gesamtstabilität hochzuhalten, müssen beide Werte aufeinander abgestimmt sein (Anusavice et al., 1989; Fischer et al., 2007; Göstemeyer et al., 2012). Bevorzugt wird hierbei eine leicht positive Differenz, um Druckspannungen an der Oberfläche der Verblendung zu erzeugen und Risse durch Zugspannungen zu vermeiden (Swain, 2009).

Keramiken tolerieren Druckbelastungen deutlich besser als Zugbelastungen. Der Grund hierfür sind Mikrorisse, die während der Verarbeitung an der Oberfläche entstehen. Diese werden unter Druckbelastung zusammengedrückt, können bei Zugbelastung aber weiter geöffnet werden. Bei Keramiken kommt es dann aufgrund des niedrigeren E-Moduls im Vergleich zu den Metallen unter zu hoher Belastung zur Zerstörung der atomaren Bindungen und damit zur Rissausbreitung (Fischer et al., 2008). Eine positive Differenz der WAK-Werte beider zu verarbeitenden Materialien wird erreicht, indem man einen WAK-Wert für die Verblendkeramik wählt, der etwa 10% unter dem des Gerüstmaterials liegt (Juntavee & Dangsuwan, 2018). Die „schädlichen“ Zugspannungen in der Verblendung lassen sich somit durch „gute“ Druckspannungen „abpuffern“ und reduzieren. Die Differenz sollte gerade so groß sein, dass die dadurch entstandenen Druckspannungen die durch das Kauen geweckten Zugspannungen abpuffern können, sie sollte aber so klein sein, dass die durch Fertigung erzeugten Wärme-Eigenspannungen unkritisch bleiben und nicht zu einer spontanen Abplatzung führen (Swain, 2009).

Einen ebenso bedeutenden Faktor in der Entstehung von Wärme-Eigenstressungen spielt die T_G . Die verblendete Restauration wird einige Grad oberhalb der T_G im Ofen erhitzt und kann im erweichten Zustand, bis zum Passieren der Übergangstemperatur, durch molekulare Neuarrangements innere Spannungen ausgleichen. Wenn die Schichten dann bei Öffnung des Ofens anfangen zu erstarren, entstehen aufgrund der schrittweisen Abkühlung Temperaturgradienten durch die Schichten hindurch, was wiederum zu Spannungen führt. Diese werden mit dem Erhitzen während der Abkühlung in der Verblendung gespeichert. Dies erklärt, wieso die Entstehung der Spannungen nur im Bereich zwischen Raumtemperatur und T_G möglich ist und die T_G daher so wichtig ist (Tholey et al., 2011). Dies lässt vermuten, dass je höher die T_G liegt, die Gesamtrestauration über eine größere Spanne hinweg Spannungen aufbauen kann. Liegt zusätzlich eine hohe WAK-Differenz vor, addieren sich diese Spannungen. Fischer et al. (Fischer et al., 2007) gibt in einer Untersuchung eine deutliche Korrelation zwischen WAK und T_G an und deklariert $\Delta\alpha \times \Delta T_G$ als Maß für die Entstehung von Wärmespannungen in der Restauration.

Es ist von großer Bedeutung, dass sich die thermischen Eigenschaften der Verblendkeramiken (WAK und T_G) auch durch wiederholtes Erhitzen und Abkühlen so wenig wie möglich verändern, um innere Spannungen konstant gering zu halten und eine Voraussagbarkeit garantieren zu können. Aus diesem Grund sind zahlreiche Studien über den Einfluss wiederholter Brände und die Auswirkungen auf beispielsweise die Verbundfestigkeit zwischen Verblendung und Gerüst oder auf die Biegefestigkeit der Verblendkeramik selbst oder der Vollkeramik-Restauration vorhanden (Lu et al., 2012; Queiroz et al., 2012; Trindade et al., 2013; Vichi et al., 2015; Zeighami et al., 2013). Tang et al. (Tang et al.) und Alkurt et al. (Alkurt et al., 2016; Tang et al., 2012) veröffentlichten Ergebnisse, die eine Verbesserung der Dichte und Oberflächenhärte nach wiederholten Bränden zeigten.

Schwieriger zu finden sind hingegen Studien, die die thermischen Eigenschaften über eine höhere Anzahl an Bränden und deren Einfluss auf mechanische Eigenschaften untersuchten. Einige Veröffentlichungen gaben die Veränderung des Leuzit-Gehaltes in der Verblendkeramik während Wärmebehandlungen als Grund für unterschiedliche mechanische Eigenschaften an, da Leuzit den WAK der Keramik bekanntlich beeinflusst und sprachen daher Empfehlungen aus,

Mehrfachbrände, wenn möglich, zu vermeiden. Eine Abnahme des Leuzitgehalts bei mehrfacher Wärmebehandlung gibt beispielsweise eine Studie von Mackert et al. an (Mackert et al., 2003). Isgrò et al. (Isgrò et al., 2005) untersuchte in einer seiner Arbeiten die Auswirkungen von bis zu 4 Bränden auf den WAK verschiedener Verblendkeramiken und bestätigt auch, dass die Keramiken ohne Leuzit eine bessere thermische Stabilität aufwiesen.

Die übliche Vorgehensweise der Herstellung verblendeter Restaurationen ist das schrittweise Auftragen des mit Modellierflüssigkeit angedickten Keramikpulvers auf das – in diesem Falle – 3Y-TZP-Gerüst. Normalerweise sind wenigstens 3 Brände für die Herstellung einer verblendeten Restauration notwendig; ein Dentin-, ein Schmelz- und ein Glanz-Brand. Da es in der Praxis aber auch üblich ist, dass aufgrund von ästhetischen oder funktionellen Korrekturen mehrere Male gebrannt werden muss, ist es wichtig eine Voraussagbarkeit über das thermische Verhalten der Materialien zu haben. Techniker*innen und Zahnärzt*innen sollten darüber Kenntnis besitzen, wie sich die Restauration in ihren thermischen und mechanischen Eigenschaften über mehrere Brände hinweg verhält.

Aus diesem Grund ist der Zweck dieser Forschungsarbeit gewesen, herauszufinden, ob und wie sich die thermischen Eigenschaften von Verblendkeramiken und ZrO_2 über eine unterschiedliche Anzahl von Bränden hinweg verändern und wie sich dies in einer ersten Studie gegebenenfalls auf die Verbundfestigkeit zwischen Verblendung und Gerüst auswirkt. In einer zweiten Studie wurde unter Verwendung der identischen Materialien und unter Einbeziehen der vorherigen Ergebnisse die Gesamtstabilität von verblendeten ZrO_2 -Kronen nach mehrfachen Bränden untersucht.

Beitrag der Doktorandin

Mein Beitrag in beiden Studien ‚Impact of multiple firings on thermal properties and bond strength of veneered zirconia restorations‘, sowie ‚Impact of multiple firings on fracture load of veneered zirconia restorations‘ bestand in der Mitentwicklung des Study Designs, Herstellung der Prüfkörper, der Durchführung der Versuche, Datenüberwachung und -Kontrolle, Auswertung und Analyse der

Ergebnisse sowie im Verfassen der Manuskripte. Die Dilatometrie fand außer Haus durch Herrn Dr. Michael Reise, der auch Ko-Autor war, statt. Nach umfänglicher Einweisung führte ich eigenständig im Zuge der ersten Studie die Rissbeginnprüfung nach Schwickerath und für die zweite Studie dann den Druck-Scher-Test nach Voss an der Universalprüfmaschine durch. Unterstützung in der statistischen Auswertung bekam ich durch Frau Prof. Dr. Bogna Stawarczyk, die auch die Studien und deren Ablauf plante und mitbegleitete. Abschließend wurden die Manuskripte beider veröffentlichten Publikationen durch mich als Erst-Autorin geschrieben und von meinen TAC-Mitgliedern Prof. Dr. Bogna Stawarczyk, PD Dr. Anja Liebermann und Dr. Ramona Buser ergänzt und gegengeprüft.

Eigene Arbeiten

In diesem Kapitel werden zwei Originalarbeiten in englischer Sprache, die international veröffentlicht wurden, vorgestellt.

Hensel J, Reise M, Liebermann A, Buser R, Stawarczyk B. Impact of multiple firings on thermal properties and bond strength of veneered zirconia restorations. J Mech Behav Biomed Mat 2022;128:e105134 (<https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2022.105134>) IF 2022: 4.042

Zusammenfassung. Das Ziel dieser Untersuchung war es, den Einfluss mehrfacher Brände beim Verblenden von ZrO₂-Restorationen auf die thermischen Eigenschaften der Materialien und auf die Verbundfestigkeit zwischen Verblendkeramik und ZrO₂ zu ermitteln.

Material und Methode. Um den WAK ermitteln zu können, wurden jeweils 10 rechteckige Prüfkörper aus vier verschiedenen Verblendkeramiken (ZRO, ZRT, HFZ, STR) und 2 Stäbchenförmige Prüfkörper aus 3Y-TZP hergestellt. Für je 2 Prüfkörper jeder Verblendkeramik wurden 2-, 4-, 6-, 8- und 10-mal Dentin-Brände durchgeführt. Die Messung erfolgte in einem Dilatometer und T_G wurde graphisch bestimmt. Zur Ermittlung der Verbundfestigkeit wurden Prüfkörper für die Rissbeginnprüfung nach Schwickerath aus denselben Materialien hergestellt (150 Stück pro Verblendkeramik). Jeweils 30 Stück der Verblendkeramiken wurden wieder 2-, 4-, 6-, 8- und 10-mal gebrannt. Die Hälfte wurde anschließend im Thermocycler in 5000 Zyklen abwechselnd zwischen 5 und 55°C, je 20 Sekunden lang, künstlich gealtert. Die Ablösekräfte wurden in einer Universalprüfmaschine gemessen und die ermittelten Daten anhand von ANOVA mit partieller Eta-Quadrat-Statistik und post-hoc Scheffé-Test ebenso wie dem Pearson Korrelations-Test analysiert.

Ergebnisse. Der WAK wurde hauptsächlich durch die Wahl der Verblendkeramik beeinflusst ($p < 0,001/\eta p^2 = 0,983$). Für die leuzitfreie Keramik (ZRT) lagen die WAK-Werte mit der Anzahl der Brände im gleichen Wertebereich ($p = 0,171$). Die T_G wurde durch die Anzahl der Brände nicht beeinflusst. Die höchste Auswirkung auf die Verbundfestigkeit zeigte die Wahl der Verblendkeramik ($p < 0,001/\eta p^2 = 0,055$), gefolgt von der Anzahl der Brände ($p = 0,011/\eta p^2 = 0,023$). Im Gesamten betrachtet, war die Verbundfestigkeit bei 10 Bränden geringer als bei 2 Bränden ($p = 0,048$). Die höchsten Verbundfestigkeiten wurden für ZRT gemessen. Die künstliche Alterung durch das Thermocycling zeigte keinen Einfluss auf die Verbundfestigkeit ($p = 0,755$). Für HFZ wurden Korrelationen zwischen der Verbundfestigkeit und dem WAK festgestellt ($r = -0,651/p = 0,021$). Es konnte eine Korrelation zwischen WAK und T_G beobachtet werden ($r = 0,303/p = 0,029$).

Signifikanz. Die thermische Stabilität scheint für leuzitfreie Verblendkeramiken mit daraus resultierender überlegener Verbundfestigkeit besser vorhersagbar zu sein. Alle Ergebnisse der Verbundfestigkeiten übertrafen die klinischen Mindestanforderungen.

Hensel J, Reise M, Liebermann A, Buser R, Stawarczyk B. Impact of multiple firings on fracture load of veneered zirconia restorations. J Mech Behav Biomed Mat 2022;130:e105213 (<https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2022.105213>) IF 2022: 4.042

Zusammenfassung. In dieser Untersuchung wurde der Einfluss mehrerer Brände während des Verblendprozesses auf die Bruchlast mit verschiedenen Keramiken (ZRT, ZRO, HFZ, STR) verblendeter ZrO₂-Kronen untersucht.

Material und Methode. Es wurden vollkeramische Kronen mit anatomisch reduzierten 3Y-TZP-Gerüsten und vier verschiedenen Verblendkeramiken hergestellt (48 Stück pro Verblendkeramik). Die Kronen wurden 2- und 10-mal gebrannt. Die Hälfte von ihnen wurde im Thermocycler künstlich gealtert (5000 Zyklen, 5°C/55°C, 20s). Die Bruchlast wurde mit dem Druck-Scher-Test nach Voss bestimmt und die Daten wurden mittels ANOVA mit partieller Eta-Quadrat-Statistik und post-hoc Scheffé-Test sowie t-Test und Weibull-Verteilung analysiert.

Ergebnisse. Hinsichtlich der Bruchlast traten die größten Unterschiede zwischen der Anzahl der Brände ($p < 0,001$, $\eta^2 = 0,369$) auf. Die Bruchlast wurde weder durch die Wechselwirkung zwischen der Anzahl der Brände und dem Alterungsgrad ($p = 0,231$) noch durch die Wechselwirkung zwischen der Anzahl der Brände und der Verblendkeramik ($p = 0,222$) beeinflusst. Unterschiede konnten im Vergleich der Bruchlast-Werte von ZRT und STR ($p < 0,001$) und HFZ und STR ($p < 0,001$) festgestellt werden. Zwischen den Verblendkeramiken ergaben sich nach 2 ($p = 0,430$) und nach 10 Bränden ($p = 0,057$) keine Unterschiede in Bezug auf die Initial-Bruchlast. Bei allen initial getesteten Prüfkörpern zeigte die Bruchlast nach 10 Bränden höhere Werte ($p = 0,001-0,014$). Im gealterten Zustand wiesen ZRO, HFZ und STR nach 10 Bränden ebenfalls höhere Bruchlast-Werte auf ($p < 0,001$). Bei ZRT unterschieden sich die Bruchlast-Werte der initialen und der gealterten Gruppe nach 2 Bränden ($p = 0,001$), wobei die gealterten Prüfkörper höhere Werte aufwiesen. Nach 10 Bränden zeigte keine der Verblendkeramiken Unterschiede zwischen den Bruchlast-Werten der Initial-Testung und der gealterten Testung auf. Das Weibull-Modul war für

ZRT nach 10 Bränden bei initialer Testung höher (m=10,1), bei den gealterten ZRT-Prüfkörpern nach 2 Bränden (m=11,1). Ein Versagen der Restaurationen trat entweder durch Abplatzen der Verblendung oder in Form eines vollständigen Bruchs auf.

Signifikanz. Die getesteten verblendeten 3Y-TZP-Kronen wiesen nach 10 Bränden eine höhere Bruchlast auf als nach 2 Bränden. Die Alterung durch das Thermocycling zeigte einen positiven Effekt auf die Bruchlast.

Diskussion

In diesem Abschnitt werden die beiden Untersuchungen diskutiert.

Einfluss von wiederholten Bränden auf die thermischen Eigenschaften und die Verbundfestigkeit verblendeter ZrO₂-Restaurationen

Die gemessenen WAK-Werte aller getesteten Verblendkeramiken waren niedriger als der WAK des verwendeten 3Y-TZP-Gerüsts, was zu positiven Differenzen ($\Delta\alpha$) führte, so dass sie für die Verwendung mit ZrO₂ kompatibel sind. Frühere Untersuchungen deklarieren dies als wünschenswert, da die Verblendkeramik sehr empfindlich auf Zugspannungen reagiert und durch die Wahl eines WAKs für die Verblendkeramik, der niedriger ist als der WAK des Gerüsts können Druckspannungen auf der Oberfläche entstehen (Anusavice et al., 1989; Fischer et al., 2007; Göstemeyer et al., 2012). Die statistische Auswertung der Dilatometrie zeigte, dass die Kombination von Verblendkeramik und Anzahl der Brände einen Einfluss hatte. Dies deutet darauf hin, dass nicht nur die Wahl der Verblendkeramik oder die Anzahl der Brände die WAK-Werte beeinflusste, sondern dass es davon abhing, welche Verblendkeramik in Kombination mit der Anzahl der Brände gewählt wurde.

Bei ZRT zeigten die WAK-Werte keine signifikanten Veränderungen über die Brennvorgänge hinweg, was wahrscheinlich darauf zurückzuführen ist, dass es kein Leuzit als kristalline Phase in seiner Zusammensetzung enthält. Da Leuzit in der Regel den WAK der Keramik steuert, kann davon ausgegangen werden, dass es ohne Leuzit kaum zu WAK-Veränderungen kommen kann. Diese Aussage wird auch durch eine Untersuchung gestützt, in der eine bessere thermische Stabilität für leuzitfreie Keramiken festgestellt wurde (Lu et al., 2012). Frühere Untersuchungen zeigten auch eine Veränderung des Leuzitgehalts durch wiederholtes Brennen (Mackert & Evans, 1991). Die Autoren stellten eine Abnahme des Leuzitanteils nach 2, 4, 8 und 16 Bränden fest. Da der WAK des Leuzits deutlich höher ist (24×10^{-6} ppm/K) als der WAK der umgebenden

Glasmatrix, entstehen Mikrorisse, die innere Spannungen verursachen (Denry et al., 1996). Wenn der Leuzitanteil bei wiederholten Brennvorgängen variiert, kann dies der Grund für das Auftreten zusätzlicher Spannungen sein.

Die höchsten mittleren WAK-Werte wurden für 2 und 8 Brände ermittelt, die niedrigsten für 4 Brände, wobei der Unterschied zwischen 2 und 4 sowie zwischen 4 und 8 Bränden signifikant war. Bei HFZ und STR stieg der Wert jedoch mit weiteren Bränden wieder an, was in etwa mit einer Untersuchung übereinstimmt, in der die Autoren einen leichten Anstieg des WAK nach dem Brennen einer leuzithaltigen Verblendkeramik bis zu 8-mal feststellen (Mackert et al., 2003).

Spannungen entstehen erst unterhalb von T_G , da hier atomare Umlagerungen nicht mehr möglich sind und das Material durch seinen plastischen Fluss diese nicht mehr kompensieren kann. Beim Abkühlen wird das Material bei Annäherung an die T_G zähflüssiger und Spannungen bauen sich auf (Swain, 2009; Tholey et al., 2011). Daraus lässt sich schließen, dass die Möglichkeit der Entstehung von Eigenspannungen umso geringer ist, je niedriger die T_G ist.

Die mittleren WAK-Werte von HFZ und STR waren ähnlich, aber die T_G von HFZ lag etwa 100 °C höher als die von STR und zeigte höhere Werte für die Verbundfestigkeit. Dies steht also im Widerspruch zu der vorherigen Behauptung und könnte auf die unterschiedliche Zusammensetzung der Materialien zurückzuführen sein. Die T_G wurden durch die Anzahl der Brände nicht beeinflusst, was durch eine Erkenntnis aus einer Untersuchung erklärt werden kann (Ban et al., 1997), die besagt, dass die T_G durch den Gehalt an Aluminiumoxid gesteuert wird. Da die Verblendungsbrände keine Temperaturen erreichen, die sich auf Al_2O_3 auswirken würden, würde sich die T_G auch bei häufigeren Bränden nicht ändern.

Ändern sich WAK und T_G , so ändert sich auch der Spannungszustand in der Restauration (Fischer et al., 2007; Reginato et al., 2018). Dieser Spannungszustand kann, wie in dieser ersten Untersuchung, mit Hilfe der Rissbeginnprüfung nach Schwickerath bestimmt werden, bei dem die gemessenen Werte als Maß für die Summe der Spannungen an der Grenzfläche und der von außen induzierten Zugspannungen gesehen werden können. Dieser Test wurde gewählt, da er es

ermöglicht, den Spannungszustand der Prüfkörper an der Grenzfläche zu bestimmen, ohne die Verblendkeramik als schwächeres Material direkt zu belasten (Lenz et al., 1995).

Die höchsten Mittelwerte für die Verbundfestigkeit wurden für ZRT (40 MPa) ermittelt, wobei HFZ ähnlich hohe Werte (39 MPa) erzielte. Die größten Schwankungen in den WAK-Werten wurden für ZRO zwischen dem 4. und dem 10. Brand ($\Delta\alpha = 0,4$ ppm/K), für HFZ zwischen dem 2. und dem 4. Brand ($\Delta\alpha = 0,4$ ppm/K) und für STR ebenfalls zwischen dem 2. und dem 4. Brand ($\Delta\alpha = 0,6$ ppm/K) beobachtet. Die WAK-Werte in ZRO, HFZ und STR änderten sich im Laufe der Brände, so dass davon ausgegangen werden kann, dass sich auch die Spannungszustände in diesen Prüfkörpern während des Herstellungsprozesses änderten. Dies könnte erklären, warum die Verbundfestigkeitswerte von ZRO und STR niedriger sind als die von ZRT.

Da die Verbundfestigkeit aber auch von anderen Parametern beeinflusst wird (Miyazaki et al., 2013), können die höheren Werte für HFZ durch ein kleineres $\Delta\alpha$ im Vergleich zu den anderen Verblendkeramiken mit einer niedrigen T_G erklärt werden. Die Tatsache, dass ZRT trotz des größten $\Delta\alpha$ die höchsten Haftwerte aufweist, scheint auf den ersten Blick im Widerspruch zu den Aussagen zahlreicher anderer Untersuchungen zu stehen, die ein kleines $\Delta\alpha$ als positiv bewerten (Belli et al., 2013; Isgrò et al., 2005). Dies kann womöglich anhand einer Untersuchung erklärt werden (Fischer et al., 2007), die behauptet, dass so lange das Produkt $\Delta\alpha \times \Delta T_G$ zwischen $185 \cdot 10^{-6}$ und $1120 \cdot 10^{-6}$ gehalten wird, keine übermäßigen Spannungen die Restauration beeinträchtigen, und ebenso, dass die thermische Stabilität daher ein wichtiger Faktor ist.

Betrachtet man die Brenngruppen, so wurde die höchste mittlere Verbundfestigkeit für 2 Brände gefunden und nur die mittleren Verbundfestigkeitswerte von 2 und 10 Bränden unterschieden sich signifikant. Dies steht im Widerspruch zu einer Untersuchung (Tang et al., 2012), die eine höhere mittlere Verbundfestigkeit nach 3 Bränden im Vergleich zu 2-mal gebrannten Prüfkörpern zeigt, aber wiederum in Übereinstimmung mit einer Untersuchung, die eine Abnahme der Mikrozugfestigkeit bei einer Erhöhung der Brennzyklen bis zu 5-mal zeigt (Trindade et al., 2013). Hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften gibt es auch Untersuchungen, die darauf hinweisen, dass die Oberflächenhärte und die Dichte zunehmen, während die Porosität mit zunehmender

Anzahl der Brände abnimmt (Alkurt et al., 2016; Isgrò et al., 2005). Eine weitere Untersuchung zeigt einen positiven Effekt auf die Festigkeit und Härte vieler Verblendkeramiken, die für ZrO₂-Restaurationen verwendet werden, nach 10 Bränden im Vergleich zu 2 Bränden, was ebenfalls womöglich auf eine Zunahme der Dichte mit Schließen der Porosität zurückzuführen ist (Tang et al., 2015). Diese Verbesserung der mechanischen Eigenschaften hatte wahrscheinlich auch einen Einfluss auf die Verbundfestigkeit und könnte erklären, warum die Verbundfestigkeitswerte für ZRT und ZRO bei initialer Testung nach dem vierten Brand anstiegen.

Die Ergebnisse zeigten, dass die künstliche Alterung nach 5.000 Zyklen keinen signifikanten Einfluss auf die Verbundfestigkeit hatte. Dies stimmt mit einer Untersuchung überein, in der das Thermocycling mit 10.000 Zyklen ebenfalls keinen Einfluss auf die Verbundfestigkeit von verblendeten ZrO₂-Restaurationen hatte und eine Verblendkeramik sogar eine höhere Verbundfestigkeit nach dem Thermocycling aufwies (Blatz et al., 2010).

In dieser Studie wurden nicht-anatomische Prüfkörper untersucht, da sie grundlegende Informationen liefern. Einschränkungen könnten daher in der Geometrie der Prüfkörper gesehen werden und es ist notwendig, diese Ergebnisse auch für Restaurationen mit komplexer Geometrie zu untersuchen, wie z.B. ein Testaufbau mit Vollkronen, um reale klinische Situationen zu simulieren. Da sich diese Untersuchung hauptsächlich auf die Veränderung der thermischen Eigenschaften über mehrere Brände hinweg und auf die Verbundfestigkeit konzentrierte, könnte es für nachfolgende Untersuchungen interessant sein, inwieweit wiederholte Brände auch andere klinisch relevante Parameter - wie die Bruchfestigkeit unter Berücksichtigung der Kronengeometrie oder die optischen Eigenschaften - beeinflussen.

Einfluss von wiederholten Bränden auf die Bruchfestigkeit vollverblendeter ZrO₂-Restaurationen

Nach dem Brennen werden während dem Abkühlen Spannungen in die Restauration eingeschlossen. Die äußere Schicht der Restauration erreicht als erste die T_G und beginnt zu erstarren; sie kann daher Spannungen nicht mehr ausgleichen und es entstehen Temperaturgradienten. Im weiteren Verlauf kommen Spannungen hinzu, die durch den unterschiedlichen WAK der Materialien verursacht werden und sich akkumulieren. Das Gerüstmaterial (ZrO₂) zieht sich aufgrund seines höheren WAK beim Abkühlen schneller zusammen als die Verblendkeramik. Dadurch entstehen Spannungen, nämlich Zugspannungen an der Grenzfläche zwischen Gerüst und Verblendkeramik und die gewünschten Druckspannungen an der Oberfläche. Treten jedoch Risse auf, führen die Zugspannungen im Inneren zu spontaner Rissausbreitung und anschließendem Bruch (Swain, 2009).

Da der Eckzahn die ungünstigsten Belastungsbedingungen aufweist und, wie Voss in einer Studie feststellte, klinische Misserfolge vorwiegend bei dem mit einer keramisch verblendeten Metallkrone versorgten oberen Eckzahn, der durch den antagonistischen Eckzahn in Richtung der Zahnachse belastet wird, auftreten, wurde der Versuchsaufbau entsprechend gewählt. Dabei wurde der Metall-Teststumpf in einem Winkel von 45° zum Prüf-Stempel eingestellt, um die Bedingungen entsprechend negativ zu begünstigen (Voss, 1969). Die Prüfung nach Voss sieht vor, dass die Kronen so lange belastet werden, bis die Verblendung abplatzt oder sie brechen, was aufgrund der Einwirkung äußerer Kräfte auf den Eigenspannungszustand der Restauration geschieht. Die Bruchlast der Kronen kann daher als Maß für den Spannungszustand in der Krone angesehen werden. Wie zuvor bereits beschrieben, werden diese Eigenspannungen nach dem Brand in der Restauration eingeschlossen und wurden dann während der Prüfung, durch die von außen aufgebrachten Spannungen überlagert. Wenn die Summe der inneren Druckspannungen und der von außen zugeführten Spannungen die Festigkeit der Verblendkeramik überstieg, kam es zum Bruch. Der innere Spannungszustand nach dem Brand und die Festigkeit der jeweiligen Verblendkeramik waren somit entscheidend für die Höhe der Bruchlast-Werte.

Die Ergebnisse dieser Untersuchung zeigten, dass die Anzahl der Brände den größten Einfluss auf die Bruchlast hatte ($\eta_p^2=0,369$). 10 Brände ergaben bei den Verblendkeramiken am häufigsten höhere Bruchlast-Werte als 2 Brände, unabhängig davon, ob sie initial oder nach Alterung getestet wurden.

Die höchsten Bruchlast-Werte wurden für ZRO (1993,08 MPa) und HFZ (2115,49 MPa) nach 10 Bränden im gealterten Zustand ermittelt. Unter Berücksichtigung der Ergebnisse der jeweiligen WAK-Werte der Verblendkeramik aus der vorangegangenen Untersuchung wiesen ZRO und HFZ nach 10 Bränden beide einen WAK von 9,2 ppm/K auf, was einer Differenz von 1,3 ppm/K zum WAK des 3Y-TZP-Gerüsts (10,5 ppm/K) und damit ziemlich genau 10 % weniger entspricht. Diese WAK-Kombination von Verblendung und Gerüst wurde häufig empfohlen (Fischer et al., 2009; Fischer et al., 2009; Juntavee & Dangsuan, 2018) und unterstützt die vorliegenden Ergebnisse. Bei initialer Testung lieferte ZRT nach 10 Bränden den höchsten Wert für die Bruchlast mit dem höchsten Weibull-Modul ($m=10,1$). Die Untersuchung des WAK in der ersten Studie über 10 Brände hinweg zeigte, dass sich der WAK der leuzitfreien ZRT-Keramik kaum veränderte (Hensel et al., 2022). Dies wurde damit erklärt, dass Leuzit in der Regel den WAK der Verblendkeramik steuert und wenn kein Leuzit vorhanden ist, demnach auch kein Anstieg des Gehalts an Leuzitphase durch wiederholte Brände stattfinden kann. Große Änderungen des WAK während der Brände würden zu Veränderungen des Spannungszustandes der Restauration führen und die Stabilität verringern. Daher könnten diese Erkenntnisse die Ergebnisse der ZRT-Keramik nach 10 Bränden unterstützen.

Höhere Bruchlast-Werte nach 10 Bränden könnten durch mehrere andere Studien gestützt werden, wie zum Beispiel eine Untersuchung, die die Verbundfestigkeit zwischen ZrO_2 und der 1- bis 5-mal gebrannten Verblendkeramik untersuchte und die niedrigste Verbundfestigkeit nach einem Brand und einen Anstieg nach 3 und mehr Bränden feststellte (Trindade et al., 2013). Eine andere Untersuchung ergab, dass die Oberflächenrauigkeit der getesteten Verblendkeramiken für ZrO_2 nach 10 Bränden im Vergleich zu 2 Bränden signifikant abnahm (Tang et al., 2015). Die Autoren stellten außerdem fest, dass die Biegefestigkeit und Vickers-Härte der Verblendkeramik bei den meisten gealterten Prüfkörpern nach 10 Bränden höher waren. Dies deutet darauf hin, dass lokale

„Angriffe“ auf Mikrorisse bei den 10-mal gebrannten Prüfkörpern schwieriger wurden als bei den 2-mal gebrannten Prüfkörpern, was zusätzlich die vorliegenden Ergebnisse unterstreicht. Die Feststellung, dass die Biegefestigkeit der Verblendkeramik nach mehreren Bränden (3-, 5-mal) zunahm, stand auch im Einklang mit einer Studie, die eine deutlich geringere Biegefestigkeit nach nur 1 Brand ergab (Vichi et al., 2015). In einer weiteren Untersuchung wurde bei mehreren Verblendkeramiken nach 10 Bränden im Vergleich zu 2 Bränden eine Zunahme der Dichte und eine Abnahme der Porosität beobachtet (Tang et al., 2012). Mehrfachbrände (2-, 5- und 10-mal) hatten keinen Einfluss auf die Mikrostruktur von ZrO_2 und die Vickers-Härte der Verblendkeramik stieg nach 5 und 10 Bränden an. Die Oberflächenhärte von ZrO_2 nahm nach 5 und 10 Bränden ab, aber es gab keine signifikante Veränderung der Menge an monoklinen Phasen (Alkurt et al., 2016). Wenn die Brenntemperatur über der T_G liegt, „schmilzt“ die Verblendkeramik und füllt Hohlräume und fehlerhafte Stellen der ZrO_2 -Oberfläche auf, was den Verbund zwischen beiden Materialien verbessern kann (Chai et al., 2000). Dies könnte auch erklären, warum nach 10 Bränden höhere Bruchlast-Werte und vorwiegend Total-Frakturen beobachtet wurden. Nach 2 Bränden wurden hingegen überwiegend Abplatzungen ausgehend vom Höckerbereich beobachtet, was mit einer anderen Untersuchung übereinstimmt (Tholey et al., 2011).

Bei STR konnte nach 10 Bränden eine Mattierung und Verdunklung der Farbe beobachtet werden. Dies steht im Gegensatz zu den meisten anderen Veröffentlichungen, die eine Zunahme an Glasphase und Transluzenz beschreiben (Bayindir & Ozbayram, 2018). In einer anderen Untersuchung wird jedoch von dunkleren Keramik-Prüfkörpern nach wiederholten Bränden (3-, 5-, 7-mal) berichtet (Uludag et al., 2007). Dies ist mit Sicherheit vom Gehalt an kristalliner Phase, also der Zusammensetzung der Verblendkeramik abhängig und würde eine Erklärung liefern, da sich STR durch ein feineres Gefüge von den anderen getesteten Verblendkeramiken unterscheidet.

Nach der ISO-Norm werden 500 Zyklen in einem Temperaturbereich von 5 bis 55 °C als angemessenes Alterungsverfahren angegeben (Morresi et al., 2014). Die Anzahl der Zyklen in dieser Studie wurde auf eine häufig in anderen Studien verwendete Anzahl von 5000 Zyklen

angesetzt, um einen sicheren Abstand zur Empfehlung der ISO-Norm zu gewinnen. Was die Bruchlast-Werte nach 2 Bränden betrifft, so wiesen drei Verblendkeramiken nach dem Thermocycling höhere Werte auf und die statistische Analyse zeigte, dass die Alterung einen deutlichen Einfluss auf die Bruchlast hatte ($p=0,002$, $\eta^2=0,051$). Weibull-Module, die eine Bewertung über die Zuverlässigkeit eines Materials ermöglichen, zeigten ebenfalls höhere Werte für die meisten gealterten Prüfkörper ($m=6,9-11,1$).

Nach der Alterung der Kronen durch das Thermocycling wurde das höchste Weibull-Modul für ZRT beobachtet, die 2- ($m=11,1$) und 10-mal ($m=9,2$) gebrannt wurden. Nach 2 Bränden wurde die höchste Bruchlast für gealterte ZRT-Prüfkörper (1767,74 MPa) gemessen, aber bei initialer Prüfung zeigten ZRT und HFZ ähnliche Werte. Die Durchführung des Tests der Zwischensubjekteffekten mit der Bruchlast als abhängige Variable zeigte, dass die Wechselwirkung von Alterungsgrad, Anzahl der Brände und Verblendkeramik einen Einfluss auf die Bruchlast hatte, was wiederum bedeutet, dass es von der jeweiligen Kombination abhängig war, wie die Bruchlast beeinflusst wurde. Zum Beispiel zeigte ZRT einen höheren Wert der Bruchlast nach Alterung an, wenn 2-mal gebrannt wurde ($p=0,001$), aber nach 10 Bränden ergab die Alterung nicht signifikante, aber niedrigere Werte.

In der vorliegenden Untersuchung wurden die höchsten Bruchlast-Werte nicht für das Gerüst-Verblendkeramik-Paar mit der besten WAK-Kombination und auch nicht für die niedrigste T_G gefunden, was Berichten zufolge für die Minimierung des Bereichs, in dem Spannungen entstehen können, von Vorteil ist (Tholey et al., 2011). In einer Untersuchung wurde festgestellt, dass das Produkt aus beiden als Maß für die Spannungsentwicklung wichtig ist (Fischer et al., 2007). Spannungen akkumulieren auch aufgrund der Diskrepanz zwischen Volumen, Dichte und Viskosität des Materials beim Abkühlen (Isgrò et al., 2004; Özkurt et al., 2010).

Zusammenfassend ist es wichtig zu verstehen, dass es verschiedene Faktoren gibt, die zum Versagen der Restauration führen können, wie z.B. ein ‚thermal misfit‘ der WAK-Werte und T_G , die Bruchzähigkeit der Keramik, thermische Eigenspannungen, Oberflächen(vor-)behandlungen, Wärmebehandlungen, Unterschiede im Elastizitätsmodul, die (heterogene) Dicke der Verblendung und das Gerüstdesign (Belli et al., 2013; Benetti et al., 2011; Cheung & Darvell, 2002; Miyazaki et

al., 2013; Preis et al., 2013; Quinn et al., 2010; Swain, 2009). In dieser Studie wurden verblendete ZrO₂-Restaurationen mit 3Y-TZP-Käppchen als Gerüste, die ein anatomisch reduziertes Design (Preis et al., 2013; Tholey et al., 2011) und ein Verhältnis von 1:1 zwischen Verblendung und Gerüst (Soares et al., 2019) aufwiesen, das beides in früheren Untersuchungen empfohlen wurde, untersucht. Außerdem muss gesagt werden, dass alle Ergebnisse der Bruchlast-Messungen über den üblicherweise ausgeübten Kaukräften von 500-700 N lagen (Al-Zarea, 2015).

Weitere Forschungen mit dem Fokus darauf, wie die Materialzusammensetzungen die thermischen Eigenschaften, die Entwicklung von Spannungen oder die optischen Qualitäten nach wiederholten Brennvorgängen beeinflussen, könnten sicherlich interessant sein und zeigen die Grenzen dieser Studie auf.

Zusammenfassung und Ausblick

Ergebnisse früherer Studien zeigen, dass das Abplatzen von Verblendungen von ZrO_2 -Gerüsten in engem Zusammenhang mit der Herstellung, also den Brennvorgängen steht. Um hohe ästhetische und individuelle Ergebnisse zu erzielen, wird eine transluzentere Verblendkeramik in mehreren Schichten auf das ZrO_2 -Gerüst modelliert und gebrannt. Da dieser Prozess in der Regel mindestens 3 Brände und mehr - wenn Form- oder Farbkorrekturen erforderlich sind - beinhaltet, ist es von großer Bedeutung, das Verhalten der thermischen Eigenschaften über die Brände hinweg beurteilen und die Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften vorhersagen zu können.

Daher wurden die thermischen Eigenschaften von einem 3Y-TZP und 4 verschiedenen Verblendkeramiken in einer ersten Studie für 2, 4, 6, 8 und 10 Brände untersucht. Die thermischen Eigenschaften, der WAK und T_G , korrelierten miteinander, aber nur bei einer der getesteten Verblendkeramiken korrelierten sie auch mit der Verbundfestigkeit. Die leuzitfreie Verblendkeramik wies kaum Schwankungen in den thermischen Eigenschaften über die Brände hinweg auf und präsentierte nach 10 Bränden die höchsten Weibull-Moduli für initial und gealterte Prüfkörper des Druck-Scher-Tests. Dank dieser Konstanz kann aufgrund der Erkenntnisse zahlreicher Studien davon ausgegangen werden, dass sich auch der Spannungszustand während der Brände wenig veränderte, was sich auch in der überlegenen Verbundfestigkeit zum 3Y-TZP-Gerüst widerspiegelte. Die statistische Auswertung bestätigte, dass der WAK in Abhängigkeit von der jeweiligen Verblendkeramik einen Einfluss auf die Verbundfestigkeit zum Gerüst hatte. Betrachtet man allen getesteten Verblendkeramiken zusammen, so wurden in der Rissbeginnprüfung nach Schwickerath signifikante Unterschiede in der Verbundfestigkeit zwischen 2- und 10-fach gebrannten Prüfkörpern ermittelt.

Aus diesem Grund wurde dann in der zweiten Studie der Druck-Scher-Test nach Voss für verblendete 3Y-TZP-Kronen, die 2- und 10-mal gebrannt wurden, verwendet, um die Gesamtstabilität zu prüfen und eine klinisch realistischere Situation zu simulieren. Das 10-malige Brennen führte hier zu höheren Bruchlast-Werten als das 2-malige Brennen, unabhängig davon, ob die Prüfkörper initial oder nach Alterung getestet wurden. Auffällig war jedoch, dass die

Bruchlast-Werte gealterter Prüfkörper statistisch gesehen höher lagen als die der initial getesteten Kronen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die vorliegenden Ergebnisse die Annahme stützen, dass die mechanischen Eigenschaften wie Verbundfestigkeit und Bruchlast sicherlich von einigen genannten Parametern abhängen, die thermischen Eigenschaften der Materialien aber eine entscheidende Rolle für den Spannungszustand und damit die Stabilität in der Restauration spielen. Es kann in jedem Fall gesagt werden, dass vollkeramische Restaurationen eine gute Alternative dem metall-keramischen Zahnersatz gegenüber darstellen; die Werte aller getesteten Verblendkeramiken überstiegen sowohl im Schwickerath-Versuch für die Verbundfestigkeit als auch im Voss-Versuch für die Bruchlasten die Mindestanforderungen der Norm auch nach bis zu 10 Bränden und im gealterten Zustand.

Englische Zusammenfassung

Results of previous studies are in accordance with the chipping of veneers from zirconia frameworks being closely related to the fabrication, i.e., the firing process. To achieve high esthetic and individual results, a translucent veneering ceramic is modeled and fired in several layers on the zirconia framework. Since this process usually involves at least 3 firings and more, if shape or color corrections are required, it is of great importance to be able to assess the behavior of the thermal properties over multiple firings and to predict the impact on mechanical properties.

Therefore, the thermal properties of a 3Y-TZP and 4 different veneering ceramics were investigated in a first study for 2, 4, 6, 8 and 10 firings. The thermal properties, CTE and T_G , correlated with each other, but only for one of the veneering ceramics tested they also correlated with the bond strength. The leucite-free veneering ceramic showed little variation in thermal properties across the firings and presented the highest Weibull moduli for initial and aged specimens in fracture load test after 10 firings. Thanks to this consistency, based on the findings of numerous investigations, it can be assumed that the stress state also changed little during the firings, which was also reflected in the superior bond strength to the 3Y-TZP framework. The statistical evaluation confirmed that the CTE had an influence on the bond strength to the framework depending on the respective veneering ceramic. Considering all tested veneering ceramics together, significant differences in the bond strength between 2- and 10-fired specimens were determined in the crack initiation test according to Schwickerath.

For this reason, the second study then used the Voss test for veneered 3Y-TZP crowns fired 2 and 10 times to test the overall stability and to simulate a more clinically realistic situation. Here, firing 10 times resulted in higher fracture load values than firing 2 times, regardless of whether the specimens were tested initially or after aging. However, it was noticeable that the fracture load values of aged specimens were statistically higher than those of the crowns tested initially.

In summary, the present results support the assumption that mechanical properties such as bond strength and fracture load certainly depend on some of the parameters previously mentioned, but the thermal properties of the materials certainly play a decisive role in the stress state and thus the

stability in the restorative process. In any case, it can be said that all-ceramic restorations are a good alternative to metal-ceramic restorations; the values of all veneering ceramics tested exceeded the minimum requirements of the standard both in the Schwickerath test for bond strength and in the Voss test for fracture load, even after up to 10 firings and in the aged state.

Literaturverzeichnis

- Al-Amleh, B., Waddell, J. N., Lyons, K., & Swain, M. V. (2014). Influence of veneering porcelain thickness and cooling rate on residual stresses in zirconia molar crowns. *Dental Materials*, 30(3), 271-280.
- Al-Zarea, B. K. (2015). Maximum bite force following unilateral fixed prosthetic treatment: a within-subject comparison to the dentate side. *Medical principles and practice : International Journal of the Kuwait University, Health Science Centre*, 24(2), 142-146.
- Alkurt, M., Gundogdu, M. (2016). Effects of multiple firings on the microstructure of zirconia and veneering ceramics. *Dental Materials Journal*, 35(5), 776-781.
- Anusavice, K., DeHoff, P., Hojjatie, B., & Gray, A. (1989). Influence of tempering and contraction mismatch on crack development in ceramic surfaces. *Journal of Dental Research*, 68(7), 1182-1187.
- Babu, P. J., Alla, R. K., Alluri, V. R., Datla, S. R., & Konakanchi, A. (2015). Dental ceramics: Part I—An overview of composition, structure and properties. *American Journal of Materials Engineering and Technologies*, 3(1), 13-18.
- Baldassarri, M., Stappert, C. F., Wolff, M. S., Thompson, V. P., & Zhang, Y. (2012). Residual stresses in porcelain-veneered zirconia prostheses. *Dental Materials*, 28(8), 873-879.
- Ban, S., Hattori, M., Narita, K., Takada, A., Iwase, H., Tanigawa, H., & Hasegawa, J. (1997). Glass transition temperatures of dental porcelains determined by DSC measurement. *Dental Materials Journal*, 16(2), 127-133.
- Bayindir, F., & Ozbayram, O. (2018). Effect of number of firings on the color and translucency of ceramic core materials with veneer ceramic of different thicknesses. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 119(1), 152-158.
- Belli, R., Frankenberger, R., Appelt, A., Schmitt, J., Baratieri, L. N., Greil, P., & Lohbauer, U. (2013). Thermal-induced residual stresses affect the lifetime of zirconia-veneer crowns. *Dental Materials*, 29(2), 181-190.
- Benetti, P., Kelly, J. R., & Della Bona, A. (2013). Analysis of thermal distributions in veneered zirconia and metal restorations during firing. *Dental Materials*, 29(11), 1166-1172.
- Benetti, P., Kelly, J. R., Sanchez, M., & Della Bona, A. (2014). Influence of thermal gradients on stress state of veneered restorations. *Dental Materials*, 30(5), 554-563.
- Benetti, P., Pelogia, F., Valandro, L. F., Bottino, M. A., & Della Bona, A. (2011). The effect of porcelain thickness and surface liner application on the fracture behavior of a ceramic system. *Dental Materials*, 27(9), 948-953.
- Blatz, M. B., Bergler, M., Ozer, F., Holst, S., Phark, J.-H., & Chiche, G. J. (2010). Bond strength of different veneering ceramics to zirconia and their susceptibility to thermocycling. *American Journal of Dentistry*, 23(4), 213-216.
- Cesar, P. F., Yoshimura, H. N., Júnior, W. G. M., & Okada, C. Y. (2005). Correlation between fracture toughness and leucite content in dental porcelains. *Journal of Dentistry*, 33(9), 721-729.

- Chai, J., Takahashi, Y., Sulaiman, F., Chong, K.-h., & Lautenschlager, E. P. (2000). Probability of fracture of all-ceramic crowns. *International Journal of Prosthodontics*, 13(5), 420-424.
- Cheung, K., & Darvell, B. (2002). Sintering of dental porcelain: effect of time and temperature on appearance and porosity. *Dental Materials*, 18(2), 163-173.
- Denry, I., Mackert Jr, J., Holloway, J., & Rosenstiel, S. (1996). Effect of cubic leucite stabilization on the flexural strength of feldspathic dental porcelain. *Journal of Dental Research*, 75(12), 1928-1935.
- DIN ISO 6872:2019-01. Dentistry – Ceramic Materials.
- Fehmer, V., Mühlemann, S., Hämmerle, C. H., & Sailer, I. (2014). Criteria for the selection of restoration materials. *Quintessence International*, 45(9), 723-730.
- Fischer, J., Stawarczyk, B., & Hämmerle, C. (2008). Flexural strength of veneering ceramics for zirconia. *Journal of Dentistry*, 36(5), 316-321.
- Fischer, J., Stawarczyk, B., & Hämmerle, C. H. (2008). Biegefestigkeit von Verblendkeramiken für Zirkoniumdioxid: hat die Prüfmethode einen Einfluss auf die Werte? *Quintessenz Zahntechnik*, 34(9), 1138-1145.
- Fischer, J., Stawarczyk, B., Tomic, M., Strub, J. R., & Haemmerle, C. H. (2007). Effect of thermal misfit between different veneering ceramics and zirconia frameworks on in vitro fracture load of single crowns. *Dental Materials Journal*, 26(6), 766-772.
- Fischer, J., Stawarczyk, B., Trottmann, A., & Hammerle, C. H. (2009). Impact of thermal properties of veneering ceramics on the fracture load of layered Ce-TZP/A nanocomposite frameworks. *Dental Materials*, 25(3), 326-330.
- Fischer, J., Stawarczyk, B., Trottmann, A., & Hämmerle, C. H. (2009). Impact of thermal misfit on shear strength of veneering ceramic/zirconia composites. *Dental Materials*, 25(4), 419-423.
- Göstemeyer, G., Jendras, M., Borchers, L., Bach, F.-W., Stiesch, M., & Kohorst, P. (2012). Effect of thermal expansion mismatch on the Y-TZP/veneer interfacial adhesion determined by strain energy release rate. *Journal of Prosthodontic Research*, 56(2), 93-101.
- Guazzato, M., Albakry, M., Ringer, S. P., & Swain, M. V. (2004). Strength, fracture toughness and microstructure of a selection of all-ceramic materials. Part II. Zirconia-based dental ceramics. *Dental Materials*, 20(5), 449-456.
- Guess, P. C., Kuliš, A., Witkowski, S., Wolkewitz, M., Zhang, Y., & Strub, J. R. (2008). Shear bond strengths between different zirconia cores and veneering ceramics and their susceptibility to thermocycling. *Dental Materials*, 24(11), 1556-1567.
- Heintze, S. D., & Rousson, V. (2010). Survival of zirconia-and metal-supported fixed dental prostheses: a systematic review. *International Journal of Prosthodontics*, 23(6), 493-502.
- Hensel, J., Reise, M., Liebermann, A., Buser, R., & Stawarczyk, B. (2022). Impact of multiple firings on thermal properties and bond strength of veneered zirconia restorations. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 128, e105134.
- Isgrò, G., Kleverlaan, C. J., Wang, H., & Feilzer, A. J. (2004). Thermal dimensional behavior of dental ceramics. *Biomaterials*, 25(12), 2447-2453.
- Isgrò, G., Kleverlaan, C. J., Wang, H., & Feilzer, A. J. (2005). The influence of multiple firing on thermal contraction of ceramic materials used for the fabrication of layered all-ceramic dental restorations. *Dental Materials*, 21(6), 557-564.

- Isgrò, G., Wang, H., Kleverlaan, C. J., & Feilzer, A. J. (2005). The effects of thermal mismatch and fabrication procedures on the deflection of layered all-ceramic discs. *Dental Materials*, 21(7), 649-655.
- Juntavee, N., & Dangsuwan, C. (2018). Role of coefficient of thermal expansion on bond strength of ceramic veneered yttrium-stabilized zirconia. *Journal of Clinical and Experimental Dentistry*, 10(3), e279-e286.
- Kelly, J. R. (1997). Ceramics in restorative and prosthetic dentistry. *Annual Review of Materials Science*, 27(1), 443-468.
- Lenz, J., Schwarz, S., Schwickerath, H., Sperner, F., & Schäfer, A. (1995). Bond strength of metal-ceramic systems in three-point flexure bond test. *Journal of Applied Biomaterials*, 6(1), 55-64.
- Lu, R. J., Ma, T. T., Yi, Y. F., Shao, L. Q., Tian, J. M., Hou, K. L., Wen, N., & Deng, B. (2012). Influence of Multiple Firing on the Bending Strength of Zirconia/Porcelain Bilayered Dental Ceramics. *Key Engineering Materials*, 492, e24-e29.
- Lümkemann, N., & Stawarczyk, B. (2021). Impact of hydrothermal aging on the light transmittance and flexural strength of colored yttria-stabilized zirconia materials of different formulations. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 125(3), 518-526.
- Mackert Jr, J. R., & Evans, A. L. (1991). Quantitative X-ray diffraction determination of leucite thermal instability in dental porcelain. *Journal of the American Ceramic Society*, 74(2), 450-453.
- Mackert Jr, J. R., Sheen, G. W., Williams, A. L., Russell, C. M., Ergle, J. W. (2003). Effects of local cooling rate and processing variables on leucite in dental porcelain. *International Journal of Prosthodontics*, 16(6), 647-652 .
- McLaren, E., & Giordano, R. (2010). Ceramics overview: classification by microstructure and processing methods. *Compendium of Continuing Education in Dentistry*, 31, 682-684.
- Miyazaki, T., Nakamura, T., Matsumura, H., Ban, S., & Kobayashi, T. (2013). Current status of zirconia restoration. *Journal of Prosthodontic Research*, 57(4), 236-261.
- Morresi, A. L., D'Amario, M., Capogreco, M., Gatto, R., Marzo, G., D'Arcangelo, C., & Monaco, A. (2014). Thermal cycling for restorative materials: Does a standardized protocol exist in laboratory testing? A literature review. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 29, 295-308.
- Özkurt, Z., Kazazoglu, E., & Ünal, A. (2010). In vitro evaluation of shear bond strength of veneering ceramics to zirconia. *Dental Materials Journal*, 29(2), 138-146.
- Piconi, C., & Maccauro, G. (1999). Zirconia as a ceramic biomaterial. *Biomaterials*, 20(1), 1-25.
- Pjetursson, B. E., Sailer, I., Makarov, N. A., Zwahlen, M., & Thoma, D. S. (2015). All-ceramic or metal-ceramic tooth-supported fixed dental prostheses (FDPs)? A systematic review of the survival and complication rates. Part II: Multiple-unit FDPs. *Dental Materials*, 31(6), 624-639.
- Pjetursson, B. E., Valente, N. A., Strasding, M., Zwahlen, M., Liu, S., & Sailer, I. (2018). A systematic review of the survival and complication rates of zirconia-ceramic and metal-ceramic single crowns. *Clinical Oral Implants Research*, 29, 199-214.

- Preis, V., Letsch, C., Handel, G., Behr, M., Schneider-Feyrer, S., & Rosentritt, M. (2013). Influence of substructure design, veneer application technique, and firing regime on the in vitro performance of molar zirconia crowns. *Dental Materials*, 29(7), e113-e121.
- Queiroz, J. R. C., Benetti, P., Massi, M., Junior, L. N., & Della Bona, A. (2012). Effect of multiple firing and silica deposition on the zirconia–porcelain interfacial bond strength. *Dental Materials*, 28(7), 763-768.
- Quinn, J. B., Quinn, G. D., & Sundar, V. (2010). Fracture toughness of veneering ceramics for fused to metal (PFM) and zirconia dental restorative materials. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 115(5), 343-352.
- Reginato, V. F., Kemmoku, D. T., Caldas, R. A., Bacchi, A., Pfeifer, C. S., & Consani, R. L. X. (2018). Characterization of Residual Stresses in Veneering Ceramics for Prostheses with Zirconia Framework. *Brazilian Dental Journal*, 29(4), 347-353.
- Reise, M. (2004). Das kleine ABC der Verblendkeramik. *Materialkunde. ZWP spezial*, 22-25.
- Rodrigues, C. D. S., Aurélio, I. L., Kaizer, M. D. R., Zhang, Y., & May, L. G. (2019). Do thermal treatments affect the mechanical behavior of porcelain-veneered zirconia? A systematic review and meta-analysis. *Dental Materials*, 35(5), 807-817.
- Rues, S., Kröger, E., Müller, D., & Schmitter, M. (2010). Effect of firing protocols on cohesive failure of all-ceramic crowns. *Journal of Dentistry*, 38(12), 987-994.
- Soares, L. M., Soares, C., Miranda, M. E., & Basting, R. T. (2019). Influence of core-veneer thickness ratio on the fracture load and failure mode of zirconia crowns. *Journal of Prosthodontics*, 28(2), 209-215.
- Stawarczyk, B., Keul, C., Eichberger, M., Figge, D., Edelhoff, D., & Lümekemann, N. (2017). Three generations of zirconia: From veneered to monolithic. Part I. *Quintessence International*, 48(5), 369-380.
- Stawarczyk, B., Özcan, M., Trottmann, A., Hämmerle, C. H., & Roos, M. (2012). Evaluation of flexural strength of hiped and presintered zirconia using different estimation methods of Weibull statistics. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 10, 227-234.
- Swain, M. V., Mercurio, V., Tibballs, J., & Tholey, M. (2019). Thermal induced deflection of a porcelain–zirconia bilayer: Influence of cooling rate. *Dental Materials*, 35(4), 574-584.
- Swain, M. V. (2009). Unstable cracking (chipping) of veneering porcelain on all-ceramic dental crowns and fixed partial dentures. *Acta Biomaterialia*, 5(5), 1668-1677.
- Tan, J. P., Sederstrom, D., Polansky, J. R., McLaren, E. A., & White, S. N. (2012). The use of slow heating and slow cooling regimens to strengthen porcelain fused to zirconia. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 107(3), 163-169.
- Tang, X., Luo, H., Bai, Y., Tang, H., Nakamura, T., & Yatani, H. (2015). Influences of multiple firings and aging on surface roughness, strength and hardness of veneering ceramics for zirconia frameworks. *Journal of Dentistry*, 43(9), 1148-1153.
- Tang, X., Nakamura, T., Usami, H., Wakabayashi, K., & Yatani, H. (2012). Effects of multiple firings on the mechanical properties and microstructure of veneering ceramics for zirconia frameworks. *Journal of Dentistry*, 40(5), 372-380.
- Tang, Y. L., Kim, J.-H., Shim, J.-S., & Kim, S. (2017). The effect of different cooling rates and coping thicknesses on the failure load of zirconia-ceramic crowns after fatigue loading. *The Journal of Advanced Prosthodontics*, 9(3), 152-158.

- Tholey, M. J., Swain, M. V., & Thiel, N. (2011). Thermal gradients and residual stresses in veneered Y-TZP frameworks. *Dental Materials*, 27(11), 1102-1110.
- Trindade, F. Z., Amaral, M., Melo, R. M., Bottino, M. A., & Valandro, L. F. (2013). Zirconia-porcelain bonding: effect of multiple firings on microtensile bond strength. *Journal of Adhesive Dentistry*, 15(5), 467-472.
- Turon-Vinas, M., & Anglada, M. (2018). Strength and fracture toughness of zirconia dental ceramics. *Dental Materials*, 34(3), 365-375.
- Uludag, B., Usumez, A., Sahin, V., Eser, K., & Ercoban, E. (2007). The effect of ceramic thickness and number of firings on the color of ceramic systems: an in vitro study. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 97(1), 25-31.
- Vichi, A., Louca, C., Corciolani, G., & Ferrari, M. (2011). Color related to ceramic and zirconia restorations: a review. *Dental Materials*, 27(1), 97-108.
- Vichi, A., Sedda, M., Bonadeo, G., Bosco, M., Barbiera, A., Tsintsadze, N., Carrabba, M., & Ferrari, M. (2015). Effect of repeated firings on flexural strength of veneered zirconia. *Dental Materials*, 31(8), e151-e156.
- Voss, R. (1969). Stability of metal-ceramic crowns (die Festigkeit metallkeramischer Kronen). *Dtsch Zahnarztl Z*, 24, 726-731.
- Zadeh, P. N., Lümekemann, N., Sener, B., Eichberger, M., & Stawarczyk, B. (2018). Flexural strength, fracture toughness, and translucency of cubic/tetragonal zirconia materials. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 120(6), 948-954.
- Zeighami, S., Mahgoli, H., Farid, F., & Azari, A. (2013). The effect of multiple firings on microtensile bond strength of core-veneer zirconia-based all-ceramic restorations. *Journal of Prosthodontics: Implant, Esthetic and Reconstructive Dentistry*, 22(1), 49-53.

Danksagung

Ich bedanke mich von ganzem Herzen bei allen, die mich während der gesamten Zeit in der Forschung und bei meiner Dissertation tatkräftig und mental unterstützt haben. Ganz besonders bedanken möchte ich mich hierbei bei den folgenden Personen:

- Prof. Dr. Dipl.-Ing. (FH) Bogna Stawarczyk, M.Sc. für die Bereitstellung des Themas und ihre herausragend fachliche, freundschaftliche und unerlässliche Unterstützung.
- PD Dr. med. dent. Anja Liebermann, M.Sc. für ihre kompetente und immer hilfsbereite Betreuung.
- Dr. Michael Reise von der Firma estetic ceram ag für die Lieferung der Verblendkeramiken und als Co-Autor für die freundliche Hilfestellung im fachlichen Bereich und bei der Korrektur des Manuskriptes.
- Dr. med. dent. Ramona Buser für ihre Unterstützung als Vertretung der Betreuungskommission und als Co-Autorin mit ihrer immer positiven Art.
- Prof. Dr. med. dent. Daniel Edelhoff als Direktor Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik für die Möglichkeit der Durchführung der Studien.
- ZT Marlis Eichberger für ihre kompetente zahntechnische Hilfestellung bei der Durchführung der Versuche im Labor.
- Allen Mitarbeitern und Doktoranden der Werkstoffkunde der Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik der LMU für die schöne Zeit und überaus kollegiale Zusammenarbeit.