

P. Kohorst¹, H. Brinkmann¹, M.P. Dittmer¹, L. Borchers¹, M. Stiesch¹

Belastbarkeit nach Alterungssimulation sowie Randschlussqualität viergliedriger Zirkoniumdioxidbrücken



P. Kohorst

Load-bearing capacity after simulated aging and marginal integrity of four-unit zirconia bridges

Zahlreiche Faktoren führen im Mundhöhlenmilieu bei keramischen Restaurationen zu Degradationsprozessen und damit zu einer Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften. Für die Langlebigkeit einer Restauration ist des Weiteren auch die Passgenauigkeit entscheidend. Ziel der vorliegenden In-vitro-Studie war es, die Belastbarkeit nach Alterungssimulation und die Randschlussqualität viergliedriger Zirkoniumdioxidbrücken zu untersuchen. Insgesamt wurden 60 Brückengerüste hergestellt und in sechs homogene Gruppen aufgeteilt. Vor der Verblendung wurden die Gerüste zweier Gruppen mit einer definierten Vorschädigung versehen. Nach dem Verblendvorgang wurden die Brücken einer thermischen und mechanischen Wechselbelastung unterzogen. Bei einer Gruppe wurde zusätzlich die Randschlussqualität der Restaurationen vor und nach Verblendung analysiert. Die statistischen Untersuchungen zur Belastbarkeit und zum Einfluss des Verblendvorgangs erfolgten mit Hilfe einer Varianzanalyse bzw. eines t-Tests für gepaarte Stichproben. Durch die künstliche Alterung wurde die Belastbarkeit um bis zu 40 % reduziert, wohingegen die mechanische Vorschädigung keinen Einfluss zeigte. Im Rahmen des Verblendvorgangs kam es teilweise zu signifikanten Veränderungen des Randschlusses.

Schlüsselwörter: Zirkoniumdioxid, Belastbarkeit, Alterungssimulation, Degradation, Randschlussqualität

Numerous factors in the oral environment cause degradation processes in ceramic restorations and consequently lead to deterioration of the mechanical properties. Accuracy of fit is also crucial for the durability of a restoration. The aim of the present in vitro study was to evaluate both the load-bearing capacity of four-unit bridges after simulated aging and the marginal integrity of the restorations. A total of 60 bridge frameworks were fabricated and divided into six homogeneous groups. Prior to veneering, defined defects were produced in the frameworks of two groups to simulate a preliminary damage. After veneering, the bridges were subjected to thermal and mechanical cycling. In one group the marginal integrity of the restorations was also analysed before and after veneering. The load-bearing capacity and influence of veneering were evaluated statistically using analysis of variance and a t-test for paired samples. Simulated aging reduced load-bearing capacity by up to 40 %, while the preliminary mechanical defect did not exhibit any significant influence. Veneering caused some significant changes in the marginal fit.

Keywords: Zirconia, load-bearing capacity, simulated aging, degradation, marginal integrity

¹ Klinik für Zahnärztliche Prothetik und Biomedizinische Werkstoffkunde, (Dir.: Prof. Dr. Meike Stiesch), Medizinische Hochschule Hannover, Carl-Neuberg-Straße 1, 30625 Hannover

¹ Department of Prosthetic Dentistry and Biomedical Materials Science, (Dir.: Prof. Dr. Meike Stiesch), Hannover Medical School, Carl-Neuberg-Straße 1, 30625 Hannover, Germany
Übersetzung: LinguaDent

1 Einleitung

Mit der Einführung der Hochleistungskeramik Zirkoniumdioxid in die Zahnmedizin wurde das Indikationsspektrum für vollkeramische Restaurationen erheblich erweitert. Materialien auf Basis dieser Oxidkeramik erlauben die Herstellung von Einzelkronen bis hin zu mehrgliedrigen Brücken im Seitenzahnbereich [12]. Auch bei der Herstellung von Implantat-Abutments und in der herausnehmbaren Prothetik findet Zirkoniumdioxid mehr und mehr Anwendung. Die hervorragenden mechanischen Eigenschaften von Zirkoniumdioxid beruhen neben der hohen Initialfestigkeit des Materials auf der so genannten Umwandlungsverstärkung, bei der es unter Belastung zu einer Transformation der tetragonalen in die monokline Phase kommt und die im dentalen Bereich vorwiegend durch die Zugabe von Yttriumoxid (Y_2O_3) erreicht wird [16].

Restaurationen auf Basis von Zirkoniumdioxid unterliegen im feuchtwarmen Milieu der Mundhöhle einer Degradation der mechanischen Eigenschaften, die neben dem Auftreten eines unterkritischen Risswachstums insbesondere auf eine für diese Keramik charakteristische Erscheinung zurückzuführen ist. Dabei kommt es zunächst zur Einlagerung von Wassermolekülen an eigentlich durch Sauerstoff besetzte Gitterplätze [9]. Dies resultiert in einer beschleunigten Transformation der tetragonalen in die monokline Kristallphase und führt infolge der Volumenzunahme zu Spannungen innerhalb des Gitters, zur Initiierung von Mikrorissen und somit zur Degradation des Zirkoniumdioxides.

Neben der ständigen Anwesenheit eines wässrigen Umgebungsmilieus werden die mechanischen Eigenschaften zahnmedizinischer Restaurationen durch zyklische Kaubelastungen negativ beeinflusst. Die durchschnittlichen Kaukräfte im Molarenbereich liegen in Abhängigkeit von der Härte der Speisen zwischen 20 N und 120 N [23]. Hochrechnungen gehen dabei davon aus, dass der Mensch jährlich bis zu 800.000 Kauzyklen ausführt [21].

Bei der In-vitro-Untersuchung insbesondere vollkeramischer Restaurationen sollte diese zyklische Kaubelastung in einem wässrigen Milieu berücksichtigt werden, um zuverlässige Aussagen über das zu erwartende In-vivo-Verhalten treffen zu können. Bislang liegen in der Literatur jedoch nur wenige Arbeiten vor, die sich mit dem festigkeitsmindernden Einfluss einer mechanischen Wechselbelastung auf Zirkoniumdioxidkeramiken näher beschäftigen [4, 26].

Defekte in der Keramikstruktur sind oftmals der Ausgangspunkt für ein schleichend fortschreitendes, unterkritisches Risswachstum und können gegebenenfalls in einem katastrophalen Bruchereignis resultieren. Im Rahmen des Herstellungsprozesses zahnärztlicher Restaurationen können insbesondere während der Bearbeitung durch den Zahntechniker Schädigungen auftreten. Häufig kommt es beispielsweise beim Separieren zu unbemerkten Schadstellen im Bereich der interdentalen Konnektoren. Dieser Bereich ist aufgrund der dort während der Belastung auftretenden Zugspannungsspitzen besonders anfällig [18].

Neben der Langzeitbelastbarkeit im Milieu der Mundhöhle sind für die Langlebigkeit einer Restauration die Passgenauigkeit und der marginale Randschluss entscheidende Faktoren. Bei der Versorgung eines Zahnes mit einer künstlichen Krone wird die Qualität des Übergangsbereiches von der Spaltweite und der Konturierung des Kronenrandes bestimmt und trägt entscheidend zum Erfolg oder Misserfolg der Restauration bei.

1 Introduction

The introduction of high-performance ceramic zirconia to dentistry has considerably extended the indication range for all-ceramic restorations. Materials based on this oxide ceramic can be used for fabricating single crowns up to long-span bridges in the posterior region [12]. Zirconia is becoming increasingly used in the fabrication of implant abutments and removable prosthetics. Apart from the initial strength of the material, the outstanding mechanical properties of zirconia are based on transformation toughening, a mechanism involving transformation of the tetragonal phase to the monoclinic phase triggered by stresses in the vicinity of crack tips. In the dental sector this property of zirconia is generally attained by the addition of yttrium oxide (Y_2O_3) [16].

In the warm and humid environment of the oral cavity the mechanical properties of zirconia restorations are subject to degradation, which, apart from subcritical crack growth, is mainly caused by a phenomenon that is characteristic for this type of ceramic. Initially there is a deposit of water molecules at lattice sites normally occupied by oxygen [9]. This results in accelerated transformation of the tetragonal phase to the monoclinic crystal phase. The associated increase in volume causes stresses within the lattice and this in turn leads to initiation of microcracks and consequently to degradation of the zirconia.

As well as being constantly exposed to an aqueous environment, the mechanical properties of dental restorations are negatively affected by cyclic masticatory loading. The average masticatory forces in the molar region are between 20 N and 120 N, depending on the hardness of solid foods [23]. It is estimated that humans perform up to 800,000 masticatory cycles per year [21].

The aim of this in vitro study was to evaluate cyclic masticatory loading in an aqueous environment, particularly with all-ceramic restorations, in order to attain reliable data with regard to anticipated in-vivo behaviour. There have only been a few studies in the literature to date that have fully investigated the negative influence of mechanical cycling on the strength of zirconia ceramics [4, 26].

Defects in the ceramic structure are often the point of origin of gradual progressive subcritical crack growth which may result in catastrophic fracture in certain cases. Dental restorations may be damaged during fabrication, in particular when being prepared by the dental technician. During separation, for example, damaged spots in the region of the interdental connectors often go undetected. This area is especially susceptible due to tensile stress peaks that occur there during loading [18].

Apart from the long-term load-bearing capacity in the environment of the oral cavity, the accuracy of fit and marginal seal are crucial factors for the durability of a restoration. When restoring a tooth with an artificial crown, the gap width and contour of the crown margin determine the marginal integrity and contribute greatly to the success or failure of the restoration. Chronic irritation of the marginal tissue due to poor crown margins results in pathological changes to the periodontium such as recession, hyperplasia, pocket formation or bone resorption. Felton et al. established a close correlation between the width of the marginal gap and incidence of gingival inflammation [7]. Niches created after cement has been washed away and tooth surfaces roughened during prepara-

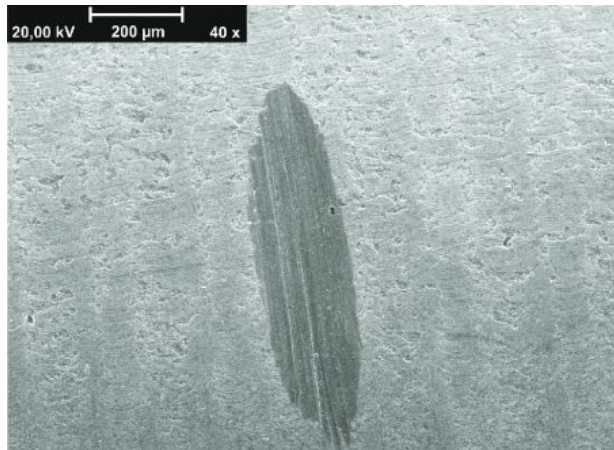


Abbildung 1 Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme einer Vorschädigung im Bereich der gingivalen Kontur eines Zirkoniumdioxidgerüsts. (Abb. 1-6 u. Tab. 1-4: P. Kohorst)

Figure 1 SEM image of preliminary damage produced on the gingival embrasure of a zirconia framework.

Eine chronische Irritation des marginalen Gewebes durch insuffiziente Kronenränder führt zu pathologischen Veränderungen des Parodontiums wie Rezessionen, Hyperplasien, Taschenbildungen und Knochenabbau. Felton et al. wiesen eine enge Korrelation zwischen der Breite des marginalen Randspaltes und dem Auftreten einer gingivalen Entzündung nach [7]. Von Zement freigewaschene Spaltnischen und durch die Präparation angeraute Stumpfoberflächen, die bei verkürzten Kronenrändern frei liegen, begünstigen zudem die Bakteriansiedlung und in der Folge die Gefahr der sekundären Randkaries und anschließender Pulpitis.

Bei der Herstellung von Kronen- bzw. Brückengerüsten aus vorgesintertem Zirkoniumdioxid mit Hilfe von CAD/CAM-Verfahren gibt es zahlreiche Faktoren innerhalb der Prozesskette, die maßgeblich zur Genauigkeit der späteren Restauration beitragen. Dies beginnt beim Scan- und Digitalisierungsvorgang und setzt sich fort bei der chargenabhängigen Berechnung des notwendigen Vergrößerungsfaktors bzw. der Fräsbahn sowie beim eigentlichen Fräsvorgang und dem abschließenden Sinterprozess. Gleichzeitig kommt es beim Verblendvorgang der Gerüste mit konventionellen Keramiken zu thermischen und mechanischen Belastungen, von denen ebenfalls ein Einfluss auf die Randschlussqualität ausgehen kann. Zahlreiche Untersuchungen konnten derartige Veränderungen des Randschlusses an metallkeramischen Restaurationen bereits nachweisen [2, 3, 8].

Im Rahmen der vorliegenden Studie sollte untersucht werden, inwieweit die Belastbarkeit von viergliedrigen Seitenzahnbrücken aus Zirkoniumdioxid durch die Alterungssimulation in einer künstlichen Mundhöhle beeinflusst wird. Des Weiteren wurde die Hypothese getestet, dass eine gesteigerte Anzahl von mechanischen Wechselbelastungszyklen, eine erhöhte Schwelllast bei Wechselbelastung oder eine mechanische Vorschädigung des Zirkoniumdioxidgerüsts eine Abnahme der Brückenbelastbarkeit hervorrufen. Neben der Belastbarkeit sollte zudem die Randschlussqualität der Brücken sowie der Einfluss des Verblendvorgangs auf den Randspalt beurteilt werden.

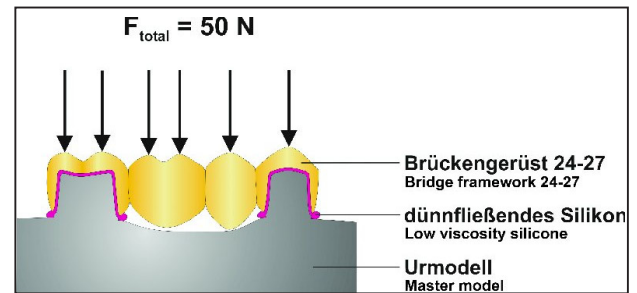


Abbildung 2 Auf Urmodell aufgesetztes Brückengerüst. Füllung des Spaltraums zwischen Stumpf und Krone mit dünnfließendem Silikon. **Figure 2** Framework fitted on the master model. Filling the gap between the die and crown with low viscosity silicone.

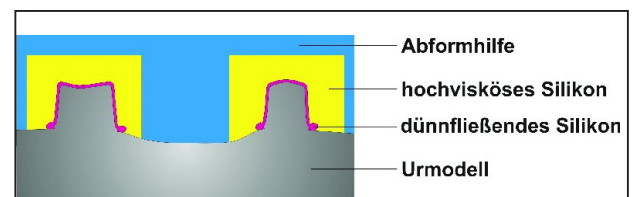


Abbildung 3 Stabilisierung der auf den Stümpfen verbliebenen Repliken mit Hilfe eines kontrastierenden Silikons.

Figure 3 Stabilization of the replicas remaining on the dies using contrasting silicone.

tion, which are exposed if the crown margin is too short, also promote bacteria colonization resulting in the risk of secondary caries and subsequent pulpitis.

During fabrication of presintered zirconia crown and bridge frameworks using the CAD/CAM technique a large number of factors within the process chain contribute greatly to the accuracy of the restoration. This begins with the scan and digitizing procedure and continues with the calculation of the batch-related expansion factor and the required milling path as well as the actual milling procedure and subsequent sintering process. Thermal and mechanical loading when veneering frameworks with conventional porcelains can also have an influence on the marginal integrity. Numerous studies have already provided evidence of these types of changes to the marginal seal on ceramometal restorations [2, 3, 8].

The aim of this study was to investigate the influence of simulated aging in an artificial oral cavity on the load-bearing capacity of zirconia four-unit posterior bridges. In addition, the hypothesis to be tested was that an increased number of mechanical fatigue-loading cycles, increased cyclic loads or prior mechanical damage to the zirconia framework cause a reduction in the load-bearing capacity of the bridges. Apart from the load-bearing capacity, the marginal integrity of the bridges and the influence of the veneering process on the marginal gap were also to be evaluated.

2 Materials and methods

Teeth 24 and 27 were prepared on an upper acrylic model (Frasaco OK 119, A-3 T, Franz Sachs & Co, Tettngang, D) for fitting a

2 Material und Methode

Auf einem Oberkieferkunststoffmodell (Frasaco OK 119, A-3 T, Franz Sachs & Co, Tettngang, D) wurden die Zähne 24 und 27 zur Aufnahme einer viergliedrigen Vollkeramikbrücke präpariert. Es wurde eine Hohlkehlpräparation vorgenommen, die eine zirkuläre Wandstärke der Brückenanker von 0,8 mm erlaubte. Okklusal wurden die Pfeilerzähne um 2 mm gekürzt, der Konvergenzwinkel der präparierten Stümpfe betrug 10° . Nach Abformung des Urmodells mit einem additionsvernetzenden Silikon wurden Modelle aus Superhartgips (Fuji Rock, GC, Leuven, B) erstellt. Auf Grundlage dieser Modelle wurden insgesamt 60 Brückengerüste aus vorgesinterten Zirkoniumdioxidhohlringen (Cercon base, DeguDent, Hanau, D) gefertigt und randomisiert auf insgesamt sechs Versuchsgruppen ($n = 10$) aufgeteilt. Die Dimensionen der Gerüste waren bis auf die Fertigungstoleranzen ($< 0,2$ mm bei den Verbindermaßen) identisch. Die Wandstärke der Zirkoniumdioxidgerüste betrug im Bereich der Brückenanker zirkulär 0,6 mm – 0,8 mm und okklusal 1 mm. Die Querschnitte der elliptisch gestalteten Verbinders wiesen folgende Flächen auf: $12,5$ mm² (24–25), $15,6$ mm² (25–26) und $11,6$ mm² (26–27). Die Gerüste aus zwei Untersuchungsgruppen wurden gingival im Bereich des Verbinders 25–26 (Ort der höchsten Zugspannungen bei okklusaler Belastung in vertikaler Richtung) mit einem U-förmigen Ritz versehen, der eine Breite von 180 μ m und eine Tiefe von 60 μ m aufwies (Abb. 1). So sollte eine mögliche Schädigung des Gerüsts durch den Zahntechniker simuliert werden. Die Schädigung wurde mit einer diamantierten Innenlochsäge (Microslice 2, Metals Research Ltd., Royston, UK) unter definierten Bedingungen vorgenommen und anschließend lichtmikroskopisch bzw. an ausgewählten Proben auch rasterelektronenmikroskopisch kontrolliert. Bei einer weiteren Gruppe wurde die Passgenauigkeit der Gerüste mit einer Replika-Technik untersucht. Dazu wurde ein dünnfließendes Silikon in die Kronenlumina appliziert und die Gerüste daraufhin unter einer definierten Last von 50 N auf das Urmodell gesetzt (Abb. 2). Nach vorsichtiger Abnahme der Restaurationen verblieben diese Platzhalter (Repliken) zunächst auf den Stümpfen und wurden unter Anwendung eines Speziallöffels mit kontrastierendem Silikon hinterfüllt (Abb. 3) und vom Modell abgezogen. Die so entstandenen Stumpfabbildungen wurden mit Hilfe einer speziellen Führungslehre axial geviertelt. Anschließend wurde der marginale Schnittbereich der gevierteilten Repliken im Auflichtmikroskop dargestellt und fotografiert. Nach dem Einscannen der Aufnahme erfolgte die Messung der Replikaschichtstärken am PC mit Hilfe des Programms Corel Draw 10 (Corel Cop., Ottawa, CAN). Für alle Messorte wurde jeweils der horizontale (x – horizontal discrepancy), der vertikale (y – vertical discrepancy), der direkte (z – marginal discrepancy) und der direkte lotrechte (w – marginal gap) Abstand zwischen Stumpf und Krone ermittelt, ferner die Spaltweite u (internal gap) in 200 μ m Abstand vom Kronenrand (Abb. 4). Nach Verblendung der Gerüste mit den systemeigenen Verblendmassen (Cercon ceram S, DeguDent, Hanau, D) wurde bei der oben genannten Gruppe die Passgenauigkeit erneut untersucht. Die Verblendung wurde dabei im gesamten Gerüstbereich vorgenommen, so dass auch die basal angebrachte Vorschädigung von der Verblendmasse bedeckt wurde. Eine homogene Dimensionierung der Verblendungen mit

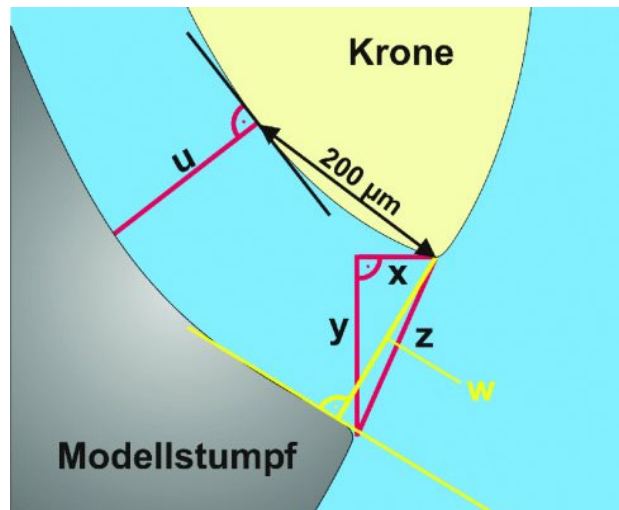


Abbildung 4 Definition der Messstrecken für den Randspalt zwischen Stumpf und Krone. Marginale Diskrepanz (x), vertikale Diskrepanz (y), direkte marginale Diskrepanz (z), marginaler Spalt (w), interner Spalt (u).
Figure 4 Definition of measurements for the marginal gap between the die and crown. Horizontal discrepancy (x), vertical discrepancy (y), marginal discrepancy (z), marginal gap (w), internal gap (u).

four-unit, all-ceramic bridge. A deep chamfer was prepared, which provided a circumferential wall thickness of 0.8 mm for the bridge abutments. The abutment teeth were reduced occlusally by 2 mm, the convergence angle of the prepared teeth was 10° . After taking an impression of the master model using addition-curing silicone, models were fabricated using high-strength dental stone (Fuji Rock, GC, Leuven, B). Based on these models, a total of 60 bridge frameworks were fabricated from presintered zirconia blanks (Cercon base, DeguDent, Hanau, D) and randomly assigned to six test groups ($n = 10$). All bridges had the same dimensions except for fabrication tolerances (< 0.2 mm with the connector dimensions). The circumferential wall thickness of the zirconia framework was 0.6 mm to 0.8 mm at the bridge abutments and 1 mm in the occlusal area. The cross-sectional areas of the elliptical connectors were as follows: 12.5 mm² (24–25), 15.6 mm² (25–26) and 11.6 mm² (26–27). U-shaped scratches were prepared in the frameworks of two test groups in the gingival region of the 25–26 connector (site of maximum tensile stress during vertical loading); the scratches were 180 μ m wide and 60 μ m deep (Fig. 1). This was to simulate possible damage to the framework by the dental technician. The damage was produced using a diamond-coated annular saw (Microslice 2, Metals Research Ltd., Royston, UK) under defined conditions and then checked on selected samples using a light microscope and also a scanning electron microscope. The accuracy of fit was evaluated in another group using a replica technique. The technique involved applying low viscosity silicone to the fitting surfaces of the crowns and then fitting the framework to the master model under a defined load of 50 N (Fig. 2). After careful removal of the restoration, these spacers (replicas) initially remained on the dies and were then stabilized using a customized tray with contrasting silicone (Fig. 3) before being removed from the model. The die impressions were quartered axially with the aid of a special slide gauge. The cut face of the

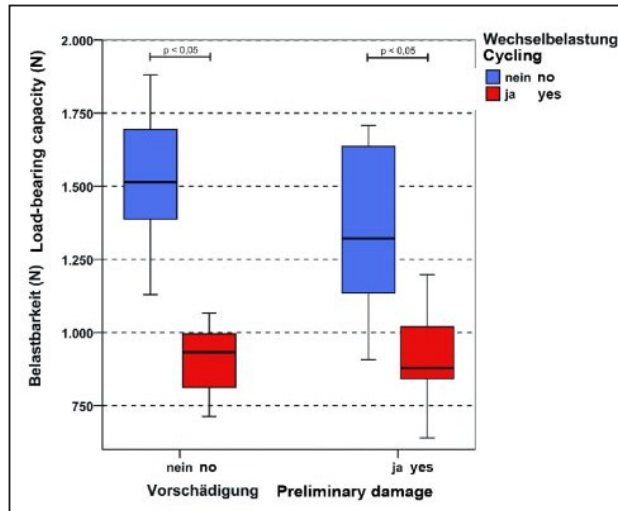


Abbildung 5 Boxplot-Diagramm zur Darstellung der Belastbarkeit in Abhängigkeit von thermischer und mechanischer Wechselbelastung und mechanischer Vorschädigung. Angegeben sind Median, mittlere Quartile und Extremwerte.

Figure 5 Box chart representing load-bearing capacity according to thermal and mechanical cycling and preliminary damage. Medians, quartiles and extremes are given.

Schichtstärken zwischen 0,5 mm und 1,2 mm wurde mit Hilfe von Kontrollschlüsseln sichergestellt, die zuvor anhand eines „Wax-ups“ erstellt worden waren.

Vor der folgenden Alterungssimulation und den Bruchlasttests wurden die Brücken auf Pfeilerzähnen aus Polyurethan (PUR, Alpha-Die-Top, Schütz Dental, Rosbach, D) zementiert (Ketac Cem, 3M Espe, Seefeld, D), die zur Simulation der physiologischen Pfeilerresilienz mit einem Latexmaterial (Erkaskin, Erkodent, Pfalzgrafenweiler, D) ummantelt worden waren. Daraufhin wurden die Pfeilerzähne mit den zementierten Brücken in einem PUR-Sockel fixiert, was eine spannungsfreie Zuordnung der Pfeiler ermöglichte.

Mit Ausnahme von zwei Kontrollgruppen (nicht vorgeschädigt/vorgeschädigt) wurden die Brücken im Folgenden während 200-tägiger Lagerung in destilliertem Wasser bei 36 °C einer künstlichen Alterung durch thermische und mechanische Wechselbelastung unterzogen. Während dieser Alterungssimulation erfolgten $1 \cdot 10^4$ thermische Wechselbelastungen mit Badtemperaturen von 5 °C und 55 °C für jeweils 30 s (RCS 6, Lauda, Königshofen, D). Die mechanische Wechselbelastung wurde in einem Kausimulator (Eigenbau, Forschungswerkstatt, Medizinische Hochschule Hannover, D) mit einer Frequenz von 2,5 Hz durchgeführt, wobei bei den einzelnen Gruppen die Gesamtzahl der Belastungszyklen ($1 \cdot 10^6$ bzw. $2 \cdot 10^6$) und die Größe der Schwelllast (100 N bzw. 200 N) variiert wurden. Im Folgenden sind die einzelnen Untersuchungsgruppen mit Art der Wechselbelastung bzw. Vorschädigung aufgeführt: Cer I (keine Vorschädigung, keine thermische oder mechanische Wechselbelastung), Cer II (Vorschädigung, keine thermische oder mechanische Wechselbelastung), Cer III (keine Vorschädigung, $1 \cdot 10^4$ thermische Wechselbelastungszyklen, $1 \cdot 10^6$ mechanische Wechselbelastungszyklen mit 100 N Schwelllast), Cer IV (Vorschädigung, $1 \cdot 10^4$ thermische

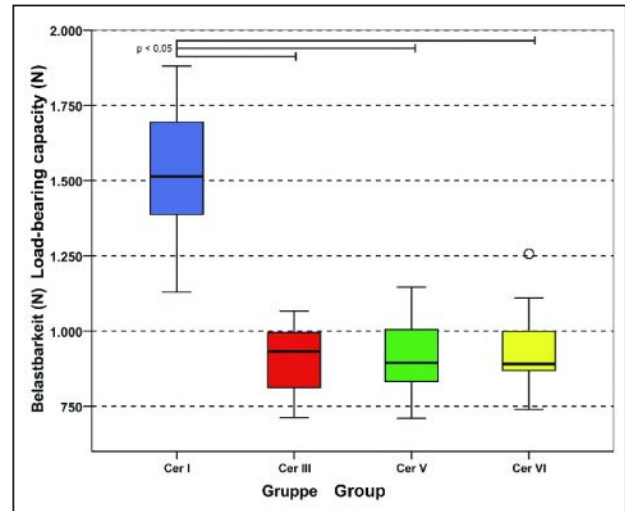


Abbildung 6 Boxplot-Diagramm zur Darstellung der Belastbarkeit in Abhängigkeit von unterschiedlichen mechanischen Wechselbelastungsparametern. Angegeben sind Median, mittlere Quartile und Extremwerte.

Figure 6 Box chart representing load-bearing capacity according to different parameters of mechanical cycling. Medians, quartiles and extremes are given.

quartered replicas was then placed under a reflected light microscope and the marginal area photographed. After scanning the slides, the thickness of the replicas was measured on a PC using the Corel Draw 10 programme (Corel Corp., Ottawa, CAN). The horizontal (x – horizontal discrepancy), vertical (y – vertical discrepancy), direct (z – marginal discrepancy) and direct vertical (w – marginal gap) gap between the die and crown were recorded for each type of measurement as well as the width of gap (*internal gap*) at 200 μ m from the crown margin (Fig. 4). After veneering the frameworks with the corresponding build-up porcelains (Circon ceram S, DeguDent, Hanau, D), the accuracy of fit of the above group was again evaluated. The entire framework was veneered so that the preliminary damage on the basal surface was also covered by the veneering porcelain. Templates, which had been fabricated beforehand with the aid of a wax-up, were used to ensure that the dimensions of the veneers were homogeneous with a thickness between 0.5 mm and 1.2 mm.

Before simulated aging and fracture load tests, the bridges were cemented (Ketac Cem, 3M Espe, Seefeld, D) onto polyurethane (PUR, Alpha-Die-Top, Schütz Dental, Rosbach, D) abutments, which had been covered with a latex material (Erkaskin, Erkodent, Pfalzgrafenweiler, D) to simulate the physiological resilience of natural abutment teeth. The abutment dies and cemented bridges were then fixed in a PUR base which ensured stress-free positioning of the abutments.

With the exception of two control groups (no preliminary damage/preliminary damage), the bridges were then subjected to simulated aging by thermal and mechanical cycling during storage for 200 days in distilled water at 36 °C. During simulated aging, $1 \cdot 10^4$ thermal cycles were performed at bath temperatures of 5 °C and 55 °C with 30 s dwell time each (RCS 6, Lauda, Königshofen, D). Mechanical cycles were performed in a mastication simulator (built in-house at the Research and Development

Wechselbelastungszyklen, $1 \cdot 10^6$ mechanische Wechselbelastungszyklen mit 100 N Schwelllast), Cer V (keine Vorschädigung, $1 \cdot 10^4$ thermische Wechselbelastungszyklen, $2 \cdot 10^6$ mechanische Wechselbelastungszyklen mit 100 N Schwelllast), Cer VI (keine Vorschädigung, $1 \cdot 10^4$ thermische Wechselbelastungszyklen, $1 \cdot 10^6$ mechanische Wechselbelastungszyklen mit 200 N Schwelllast) (Tab. 1).

Nach der künstlichen Alterung wurden die Brücken in einer Universalprüfmaschine (Type 20K, UTS Testsysteme, Ulm-Einsingen, D) mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 1 mm/min bis zum Bruch belastet, ein Kraftabfall von mehr als 15 N wurde dabei als Versagen der Restauration gewertet. Die Kraffteinleitung erfolgte in vertikaler Richtung über eine Stahlkugel (6 mm), im Bereich des mittleren Verbinders wurde zur Verhinderung von Spannungsspitzen eine 0,2 mm starke Zinnfolie zwischen Kugel und Brücke angebracht.

Die statistische Analyse zum Einfluss der Alterungssimulation auf die Belastbarkeit der Brücken wurde mit Hilfe einer einfaktoriellen, die Analyse zum Einfluss der Vorschädigung mit Hilfe einer zweifaktoriellen Varianzanalyse vorgenommen (SPSS 15.0, Software Corp., München, D). Die angenommene Nullhypothese war, dass die Belastbarkeit der Restaurationen weder durch die künstliche Alterung noch durch die Vorschädigung beeinflusst wird. Zusätzlich wurden für jede Testgruppe die Weibullparameter F_0 (charakteristische Bruchlast) und m (Weibullmodul) erhoben. Die statistische Auswertung zum Einfluss des Verblendvorgangs auf die Passgenauigkeit erfolgte mit Hilfe eines t-Tests für gepaarte Stichproben. Das Signifikanz-Niveau wurde bei allen Auswertungen auf $p = 0,05$ festgelegt.

3 Ergebnisse

Tabelle 2 zeigt einen Überblick der Ergebnisse der Bruchlasttests. Die visuelle Inspektion der Brücken nach der Alterungssimulation ergab, dass sämtliche Restaurationen das Procedere unverändert überstanden hatten und somit abschließend bis zum Bruch belastet werden konnten. Bei dem als Versagen gewerteten Lastabfall von mehr als 15 N kam es bei 57 der insgesamt 60 untersuchten Brücken zu einer Fraktur des Zirkoniumdioxidgerüsts, zwei Brücken wiesen Hertzische Kontaktfrakturen im Bereich der Lasteinleitung auf, und bei einer Brücke kam es zu einer großflächigen Abplatzung der Verblendkeramik. Es zeigte sich, dass die mechanische Vorschädigung keinen signifikanten Einfluss auf die Belastbarkeit der Restaurationen hatte ($p = 0,213$), und zwar weder bei den gealterten (Cer IV/921 N) noch bei den nicht gealterten Brücken (Cer II/1335 N) (Abb. 5). Demgegenüber zeigte die künstliche Alterung einen signifikanten Einfluss auf die Belastbarkeit der Restaurationen, und zwar sowohl bei den Brücken mit als auch bei denen ohne mechanische Vorschädigung ($p < 0,001$). Im Vergleich zu den Kontrollgruppen Cer I und Cer II kam es infolge der Alterungssimulation zu einem erheblichen Abfall der Belastbarkeit um bis zu 40 % (Abb. 5). Die Variation der mechanischen Wechselbelastungsparameter hatte hingegen keinen zusätzlichen Effekt auf die Belastbarkeit der Restaurationen, die Mittelwerte lagen bei 904 N (Cer III), 924 N (Cer V) und 952 N (Cer VI) (Tab. 3, Abb. 6).

Centre, Hannover Medical School, D) with a frequency of 2.5 Hz; the total number of load cycles ($1 \cdot 10^6$ and $2 \cdot 10^6$) and the upper limit of the cyclic load (100 N and 200 N) were varied according to the individual groups. The type of fatigue cycling and preliminary damage of the individual groups were as follows: Cer I (no preliminary damage, no thermal or mechanical cycling), Cer II (preliminary damage, no thermal or mechanical cycling), Cer III (no preliminary damage, $1 \cdot 10^4$ thermal cycling, $1 \cdot 10^6$ mechanical cycling with 100 N upper load limit), Cer IV (preliminary damage, $1 \cdot 10^4$ thermal cycling, $1 \cdot 10^6$ mechanical cycles with 100 N upper load limit), Cer V (no preliminary damage, $1 \cdot 10^4$ thermal cycling, $2 \cdot 10^6$ mechanical cycling with 100 N repeated load cycle), Cer VI (no preliminary damage, $1 \cdot 10^4$ thermal cycling, $1 \cdot 10^6$ mechanical cycling with 200 N repeated load cycle) (Tab. 1).

Following artificial aging, the bridges were loaded in a universal testing machine (Type 20K, UTS Test Systems, Ulm-Einsingen, D) at a cross-head speed of 1 mm/min until fracture; a reduction in force of more than 15 N was assessed as failure of the restoration. The force was applied vertically using a steel ball (6 mm). A piece of tin foil 0.2 mm thick was placed between the ball and bridge at the central connector to prevent stress peaks.

The influence of simulated aging and preliminary damage on load-bearing capacity was investigated using one-way and two-factor analysis of variance, respectively (SPSS 15.0, Software Corp., Munich, D). The assumed null hypothesis was that the load-bearing capacity of the restoration would not be influenced either by artificial aging or by preliminary damage. In addition, the Weibull parameter F_0 (characteristic fracture load) and m (Weibull modulus) were determined for each test group. Statistical analysis of the influence of the veneering process on the accuracy of fit was performed using a t-test for paired samples. A significance level of $p = 0.05$ was established for all analyses.

3 Results

Table 2 provides an overview of the results of the fracture load test. Visual inspection of the bridges following simulated aging indicated that all restorations had survived the procedure intact and could therefore then be loaded until fracture. The zirconia framework fractured in 57 of the 60 bridges tested with a load reduction of more than 15 N, which was assessed as failure; two bridges had Hertzian contact fractures in the region of load application and a large surface of veneering porcelain split off in the case of one bridge. Statistical analysis revealed that mechanical preliminary damage did not have any significant influence on the load-bearing capacity of the restorations ($p = 0.213$), neither with the aged bridges (Cer IV/921 N) nor the bridges that were not aged (Cer II/1335 N) (Fig. 5). In contrast, artificial aging had a significant influence on the load-bearing capacity of the restorations, both in the case of bridges with preliminary mechanical damage and those without preliminary mechanical damage ($p < 0.001$). Compared with control groups Cer I and Cer II, there was a considerable reduction in load-bearing capacity of up to 40 % as a result of simulated aging (Fig. 5). The variation of mechanical cycling parameters on the other hand did not have any additional effect on the load-bearing capacity of the restorations; the means were 904 N (Cer III), 924 N (Cer V) and 952 N (Cer VI) (Tab. 3, Fig. 6).

Gruppe Group	Vorschädigung Preliminary damage	Thermische Wechselzyklen Thermal cycling	Mechanische Wechselzyklen Mechanical cycling	Schwelllast Repeated load cycle
Cer I	-	-	-	-
Cer II	+	-	-	-
Cer III	-	1·10 ⁴	1·10 ⁶	100 N
Cer IV	+	1·10 ⁴	1·10 ⁶	100 N
Cer V	-	1·10 ⁴	2·10 ⁶	100 N
Cer VI	-	1·10 ⁴	1·10 ⁶	200 N

Tabelle 1 Variation von Wechselbelastungszyklen und Vorschädigungen innerhalb der einzelnen Testgruppen.

Table 1 Variation in fatigue load cycles and preliminary damage within the individual test groups.

Erwartungsgemäß lagen die Ergebnisse für die charakteristische Bruchlast F_0 zwischen 6 % und 8 % höher als die mittleren Bruchlasten und zeigten in der Richtung der Veränderungen die gleichen Tendenzen (Tab. 2). Eine Steigerung der Anzahl der mechanischen Wechselbelastungszyklen führte zu einer nicht signifikanten Zunahme des Weibullmoduls von 7,2 (Cer I) über 8,0 (Cer III) auf 8,6 (Cer V). Die Erhöhung der Schwelllast (Cer VI) hatte hingegen keinerlei Einfluss, der Weibullmodul betrug ebenso wie in der Kontrollgruppe (Cer I) 7,2 (Tab. 2). Die mechanische Vorschädigung führte zu einer Abnahme des Weibullmoduls. Dieser war sowohl bei den nicht künstlich gealterten Probekörpern (Abfall von 7,2 auf 5,4) als auch bei den gealterten Brücken (Abfall von 8,0 auf 6,2) signifikant (Tab. 2).

Die Ergebnisse der Randspaltanalyse für die einzelnen Messstrecken sind in Tabelle 4 dargestellt. Die Veränderungen der Mittelwerte lagen nach der Verblendung für die *horizontal discrepancy* (x) bei -8,2 µm, für die *vertical discrepancy* (y) bei +23,1 µm, für die *marginal discrepancy* (z) bei +12,4 µm und für den *marginal gap* (w) bei +12,0 µm. Für den *internal gap* u ergab sich eine Veränderung des Mittelwertes von +7,3 µm. Bei den Messstrecken y (p = 0,033) und w (p = 0,031) waren die Veränderungen infolge des Verblendvorgangs signifikant.

4 Diskussion

Ein wässriges Umgebungsmilieu, wie es in der menschlichen Mundhöhle vorherrscht, fördert bei Keramiken das langsame unterkritische Risswachstum und ruft bei Zirkonimdioxid-Keramiken zudem eine spontane Umwandlung der tetragonalen in die monokline Kristallphase hervor. Dabei zeigen Untersuchungen, dass die spontane Phasentransformation von Zir-

As anticipated, the results for the characteristic breaking load F_0 were between 6 % and 8 % higher than the mean breaking loads and exhibited the same type of variations from group to group (Tab. 2). An increase in the number of mechanical fatigue load cycles resulted in a non-significant increase of the Weibull modulus from 7.2 (Cer I) to 8.0 (Cer III) then to 8.6 (Cer V). The increase in the number of load cycles (Cer VI) on the other hand did not have any influence: the Weibull modulus was the same as in the control group (Cer I) 7.2 (Tab. 2). Mechanical preliminary damage resulted in a reduction of the Weibull modulus. This was significant both with the samples not subjected to artificial aging (reduction of 7.2 to 5.4) and those bridges aged artificially (reduction of 8.0 to 6.2) (Tab. 2).

The results of marginal gap analysis for the individual measurements are shown in Table 4. The changes in the mean after veneering were -8.2 µm for the *horizontal discrepancy* (x), +23.1 µm for the *vertical discrepancy* (y), +12.4 µm for the *marginal discrepancy* (z) and +12.0 µm for the *marginal gap* (w). There was a change in the mean of +7.3 µm for the *internal gap* u. Changes due to the veneering procedure were significant with parameters y (p = 0.033) and w (p = 0.031).

4 Discussion

An aqueous environment as occurs in the human oral cavity promotes gradual subcritical crack growth and also causes spontaneous transformation of the tetragonal to the monoclinic crystal phase with zirconia ceramics. Studies indicate that spontaneous phase transformation of zirconia in an aqueous environment progresses quickly initially, but ceases

Gruppe Group	Belastbarkeit mit Standardabweichung (N) Load-bearing capacity with standard deviation (N)	F_0 (N)	95 %-Konfidenzintervall 95 % Confidence interval		m	95 %-Konfidenzintervall 95 % Confidence interval	
			untere Grenze lower limit	obere Grenze upper limit		untere Grenze lower limit	obere Grenze upper limit
Cer I	1.525,0 (76,5)	1.625,8	1.580,3	1.671,4	7,2	6,1	8,4
Cer II	1.334,7 (89,4)	1.445,9	1.391,4	1.500,3	5,4	4,6	6,3
Cer III	903,7 (40,8)	958,6	927,8	989,3	8,0	6,4	9,7
Cer IV	921,1 (55,6)	990,6	955,5	1.025,8	6,2	5,1	7,2
Cer V	923,5 (40,3)	976,3	948,5	1.004,1	8,6	6,9	10,3
Cer VI	952,4 (51,4)	1.015,8	957,4	1.074,1	7,2	4,7	9,8

Tabelle 2 Mittlere Belastbarkeiten (Standardabweichungen) und Weibullparameter F_0 und m . Zusätzliche Angabe der 95 %-Konfidenzintervalle für die Weibullparameter F_0 und m .

Table 2 Mean fracture load (standard deviation) and Weibull parameters F_0 and m . The 95 % confidence intervals for Weibull parameters F_0 and m are also given.

koniumdioxid im wässrigen Milieu initial schnell voranschreitet, jedoch im weiteren zeitlichen Verlauf zum Stillstand kommt. So beschreibt *Drummond*, dass bei einer Zirkoniumdioxidkeramik nach 300 Tagen Wasserlagerung keine weitere nennenswerte Festigkeitsabnahme zu beobachten ist [6]. Es ist somit davon auszugehen, dass im Rahmen der 200-tägigen Wasserlagerung in der vorliegenden Studie ein Großteil dieses Degradationsprozesses abgelaufen ist. Dabei muss jedoch berücksichtigt werden, dass die in der vorliegenden Studie untersuchten Zirkoniumdioxidgerüste mit einer konventionellen Feldspatkeramik verblendet waren und somit nicht direkt mit dem wässrigen Umgebungsmilieu in Kontakt standen. Es bleibt die Frage offen, inwieweit es durch die Verblendkeramikschiicht hindurch zu einer Diffusion von Wassermolekülen kommt oder ob die Feldspatkeramik eine Art Schutzschicht bildet, wie dies für Oberflächenbeschichtungen aus Siliziumoxid und Zirkoniumsilikat bereits beschrieben wurde [11].

Während der Wasserlagerung wurden die Brücken zusätzlich einer thermischen Wechselbelastung unterzogen. Diese sollte die natürlichen thermischen Einflüsse simulieren, denen der Zahnersatz in der Mundhöhle bei der Nahrungsaufnahme und der Atmung ausgesetzt ist. Insbesondere schockartige Temperaturwechsel rufen Spannungen hervor und führen somit letztendlich bei Keramiken zu einem langsamen unterkritischen Risswachstum und gegebenenfalls katastrophalen Frakturen. Untersuchungen an Probekörpern aus Feldspatkeramik zeigten sowohl eine Abnahme der Festigkeit [1] als auch die Entstehung von Rissen während thermischer Wechselbelastung.

Neben einer thermischen wurde zudem eine mechanische Wechselbelastung im wässrigen Milieu vorgenommen. Die An-

after a period of time. *Drummond* reported that no further significant reduction of strength was observed in a zirconia ceramic after 300 days of storage in water [6]. It can therefore be assumed that in the present study a large proportion of the degradation process had taken place during the 200 days of water storage. It should, however, be taken into account that the zirconia frameworks tested in this study were veneered using a conventional feldspar porcelain and were therefore not in direct contact with the aqueous environment. The question remains to what extent water molecules permeated the layer of veneering porcelain or whether the feldspar porcelain formed a type of protective layer, as reported for surface layers of silicon oxide and zirconium silicate [11].

The bridges were also subjected to thermocycling during water storage. This was intended to simulate natural thermal influences to which restorations are exposed in the oral cavity during food intake and breathing. Sudden changes in temperature in particular may cause stresses and in the case of ceramics ultimately result in gradual, subcritical crack growth and possibly catastrophic fracture. Tests on feldspar porcelain samples indicated both a reduction in strength [1] and the formation of cracks during thermocycling.

Mechanical cycling was performed in an aqueous environment in addition to thermocycling. According to a recent study, the number of masticatory cycles per year is estimated to be 800,000 [21], which with the $1 \cdot 10^6$ and $2 \cdot 10^6$ load cycles used in the present study, correlates with a period of 15 and 30 months in situ. During simulation of mastication cyclic loads of 100 N and 200 N were selected that are in the upper range of physiological forces; values between 20 N and

	Cer I	Cer III	Cer V	Cer VI
Cer I		< 0.001	< 0.001	< 0.001
Cer III	< 0.001		0.995	0.942
Cer V	< 0.001	0.995		0.987
Cer VI	< 0.001	0.942	0.987	

Tabelle 3 Ergebnisse des statistischen post-hoc-Tests für die unterschiedlich wechselbelasteten Testgruppen.

Table 3 Results of statistical post-hoc analysis of test groups subjected to different fatigue regimes ($p < 0.05$).

zahl der jährlich auftretenden Kauzyklen wird dabei nach neueren Untersuchungen mit 800.000 angegeben [21], was bei einer Zyklenzahl von $1 \cdot 10^6$ bzw. $2 \cdot 10^6$ in der vorliegenden Studie mit einer Tragedauer von 15 bzw. 30 Monaten korreliert. Bei der Simulation des Kauaktes wurden des Weiteren Schwelllasten von 100 N bzw. 200 N gewählt, die im oberen Bereich der physiologisch auftretenden Kräfte liegen, für die Werte zwischen 20 N und 120 N gefunden wurden [23]. Eine Erhöhung der simulierten Kaukraft ist nach *Rosenritt* et al. mit einer Abnahme der Bruchfestigkeit vollkeramischer Restaurationen verbunden [21]. Unter diesem Gesichtspunkt erscheint eine Steigerung der Schwelllast berechtigt, da so die Belastbarkeit der Restaurationen auch unter stärkerer mechanischer Beanspruchung, sei es durch Bruxismus oder sehr harte Nahrung, besser abgeschätzt werden kann.

In allen Testgruppen führte die künstliche Alterung zu einer signifikanten Abnahme der Belastbarkeit um ungefähr 40 %, wobei eine Variation der Wechselbelastungsparameter keinen signifikanten Einfluss auf die Belastbarkeit aufwies. Andere Autoren fanden bei der Untersuchung von mehrgliedrigen Zirkoniumdioxidrestaurationen ebenfalls eine Festigkeitsabnahme, die sich jedoch in einem Bereich von 20 % bewegte [24]. *Rosenritt* et al. berichteten ebenfalls über eine Abnahme der Belastbarkeit von Vollkeramikbrücken infolge erhöhter Schwelllasten während zyklischer mechanischer Wechselbelastungen [21]. Im Gegensatz zur vorliegenden Studie wurde jedoch bei Erhöhung der Schwelllast von 50 N auf 150 N eine signifikante Abnahme der Belastbarkeit festgestellt. Diese Ergebnisse sind vermutlich auf die Charakteristika der getesteten Glaskeramik zurückzuführen, die neben einer geringeren Eigenfestigkeit im Vergleich zu Zirkoniumdioxid auch eine erhöhte Empfindlichkeit gegenüber unterkritischem Risswachstum aufweist [26].

Gegenüber den oben genannten Untersuchungen konnten *Curtis* et al. für standardisierte Probekörper weder in trockenem noch in feuchtem Umgebungsmilieu einen signifikanten Einfluss auf die Festigkeit durch mechanische Wechselbelastungen mit Schwelllasten zwischen 500 N und 800 N finden, wobei jedoch nur 2000 Zyklen durchgeführt wurden [4]. *Sundh* et al. konnten ebenfalls keinen signifikanten Einfluss auf die Belastbarkeit von Zirkoniumdioxidbrücken feststellen, die $1 \cdot 10^5$ Wech-

120 N have been established for physiological forces [23]. According to *Rosenritt* et al. an increase in simulated masticatory force is associated with a reduction in the fracture resistance of all-ceramic restorations [21]. Taking this into consideration, an increase of the number of cycles appears justified, as it allows more accurate assessment of the load-bearing capacity of the bridge under greater mechanical loading due to bruxism or very hard foods.

Artificial aging resulted in a significant reduction of load-bearing capacity of about 40 % in all test groups, whereby variation of the fatigue parameters did not have any significant influence on the load-bearing capacity. Other authors also established a reduction of strength in studies on long-span zirconia restorations, though the reduction was in the region of 20 % [24]. *Rosenritt* et al. also reported a reduction in the load-bearing capacity of all-ceramic bridges as a result of an increase in the number of load cycles during mechanical fatigue loading [21]. Unlike the present study, however, a significant reduction of load-bearing capacity occurred with an increase in the upper load limit from 50 N to 150 N. These results are probably due to the characteristics of the glass ceramic tested, which as well as having a lower inherent strength than zirconia also has increased sensitivity to sub-critical crack growth [26].

In contrast to the studies mentioned above, *Curtis* et al. were unable to establish any significant influence on the strength of standardized test pieces neither in a dry nor moist environment due to mechanical cycling with upper load limits between 500 N and 800 N, though only 2,000 cycles were performed [4]. *Sundh* et al. were also unable to establish any significant influence on the load-bearing capacity of zirconia bridges subjected to $1 \cdot 10^5$ fatigue loading cycles, with an upper load limit of 50 N, in a water bath [27]. Similar observations were also made by *Studart* et al. for zirconia test pieces subjected to fatigue cycling. The strength of the test pieces remained virtually constant over a long period of loading until it fell abruptly and remained at a low level. There were parallels in the behaviour pattern of this material with the observations in this study, where neither doubling the upper limit of the cyclic load nor doubling the number

selbelastungszyklen mit 50 N Schwelllast im Wasserbad unterzogen wurden [27]. Eine ähnliche Beobachtung wurde auch von Studart et al. für Zirkoniumdioxidprobestkörper unter Wechselbelastung gemacht. Über einen langen Belastungszeitraum blieb die Festigkeit der Proben nahezu konstant erhalten, bis sie dann plötzlich abrupt abfiel und auf einem niedrigeren Niveau verblieb. Dieses Materialverhalten zeigt Parallelen zu den Beobachtungen in der vorliegenden Studie, wo weder die Verdopplung der Schwelllast noch die Verdopplung der Zyklenanzahl zu einer weiteren Abnahme der Belastbarkeit führten. Drummond konnte bei der reinen Wasserlagerung von Zirkoniumdioxidproben ebenfalls ein ähnliches Verhalten feststellen [6].

Neben dem Effekt von thermischer und mechanischer Wechselbelastung wurde in der vorliegenden Studie der Einfluss einer mechanischen Vorschädigung auf die Belastbarkeit der Brücken betrachtet. Weder bei den gealterten noch bei den nicht gealterten Restaurationen wurde jedoch ein signifikanter Einfluss auf die Belastbarkeit beobachtet. Demgegenüber wird von anderen Autoren, die sich mit diesem Gesichtspunkt beschäftigen, eine signifikante Abnahme der Bruchfestigkeit infolge einer mechanischen Vorschädigung beschrieben [15]. Grundsätzlich kann die mechanische Bearbeitung von Keramiken zwei unterschiedliche Phänomene verursachen. Zum einen induzieren oberflächliche Schädigungen Druckspannungen, welche die Festigkeit von Zirkoniumdioxid steigern [14]. Zum anderen ruft die Bearbeitung Risse hervor, die ungewollte Spannungskonzentrationen bewirken und bei Überschreiten der oberflächlichen, unter Druckspannung stehenden Schicht zur Festigkeitsminderung führen [25]. Eine Erklärung für den fehlenden Einfluss der Vorschädigungen in der vorliegenden Studie könnten die Ausmaße des Ritzes von nur 180 µm in der Breite und 60 µm in der Tiefe sein. Zudem wurden die Schädigungen unter Wasserkühlung angebracht und wiesen aufgrund der Sägeblattgeometrie gerundete Innenkanten auf, was unter dem Gesichtspunkt auftretender Spannungen eher günstig zu bewerten ist. Obwohl die höchsten Zugspannungen während okklusaler Belastung im gingivalen Verbinderbereich der Brücken auftreten, führten die Vorschädigungen an dieser Lokalisation offenbar nicht zu einer Spannungskonzentration, die ausreichte, um als Frakturursprung zu wirken.

Die Ergebnisse der Weibull-Analyse zeigen sowohl für die gealterten als auch für die nicht gealterten Brücken eine Reduktion des Weibullmoduls m von 8,0 auf 6,2 bzw. von 7,2 auf 5,4 infolge der Schädigung. Durch die Vorschädigung hat somit die Streuung der Bruchlastwerte und damit die Bandbreite der möglichen rissauslösenden Gefügefehler zugenommen. Somit steigt die Wahrscheinlichkeit des Versagens bei kleineren Belastungen. Dieses korreliert mit einer geringeren Zuverlässigkeit der Restaurationen unter klinischen Bedingungen. Eine solche Abnahme des Weibullmoduls wurde auch bei der Oberflächenbearbeitung von Zirkoniumdioxidkeramiken mit groben, diamantierten Schleifinstrumenten festgestellt [5, 15].

Im Gegensatz zur Vorschädigung bewirkte die Erhöhung der Lastspielzahl bei der mechanischen Wechselbelastung eine Steigerung des Weibullmoduls, wobei jedoch die Belastbarkeit der Restaurationen im Vergleich zur Kontrollgruppe erheblich abnahm. Eine mögliche Erklärung könnte die bei Zirkoniumdioxid auftretende Phasentransformationsverstärkung liefern. Während der mechanischen Wechselbelastung kommt es ausgehend von Gefügedefekten zu einem langsamen, unterkritischen Risswachstum. Die entstehenden Spannungen an den Risspitzen lö-

of cycles led to a further decrease in load-bearing capacity. Drummond also established a similar pattern of behaviour when storing zirconia test pieces in water only [6].

In addition to studying the effect of thermal and mechanical cycling, the present study also examined the influence of preliminary mechanical damage on the load-bearing capacity of the bridges. No significant effect on load-bearing capacity was observed, however, neither with the restorations subjected to artificial aging nor with those not subjected to artificial aging. In contrast, other authors who studied this aspect reported a significant reduction in fracture resistance where there had been preliminary mechanical damage [15]. Basically, mechanical preparation of ceramic can cause two different phenomena. On the one hand, surface preparation induces compressive stresses which increase the strength of zirconia [14]. On the other hand, preparation causes cracks which produce unwanted stress concentrations and a reduction in strength if the cracks exceed the depth of the grinding-induced surface compressive layer [25]. One explanation why preliminary damage has no effect in the present study could be that the size of the scratch was only 180 µm wide and 60 µm deep. The damage was also produced using water cooling and had rounded inner edges due to the saw blade geometry, which is regarded as more favourable with respect to any stresses that may occur. Though the greatest tensile stresses occur in the gingival region of the connectors during occlusal loading, preliminary damage in this area apparently did not produce sufficient stress concentration to become the origin of a fracture.

Weibull analysis revealed a reduction in modulus m from 8.0 to 6.2 and 7.2 to 5.4 as a result of preliminary damage both for bridges subjected to artificial aging and those not subjected to artificial aging. The dispersion of breaking-load values and consequently the range of possible defects that could initiate cracks had increased as a result of preliminary damage, increasing the likelihood of failure with smaller loads. This correlates with reduced reliability of restorations under clinical conditions. A similar reduction in the Weibull modulus was also established with preparation of zirconia ceramic surfaces using coarse, diamond-coated rotary instruments [5, 15].

Marginal integrity was analysed in this study using the replica technique. This method is widely credited with excellent reliability and accurate reproducibility as well as sound validity. No clear standards have been defined as yet either for the terminology of the measurements or reference points in individual measurements. Definitions vary greatly in the literature and make it difficult to assess or compare the various studies on accuracy of fit. Definition of measurements in the present study are based on Holmes et al.; the terminology they developed is both clear and practical [10] (Fig. 4). A large number of studies on measurement of the marginal gap are also based on this article and can therefore be used for comparing the results.

It was established that the majority of values found for individual measurements with zirconia four-unit bridges in the literature were much smaller than those found in this study. Tinschert et al. reported values of 58.8 µm and 48.0 µm for the horizontal discrepancy and vertical discrepancy, respectively [28]. Measurements for the marginal discrepancy vary between 38.3 µm and 113.4 µm [13, 19, 28], those for the marginal gap between 20.0 µm and 83.5 µm [19, 28]. If results are to be clas-

Verblendung Veneering	x (µm) horizontal discrepancy			y (µm) vertical discrepancy			z (µm) marginal discrepancy			w (µm) marginal gap			u (µm) internal gap		
	MW	SD	p	MW	SD	p	MW	SD	p	MW	SD	p	MW	SD	p
unverblendet unveneered	116,3	31,1	0,388	114,5	32,1	0,033	189,3	10,5	0,052	130,7	13,0	0,031	93	10	0,127
verblendet veneered	108,1	49,7		137,6	43,4		201,7	15,8		142,7	22,8		100	16	

Tabelle 4 Ergebnisse für die verschiedenen Randspalt-Parameter in µm (MW: Mittelwert, SD: Standardabweichung, p: Irrtumswahrscheinlichkeit). Farblich markierte Wertepaare einer Messstrecke unterscheiden sich statistisch signifikant.

Table 4 Results for different marginal gap parameters in µm (MW: mean, SD: standard deviation, p: probability of error). Highlighted pairs of variates of one section of measurements differ significantly statistically.

sen eine Transformation des Zirkoniumdioxides von der tetragonalen in die monokline Modifikation aus und das Risswachstum wird gestoppt. Diese Ausheilung der Defekte verringert die Bandbreite der rissauslösenden Fehlstellen, was wiederum zu einer Zunahme des Weibullmoduls führt. Mit zunehmender Zyklenzahl schreitet dieser Effekt weiter voran. Der gesteigerte Gehalt an monokliner Kristallphase bewirkt jedoch gleichzeitig eine Abnahme der Festigkeit. In der Literatur finden sich derzeit keine Quellen, die sich mit den Auswirkungen unterschiedlicher Wechselbelastungsparameter auf den Weibullmodul beschäftigen.

Die Analyse der Randschlussqualität wurde in der vorliegenden Studie mit Hilfe einer Replika-Technik vorgenommen. Dieser Methode wird weithin eine gute Reliabilität und Wiederholgenauigkeit sowie eine gute Validität bestätigt. Sowohl für die Terminologie der Messstrecken als auch für die Referenzpunkte bei den einzelnen Messungen wurden bisher keine eindeutigen Standards definiert. In der Literatur variieren die Definitionen stark und erschweren so eine Beurteilung oder vergleichende Betrachtung der verschiedenen Studien zur Passgenauigkeit. Die Definition der Messstrecken in der vorliegenden Untersuchung erfolgte in Anlehnung an *Holmes et al.*, die von ihnen entwickelte Terminologie ist übersichtlich und zugleich praktikabel [10] (Abb. 4). Eine Vielzahl von Studien zu Randspaltmessungen orientiert sich zudem ebenfalls an *Holmes et al.* und kann so zu Messwertvergleichen herangezogen werden.

Es zeigt sich, dass die in der Literatur für die einzelnen Messstrecken bei viergliedrigen Brücken aus Zirkoniumdioxid zu findenden Werte zumeist deutlich kleiner sind als die hier gefundenen. Für die *horizontal discrepancy* und die *vertical discrepancy* geben *Tinschert et al.* Werte von 58,8 µm bzw. 48,0 µm an [28]. Die Angaben für die *marginal discrepancy* variieren zwischen 38,3 µm und 113,4 µm [13, 19, 28], die für den *marginal gap* zwischen 20,0 µm und 83,5 µm [19, 28]. Legt man die Bewertung von *Moldovan et al.* zu Grunde, die einen Wert für den *marginal gap* im Bereich von 100 µm als gut und im Bereich von 200 µm

sifiziert based on the evaluation of *Moldovan et al.*, who considered a *marginal gap* of 100 µm as good and of 200 µm to 300 µm as acceptable [17], then the size of the cement gap in this study can be assessed as good or acceptable in the majority of cases, though on average the crowns were over-contoured and too short.

Scanning the initial clinical situation, transferring the geometrical data to and processing them in the computer, as well as the accuracy of the milling process and adequate compensation of subsequent sintering shrinkage are crucial for fabricating accurately fitting restorations. The digitization and milling procedure seems to have the biggest influence on the accuracy of fit [22]. The problem with subtractive fabrication is the different preparation direction of the milling cutters (CAD/CAM system) and preparation instruments (dentist). As the fitting surface of the restoration is prepared from the apical aspect and therefore the milling instruments rotate in the opposite direction to the tooth preparation, the "oversized" cutters are unable to produce an accurately fitting negative of the prepared, clinically relevant tooth shape. Therefore, with small milling radii the result could be that the insides of the crowns are concave with the horizontal gap being increased and the crown over-contoured [20].

When veneering zirconia frameworks specially matched porcelains are used, which have a lower coefficient of thermal expansion than the framework material in a similar way to metal bonded restorations. Compressive stresses are therefore created in the veneering porcelain during cooling after firing. These stresses can cause deformation of zirconia frameworks and therefore alter the marginal integrity. The maximum difference of values measured in this study before and after veneering was 23.1 µm and was therefore within the acceptable tolerance range of 30 µm. Though changes were significant in the case of individual measurements, it is not anticipated that differences of this size will have any effect clinically.

bis 300 µm als akzeptabel erachten [17], so ist die Zementspaltgröße der Ankerkronen in der vorliegenden Untersuchung als größtenteils gut bzw. akzeptabel zu beurteilen, wobei die Kronen jedoch im Mittel überkonturiert und zu kurz waren.

Für die Herstellung passgenauer Restaurationen haben sowohl die Erfassung der klinischen Ausgangssituation und deren Übertragung und Bearbeitung im Computer als auch die Genauigkeit des Fräsprozesses und die anschließende Sinterschrumpfung eine große Bedeutung. Den größten Einfluss auf die Passungsgenauigkeiten scheint dabei der Digitalisierungs- und Fräsprozess zu haben [22]. Die Problematik bei den subtraktiven Fertigungsverfahren liegt in der unterschiedlichen Bearbeitungsrichtung von Fräser (CAD/CAM-System) und Präparationsinstrument (Zahnarzt). Da die Innenform der Restauration von „apikal“ gefertigt wird und somit die Fräserwerkzeuge in umgekehrter Richtung zur Stumpfpräparation arbeiten, sind die zudem „überdimensionierten“ Fräser nicht in der Lage, ein passgenaues Negativ der präparierten, medizinisch sinnvollen Zahnstumpfform zu fertigen. Dies kann bei kleinen Fräsradien dazu führen, dass die Kronen auf der Innenseite hohl liegen und die horizontale Spaltbreite vergrößert bzw. die Krone überkonturiert ist [20].

Bei der Verblendung von Zirkoniumdioxidgerüsten werden speziell angepasste Keramiken verwendet, die ähnlich den metallkeramischen Restaurationen einen niedrigeren Wärmeausdehnungskoeffizienten als das Gerüstmaterial aufweisen. Somit entwickeln sich beim Abkühlvorgang im Anschluss an die Sinterbrände Druckspannungen im Bereich der Verblendkeramik. Diese Spannungen können zu einer möglichen Deformation der Zirkoniumdioxidgerüste und somit zu einer Veränderung der Randschlussqualität führen. Die in der vorliegenden Untersuchung ermittelte maximale Differenz der Messwerte vor und nach Verblendung betrug 23,1 µm und liegt damit in dem in der Literatur als vertretbar geltenden Toleranzbereich von 30 µm. Auch wenn die Veränderungen bei einzelnen Messstrecken signifikant waren, sind klinische Auswirkungen bei Differenzen in dieser Größenordnung nicht zu erwarten.

5 Schlussfolgerungen

Die Simulation der Alterung von Zirkoniumdioxidbrücken unter In-vitro-Bedingungen bewirkte eine signifikante Abnahme der Belastbarkeit. *In vivo* ist eine solche Degradation der mechanischen Eigenschaften ebenfalls zu erwarten. Die untersuchten Restaurationen zeigen jedoch auch nach der Alterung noch eine ausreichende Festigkeit für den Einsatz im Seitenzahnbereich. Eine mechanische Vorschädigung hatte unter den gewählten Bedingungen keinen Einfluss auf die Belastbarkeit, doch sollte sie im Rahmen des zahntechnischen Herstellungsprozesses möglichst verhindert werden. Gerade die gewählte Lokalisation im basalen Bereich der interdentalen Konnektoren ist kritisch, da es hier bei Kaubelastungen zum Auftreten von Spannungsspitzen kommt. Die Randschlussqualität als weiteres Kriterium für den langfristigen Erfolg festsitzender Restaurationen sollte mit Blick auf die vorliegenden Ergebnisse weiter verbessert werden. Der Einfluss des Verblendvorgangs auf die Randschlussqualität scheint hingegen gering zu sein. Auch wenn die Veränderungen bei einzelnen Messstrecken statistisch signifikant waren, so bewegten sich die absoluten Größen der Änderungen dennoch in einem unter klinischen Gesichtspunkten akzeptablen Bereich. DZZ

5 Conclusions

Simulated aging of zirconia bridges under in-vitro conditions significantly reduced the load-bearing capacity. This type of degradation of the mechanical properties can also be expected *in vivo*. The restorations in the study, however, exhibited adequate strength for use in the posterior region, even after aging. Preliminary mechanical damage did not have any effect on the load-bearing capacity under the selected conditions, but should be prevented as far as possible during fabrication in the dental laboratory. The selected location in the basal region of the interdental connectors was particularly critical, as stress peaks occur in this region during masticatory loading. Based on the present results, the marginal integrity should be further improved, as it is an additional criterion for the long-term success of fixed restorations. On the other hand, the veneering procedure seemed to have little influence on marginal fit. Though changes due to veneering were statistically significant for two parameters, the absolute amount of changes remained within a clinically acceptable range. DZZ

Korrespondenzadresse

Dr. Philipp Kohorst
Medizinische Hochschule Hannover
Klinik für Zahnärztliche Prothetik und
Biomedizinische Werkstoffkunde
Carl-Neuberg-Straße 1
30625 Hannover
Tel.: 05 11 / 5 32 47 98
Fax: 05 11 / 5 32 47 90
E-Mail: Kohorst.Philipp@mh-hannover.de

Literatur

- Addison O, Fleming GJ, Marquis PM: The effect of thermocycling on the strength of porcelain laminate veneer (PLV) materials. *Dent Mater* 19, 291 (2003)
- Bridger DV, Nicholls JI: Distortion of ceramometal fixed partial dentures during the firing cycle. *J Prosthet Dent* 45, 507 (1981)
- Buchanan W T, Svare CW, Turner KA: The effect of repeated firings and strength on marginal distortion in two ceramometal systems. *J Prosthet Dent* 45, 502 (1981)
- Curtis AR, Wright AJ, Fleming GJ: The influence of simulated masticatory loading regimes on the bi-axial flexure strength and reliability of a Y-TZP dental ceramic. *J Dent* 34, 317 (2005)
- Curtis AR, Wright AJ, Fleming GJ: The influence of surface modification techniques on the performance of a Y-TZP dental ceramic. *J Dent* 34, 195 (2006)
- Drummond JL: In vitro aging of yttria stabilized zirconia. *J Am Ceram Soc* 72, 675 (1989)
- Felton DA, Kanoy BE, Bayne SC, Wirthman GP: Effect of in vivo crown margin discrepancies on periodontal health. *J Prosthet Dent* 65, 357 (1991)
- Gemalmaz D, Alkumru HN: Marginal fit changes during porcelain firing cycles. *J Prosthet Dent* 73, 49 (1995)
- Guo X: Property degradation of tetragonal zirconia induced by low-temperature defect reaction with water molecules. *Chem Mater* 16, 3988 (2004)
- Holmes JR, Bayne SC, Holland GA, Sulik WD: Considerations in measurement of marginal fit. *J Prosthet Dent* 62, 405 (1989)
- Koh Y-H, Kong Y-M, Kim S, Kim H-E: Improved low-temperature environmental degradation of yttria-stabilized tetragonal zirconia polycrystals by surface encapsulation. *J Am Ceram Soc* 82, 1456 (1999)
- Kohorst P, Herzog TJ, Borchers L, Stiesch-Scholz M: Load-bearing capacity of all-ceramic posterior four-unit fixed partial dentures with different zirconia frameworks. *Eur J Oral Sci* 115, 161 (2007)
- Komine F, Gerdts T, Witkowski S, Strub JR: Influence of framework configuration on the marginal adaptation of zirconium dioxide ceramic anterior four-unit frameworks. *Acta Odontol Scand* 63, 361 (2005)
- Kosmac T, Oblak C, Jevnikar P, Funduk N, Marion L: The effect of surface grinding and sandblasting on flexural strength and reliability of Y-TZP zirconia ceramic. *Dent Mater* 15, 426 (1999)
- Luthardt RG, Holzhüter M, Sandkuhl O, Herold V, Schnapp JD, Kuhlisch E, Walter M: Reliability and properties of ground Y-TZP-zirconia ceramics. *J Dent Res* 81, 487 (2002)
- Manicone PF, Iommetti PR, Raffaelli L: An overview of zirconia ceramics: basic properties and clinical applications. *J Dent* 35, 819 (2007)
- Moldovan O, Rudolph H, Quaas S, Bornemann G, Luthardt RG: Interne und externe Passgenauigkeit CAM-gefertigter Zirkonoxidbrücken – Eine Pilotstudie. *Dtsch Zahnärztl Z* 61, 38 (2006)
- Oh W, Gotzen N, Anusavice KJ: Influence of connector design on fracture probability of ceramic fixed-partial dentures. *J Dent Res* 81, 623 (2002)
- Piwowarczyk A, Lauer H-C: Determining the marginal fit of CAD/CAM bridge frameworks. *J Dent Res* 85 (Spec Iss A), Abstract 0254 (2006)
- Quaas S, Weber A, Luthardt RG: Die Anwendung dentaler CAD/CAM-Verfahren in der Praxis. *ZWR* 113, 504 (2006)
- Rosentritt M, Behr M, Gebhard R, Handel G: Influence of stress simulation parameters on the fracture strength of all-ceramic fixed-partial dentures. *Dent Mater* 22, 176 (2006)
- Rudolph H, Schöne C, Luthardt RG: Einfluss der Digitalisierung auf die erreichbare Präzision CAD/CAM-gefertigter zahnmedizinischer Restaurationen. *Dtsch Zahnärztl Z* 59, 73 (2004)
- Schindler HJ, Stengel E, Spiess WE: Feedback control during mastication of solid food textures – a clinical-experimental study. *J Prosthet Dent* 80, 330 (1998)
- Schneemann P, Borchers L, Stiesch-Scholz M: Belastbarkeit 4-gliedriger Seitenzahnbrücken aus Vollkeramik. *ZWR* 114, 28 (2005)
- Sindel J, Petschelt A, Grellner F, Dierken C, Greil P: Evaluation of subsurface damage in CAD/CAM machined dental ceramics. *J Mater Sci-Mater Med* 9, 291 (1998)
- Stuart AR, Filser F, Kocher P, Gauckler LJ: In vitro lifetime of dental ceramics under cyclic loading in water. *Biomaterials* 28, 2695 (2007)
- Sundh A, Molin M, Sjogren G: Fracture resistance of yttrium oxide partially-stabilized zirconia all-ceramic bridges after veneering and mechanical fatigue testing. *Dent Mater* 21, 476 (2005)
- Tinschert J, Natt G, Mautsch W, Spiekermann H, Anusavice KJ: Marginal fit of alumina- and zirconia-based fixed partial dentures produced by a CAD/CAM system. *Oper Dent* 26, 367 (2001)