

Aus der Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik  
der Universität Würzburg

Direktor: Prof. Dr. med. dent. Marc Schmitter

**Beschreibung der mechanischen Kennwerte in verschiedenen  
Schichten von Multilayer-Zirkoniumdioxidkeramiken für die  
frästechnische Herstellung**

Inauguraldissertation

zur Erlangung der Doktorwürde der

Medizinischen Fakultät

der

Julius-Maximilians-Universität Würzburg

vorgelegt von

Anna-Lisa Odenthal

aus Oldenburg

Würzburg, März 2022

Version nach 1. Überarbeitung, Juni 2022

Referent bzw. Referentin: Prof. Dr. med. dent. Marc Schmitter  
Korreferent bzw. Korreferentin: Prof. Dr. med. dent. Yvonne Jockel-Schneider  
Dekan: Prof. Dr. med. Matthias Frosch

Tag der mündlichen Prüfung: 13.10.2022

Die Promovendin ist Zahnärztin

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG UND PROBLEMSTELLUNG.....</b>	<b>1</b>
1.1	DENTALKERAMIKEN.....	2
1.2	ZIRKONIUMDIOXIDKERAMIK .....	5
1.3	SINTERPROZESS ZIRKONIUMDIOXIDKERAMIK .....	18
1.4	PRÜFVERFAHREN.....	21
1.4.1	Dichte .....	21
1.4.2	Biegefestigkeit .....	22
1.4.3	Härte.....	25
1.4.4	Energiedispersive Röntgenspektroskopie (EDX) .....	26
<b>2</b>	<b>MATERIAL UND METHODEN.....</b>	<b>28</b>
2.1	MATERIALIEN.....	28
2.1.1	Probenherstellung.....	29
2.1.2	Alterung .....	35
2.2	METHODEN.....	36
2.2.1	Dichte .....	37
2.2.2	Biaxiale Biegefestigkeit .....	38
2.2.3	Härte.....	40
2.2.4	EDX .....	42
2.2.5	Statistische Auswertung.....	45
<b>3</b>	<b>ERGEBNISSE.....</b>	<b>46</b>
3.1	IPS E.MAX ZIRCAD PRIME .....	46
3.1.1	Dichte .....	46
3.1.2	Biaxiale Biegefestigkeit .....	48
3.1.3	Härte.....	52
3.1.4	EDX .....	54
3.2	OPTIMILL MULTILAYER 3D.....	56
3.2.1	Dichte .....	56
3.2.2	Biaxiale Biegefestigkeit .....	58
3.2.3	Härte.....	62
3.2.4	EDX .....	64
3.3	CERAMILL ZOLID FX MULTILAYER .....	65
3.3.1	Dichte .....	65
3.3.2	Biaxiale Biegefestigkeit .....	67
3.3.3	Härte.....	71
3.3.4	EDX .....	73

3.4	VERGLEICH DER MATERIALIEN .....	74
3.4.1	Vergleich der Dichte .....	74
3.4.2	Vergleich der biaxialen Biegefestigkeit .....	75
3.4.3	Vergleich der Härte .....	77
<b>4</b>	<b>DISKUSSION .....</b>	<b>78</b>
4.1	METHODENDISKUSSION.....	78
4.2	ERGEBNISDISKUSSION .....	80
<b>5</b>	<b>SCHLUSSFOLGERUNG .....</b>	<b>92</b>
<b>6</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG.....</b>	<b>94</b>
<b>7</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS .....</b>	<b>96</b>
<b>I</b>	<b>ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS.....</b>	
<b>II</b>	<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....</b>	
<b>III</b>	<b>TABELLENVERZEICHNIS .....</b>	
	<b>ANHANG.....</b>	
<b>IV</b>	<b>DANKSAGUNG .....</b>	
<b>V</b>	<b>LEBENS LAUF .....</b>	
<b>VI</b>	<b>EIGENE VERÖFFENTLICHUNGEN .....</b>	

### 1 Einleitung und Problemstellung

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird in dieser Dissertation die Sprachform des generischen Maskulinums angewendet. Es wird an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass die ausschließliche Verwendung der männlichen Form geschlechtsunabhängig verstanden werden soll.

Der Werkstoff Zirkoniumdioxidkeramik kann in der modernen Zahnheilkunde zur Herstellung vieler Restaurationen verwendet werden. Die Indikationen reichen von Einzelzahnkronen bis hin zu weitspannigen Brückenkonstruktionen. Auch im Bereich der dentalen Implantologie gibt es immer mehr Entwicklungen, um das Material neben dem prothetischen Indikationsbereich auch im chirurgischen etablieren zu können [1, 2]. Neben funktionellen spielen auch ästhetische Faktoren eine entscheidende Rolle, wobei Multilayer-Zirkoniumdioxidkeramiken eine Weiterentwicklung zur Herstellung keramischer Restaurationen darstellen. Diese Multilayer-Zirkoniumdioxidkeramiken zeichnen sich durch einen integrierten Transluzenz- und Farbverlauf aus. In Anlehnung an den natürlichen Zahn wird die Restaurationen hierdurch im inzisalen Bereich heller und transluzenter als in Richtung des Zahnhalses gefertigt [3, 4]. Das bietet die Möglichkeit, die ästhetischen Eigenschaften des natürlichen Zahnes bestmöglich zu imitieren. Dies erspart dem Zahntechniker außerdem viel Aufwand und bietet dem Patienten ein sehr natürliches und ästhetisches Ergebnis. Zudem kann die Restauration monolithisch gefertigt werden, wodurch die Gefahr eines Chippings reduziert wird [5]. Der Farbverlauf kann auf unterschiedliche Weisen erzeugt werden. Sowohl der Yttriumoxidgehalt, als auch Farbzusätze können hierbei eine entscheidende Rolle spielen [3, 6]. Obgleich einige Hersteller angeben, dass die transluzentere, inzisale Schicht die geringsten mechanischen Eigenschaften aufweist, ist noch nicht geklärt, inwiefern die unterschiedliche Zusammensetzung der Schichten Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften haben. Diese Veränderung der Bruchzähigkeit mit dem Farbverlauf kann das jeweilige Indikationsspektrum beeinflussen. [3, 7]. Allerdings stehen die mechanischen Kennwerte häufig nicht zur Verfügung.

Auch die jeweiligen Schichten unterscheiden sich zwischen den verschiedenen Herstellern. Es stehen Multilayer-Zirkoniumdioxidkeramik-Rohlinge mit drei bis sechs Schichten zur Verfügung [8]. Aus diesem Grund ist es notwendig, mehrere Multilayer-

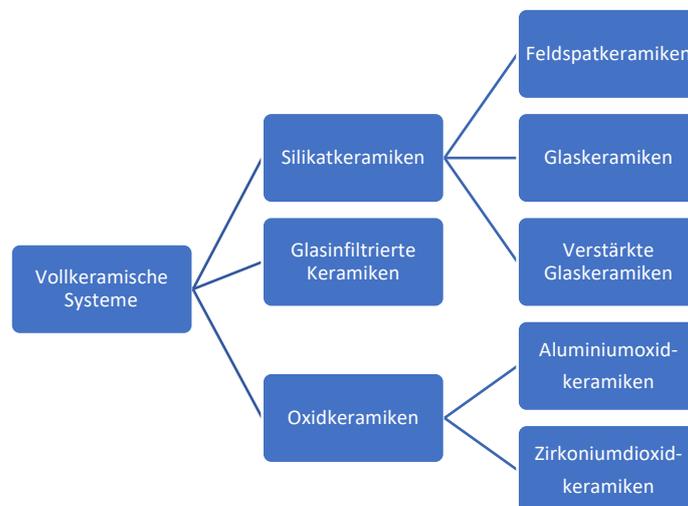
Zirkoniumdioxidkeramiken zu untersuchen, um einen Überblick über die allgemeinen Zusammenhänge zwischen dem Farbverlauf und den mechanischen Eigenschaften zu bekommen. Hierzu liegen bis heute wenige Studien vor [8].

Deshalb wurden in der vorliegenden Arbeit jeweils festgelegte Schichten aus drei Multilayer-Zirkoniumdioxidkeramiken verschiedener Hersteller herausgetrennt und auf mechanische Kennwerte getestet. Untersucht wurden Dichte, biaxiale Biegefestigkeit und Härte. Zusätzlich wurde eine Elektrodipersive Röntgenspektroskopie (EDX) durchgeführt, um einen Aufschluss über die Zusammensetzung der Elemente zu erhalten. So kann für drei Hersteller ein Zusammenhang zwischen dem Farbverlauf und den mechanischen Eigenschaften beschrieben werden.

### 1.1 Dentalkeramiken

Dentalkeramiken stellen aufgrund ihrer guten Biokompatibilität, hohen Ästhetik und guten mechanischen Dentalkeramiken Eigenschaften [9] eine evidenzbasierte Alternative zu metallbasierten Restaurationen dar [10]. Auch das breite Indikationsspektrum, welches von Inlays über mehrgliedrige Brücken im Seitenzahnbereich bis hin zu dem Einsatz bei Implantaten reicht, hat der Dentalkeramik dazu verholfen, sich als Zahnersatzmaterial immer weiter durchzusetzen [11-13].

Grundsätzlich lassen sich die Dentalkeramiken, entsprechend Abbildung 1, in drei unterschiedliche Gruppen unterteilen: Die Silikatkeramiken, die glasinfiltrierten Keramiken und die Oxidkeramiken.



**Abbildung 1: Einteilung der Dentalkeramiken**

*(selbst erstellte Abbildung)*

Da es keine Empfehlung für ein einziges universelles Keramikmaterial gibt [12, 14], sondern die unterschiedlichen Gruppen jeweils spezielle Indikationen haben, werden die Eigenschaften der Gruppen im Folgenden kurz beschrieben.

### Silikatkeramiken

Silikatkeramiken bestehen zum Großteil aus einer amorphen Glasphase. Sowohl die Feldspatkeramiken als auch die Glaskeramiken zählen zu dieser Gruppe der ästhetischen Silikatkeramiken. Sie unterscheiden sich primär in ihrem Ausgangsprodukt. Ausgangsprodukt der Feldspatkeramiken ist gemahlene Feldspatglas in Pulverform, wohingegen Glas das Ausgangsprodukt der Glaskeramiken ist. Dieses Glas wird einem Kristallisationsprozess unterzogen [15]. Kristalleinlagerungen führen zu einer Steigerung der Festigkeit. Aufgrund der Glas- und Kristallanteile zählen sie zu den zweiphasigen Werkstoffen [16].

Die Feldspatkeramiken bestehen aus den drei Hauptkomponenten Kaolin, Quarz und Kalifeldspat [16]. Kalifeldspatanteil bildet während des Sinterns (weitere) Leuzitkristalle in der Keramik. Durch die Kristalleinlagerung weist das Material, je nach Leuzitgehalt, verbesserte mechanische Eigenschaften auf [16, 17]. Die Feldspatkeramik besitzen den größten Glasanteil, was zu einer guten Ästhetik führt. Jedoch weisen sie auch die geringste Festigkeit auf und erreichen meistens nur Festigkeitswerte bis zu 100 MPa (im 4 Punkt-Biegeversuch) [18]. In einer von Zscherlich et al. durchgeführten Studie erreichte die Feldspat-Keramik VM13 (VITA Zahnfabrik; Bad Säckingen, Deutschland) im 3-Punkt-Biegeversuch eine mittlere Biegefestigkeit von ca. 90 MPa [19]. Das Indikationsspektrum von Feldspatkeramiken beschränkt sich deshalb vor allem auf Verblendungen von Gerüsten [18].

Aufgabe der Kristalleinlagerung in der Glasphase ist neben der Festigkeitssteigerung auch die Standfestigkeit beim Brennen und die farbliche Anpassung der Restauration [20]. Zudem trägt die Kristalleinlagerung dazu bei, dass der Wärmeausdehnungskoeffizient (WAK), insbesondere bei Feldspatkeramiken, angepasst werden kann [20, 21]. Durch die Kristalleinlagerung können zum Beispiel Lithiumdisilikat-Keramiken erzeugt werden [17]. Zunächst bestehen die Glaskeramiken nur aus einer Glasphase, in welcher nachträglich Kristalle mithilfe von kontrollierter Wärmebehandlung eingebettet werden [15]. Hierdurch wird zwar das Indikationsspektrum erweitert, dieses ist jedoch im Vergleich zu hochfesten Keramiken

## Einleitung und Problemstellung

weiterhin eingeschränkt [22]. Innerhalb der Untergruppen der Silikatkeramiken resultieren auf Grund unterschiedlicher Kristalleinlagerungen verschiedene Festigkeitswerte. Lithiumdisilikat-Keramiken erreichen Festigkeitswerte im Bereich von 306-480 MPa [21]. Sie sind somit biegefestere als die Feldspatkeramiken, deren Festigkeiten in der Literatur variieren, aber deutlich darunter liegen [20, 21]. So gaben Strub et al. [20] für leuzitverstärkte Keramiken eine Festigkeit von ca. 120 MPa an. Zhang und Kelly [21] nennen für die Feldspatkeramik Vita Mark II (Vita Zahnfabrik; Bad Säckingen, Deutschland) eine Festigkeit von 122 MPa. Im Allgemeinen weisen Glaskeramiken gute optische Eigenschaften auf. Durch den „Chamäleon-Effekt“ passt sich die Restauration an die Umgebungsfarbe, z.B. die der Nachbarzähne, an [1, 18, 23].

### Glasinfiltrierte Keramiken

Genau wie die Silikatkeramiken sind auch die glasinfiltrierten Keramiken zweiphasig, bestehend aus einer amorphen Glasphase und einer kristallinen Phase. Ihr Gerüst besteht zunächst aus sehr feinkörnigen Oxiden, in der Zahnheilkunde sind das z.B. Aluminiumoxid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), Aluminiumoxid/Zirkoniumdioxid ( $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ ) oder Spinell ( $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ ) [24-26]. Diese wurden vorgesintert, um eine gewisse Stabilität zu erreichen. In diesem Zustand sind sie kreideähnlich mit großen Poren. Anschließend wird über mehrere Stunden bei ca. 1100 °C das fließende Lanthansilikatglas infiltriert. Dieses wandert durch Kapillarkräfte in die Zwischenräume ein. Dieser Infiltrationsbrand führt zur endgültigen Festigkeit von ca. 400-550 MPa. Zusätze wie Zirkoniumdioxid können die Festigkeit auf bis zu 700 MPa erhöhen [21, 27]. Glasinfiltrierte Keramiken wurden zur Fertigung von Gerüsten von Einzelzahnkronen und Brücken verwendet. Mittlerweile sind sie größtenteils von der polykristallinen Zirkoniumdioxidkeramik abgelöst worden [18].

### Oxidkeramiken

Die dritte Gruppe der Dentalkeramiken, die Oxidkeramiken, bestehen aus einem rein kristallinen Gefüge. Dieses einphasige Gefüge setzt sich je nach Keramik entweder vor allem aus  $\text{Al}_2\text{O}_3$  oder aus Zirkoniumdioxid zusammen. Heute wird in der Zahnmedizin fast ausschließlich die Zirkoniumdioxidkeramik verwendet [18]. Für die Bruchfestigkeit dieser Gruppe sind auch die kovalenten Bindungen verantwortlich, welche sehr stark sind [18]. Bis zu einem bestimmten Punkt, welcher materialabhängig ist, sind diese

Werkstoffe sehr belastbar auf Druckspannung. Bei dem Überschreiten der Elastizitätsgrenze tritt eine andere Materialeigenschaft in den Vordergrund: die Sprödigkeit. Aus diesem Grund reagieren sie empfindlich auf Zug- und Biegebelastung [18]. Im Gegensatz zu metallischen Werkstoffen kommt es bei allen keramischen Werkstoffen nicht zu einer Verformung bei Belastung, sondern ab einem bestimmten Wert zum Bruch. Aufgrund ihrer mechanischen Festigkeit ist das Indikationsspektrum der Oxidkeramiken gegenüber den zuvor genannten Keramiken vergrößert. Sie können als Gerüstwerkstoff dienen oder monolithisch für Kronen und Brücken im Seitenzahnbereich verwendet werden. Weiter Indikationsspektren sind Doppelkronen. Besonders die Primärteile können ohne Probleme aus Zirkoniumdioxidkeramik hergestellt werden [28]. Auch Abutments lassen sich aus Oxidkeramiken herstellen [29] und zeigten sich in Studien als geeignetes Material [30, 31]. Mit der gesteigerten Festigkeit in dieser Keramikgruppe geht jedoch auch ein Verlust der guten optischen Eigenschaften einher. Das Material wirkt sehr opak, vermag kaum Licht zu leiten und ist somit nicht in der Lage, ein naturgetreues ästhetisches Ergebnis zu erzielen [23, 27, 32]. Die Zirkoniumdioxidkeramik wird sowohl von Zahnärzten als auch den Zahntechnikern in zunehmendem Maße genutzt. Aus diesem Grund gab es in den letzten Jahren vor allem im Bereich dieses Werkstoffs einige Weiterentwicklungen. Um eine ästhetisch anspruchsvollere und vielseitigere Anwendung des Materials zu ermöglichen, wurden in den letzten Jahren unterschiedliche Generationen von Zirkoniumdioxidkeramiken entwickelt und sogenannten Multilayer-Rohlinge am Markt etabliert. Somit ist die Zirkoniumdioxidkeramik heutzutage unter anderem auch für ästhetisch anspruchsvollere Indikationen als monolithischer Zahnersatz, auch im Frontzahnbereich, geeignet [3].

### **1.2 Zirkoniumdioxidkeramik**

Im Allgemeinen findet Zirkoniumdioxidkeramik, welche zu der Gruppe der Oxidkeramiken zählt, neben der Zahnheilkunde auch in anderen Bereichen Anwendung. Aufgrund der guten Biokompatibilität wird Zirkoniumdioxidkeramik als Material für Hüft- und Knieprothesen verwendet [33]. Einen weiteren Anwendungsbereich hat das Material in Festoxidbrennstoffzellen [33, 34]. Ziel dieser ist es, elektrische Energie aus chemischer Energie zu gewinnen. Hierzu wird ein Material benötigt, welches Sauerstoffionen leiten kann und den hohen Temperaturen in der Brennstoffzelle

## Einleitung und Problemstellung

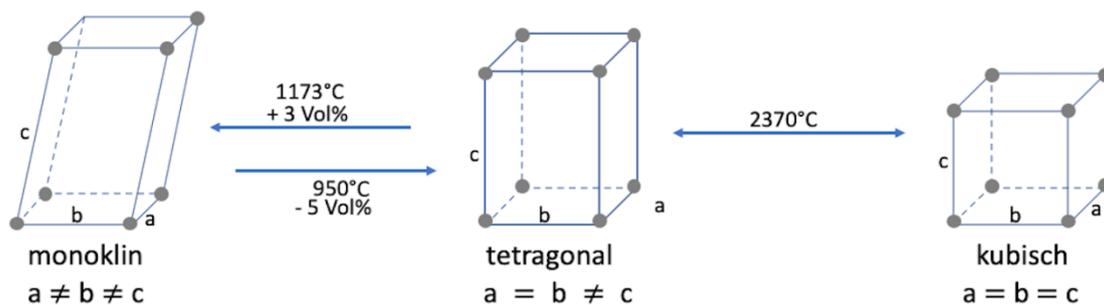
standhält. Aufgrund dieser besonderen Leitfähigkeit wird der Werkstoff auch für die Lambdasonden verwendet [33]. Lambdasonden sind Messgeräte im Automobilbereich. Im Abgas messen sie als Sauerstoffsensoren den Sauerstoffgehalt, welcher als elektrisches Signal weitergeleitet wird [34, 35]. Auch als Schneidewerkzeug ist das Material geeignet. Zum einen wegen seiner Härte und der Verschleißbeständigkeit und zum anderen wegen der elektrischen Isolation und Korrosionsbeständigkeit findet Zirkoniumdioxidkeramik als Schneidewerkzeug in unterschiedlichen Industrien Anwendung. Einige Beispiele sind die Holzbearbeitungs-, die Automobil- oder die Lebensmittelherstellungsindustrie. Als Pulver kommt Zirkoniumdioxid aufgrund seiner mechanischen Eigenschaften als Schleifmittel zur Anwendung. In Lacken beigemischt verbessert Zirkoniumdioxid-Pulver die Kratzfestigkeit der lackierten Oberflächen (z.B. Möbellacke) [33].

Das Zirkoniumdioxid, welches in der Zahnmedizin verwendet wird, entspricht nicht dem Material Zirkonium. Während das Zirkonium ein weiches, biegsames Metall ist, wird über einen aufwendigen Herstellungsprozess aus Zirkonsand das Oxid des Metalls, das harte Zirkoniumdioxid, gewonnen [36-38]. Einen sehr großen Einfluss auf diesen Stellenwert hat zum einen die hohe Biegefestigkeit des Materials, welches als Zirkoniumdioxidkeramik ein breites Indikationsspektrum, bis hin zu mehrgliedrigen Seitenzahnbrücken, Abutments oder enossalen Implantaten, aufweist [1, 2, 39-41].

Zum anderen kommen neben den mechanischen Eigenschaften die gute biologische Verträglichkeit hinzu. Das metallfreie Material Zirkoniumdioxidkeramik kann im durchgesinterten Zustand nicht zu Korrosionen führen [42]. Ein weiterer Aspekt der Biokompatibilität ist, dass die Bakterienadhäsion nicht größer als bei Titan ist [43]. Dementsprechend kommt Zirkoniumdioxidkeramik auch als Abutmentmaterial in Frage, wobei das Risiko einer Periimplantitis reduziert und der Langzeiterfolg somit unterstützt werden kann [43-45]. Patienten empfinden zudem die geringe Wärmeleitfähigkeit als sehr angenehm, da ein Zahn schon bei geringen Wärmedifferenzen sehr schmerzempfindlich reagieren kann [46]. Als thermischer Isolator führt das Material zu einer ausgeglichenen Temperaturverteilung [47]. Die Wärmeleitfähigkeit von Zirkoniumdioxidkeramik, welches in der tetragonalen Phase stabilisiert ist (TZP), liegt ungefähr bei 2 W/mK (bei 100 °C) [47]. Bei Aluminiumoxidkeramiken beträgt diese im Vergleich ca. 10-30 W/mK [48], die von Gold 297 W/mK und die von Dentin 0,99-

1,87 W/mK [39, 49, 50]. Im Gegensatz zu Restaurationen bestehend aus Metall schont eine Versorgung aus Zirkoniumdioxidkeramik somit den Zahnnerve [51]. Die geringere Wärmeleitfähigkeit im Gegensatz zu Metall wird durch die Zusammensetzung und Mikrostruktur der Keramik bedingt [18].

Charakteristisch für den Werkstoff Zirkoniumdioxidkeramik ist die temperaturabhängige Phasenumwandlung, welche in Abbildung 2 schematisch dargestellt ist. Die Schmelztemperatur von Zirkoniumdioxidkeramik liegt bei 2680 °C [38]. Bei sehr hohen Temperaturen, welche aber noch keine Schmelze herbeiführen, hat das Gefüge eine kubische Phase. Weiteres Abkühlen führt ab 2370 °C zu einer Umwandlung in die tetragonale Phase, welche bis zu einer Temperatur von etwa 1200 °C erhalten bleibt. Ab 1173 °C kommt es zu einer erneuten Phasenumwandlung, welche auch als t/m-Umwandlung bezeichnet wird. Während dieser Umwandlung ändert sich das tetragonale Kristallgefüge in ein monoklines Kristallgefüge um. Diese Umwandlung geht mit einer 3-5 % Volumenzunahme einher. Umgekehrt zeigt sich bei Temperaturerhöhung jedoch schon ab 950 °C die Umwandlung von der monoklinen in die tetragonale Phase [52, 53].



**Abbildung 2: Phasenumwandlung**

*(selbst erstellte Abbildung)*

### Transformationsverfestigung

Ein entscheidender Faktor für die Festigkeit des Materials ist das Wissen über die Phasenumwandlung und die Zugabe von Stabilisatoren, welche die Phasenumwandlung beeinflussen können. Durch deren Zugabe ist es möglich, die tetragonale oder kubische Phase bei niedrigen Temperaturen zu stabilisieren. Je nach beigemengter Menge kann die tetragonale oder die kubische Phase auch bei Raumtemperatur vorliegen. Solche Stabilisatoren sind zum Beispiel Magnesiumoxid (MgO), Calciumoxid (CaO),

## Einleitung und Problemstellung

Yttriumoxid ( $Y_2O_3$ ), Cer-, Ytterbium- oder Titan-Oxide [54]. Die Umwandlung von der tetragonalen in die monokline Phase erzeugt eine Volumenzunahme, welche zu unerwünschten Rissen in dem Material führen kann. Diese Eigenschaft kann jedoch auch positiv genutzt werden, im Sinne der sog. „Umwandlungsverstärkung“ [53].

Obwohl  $Y_2O_3$  der bekannteste Stabilisator ist, gibt es neben ihm noch weitere, wie zum Beispiel CaO oder MgO. Sie unterscheiden sich in der Mikrostruktur, welche sie durch ihre Zugabe in der Zirkoniumdioxidkeramik erzeugen. Bei Verwendung von CaO oder Magnesiumoxid entstehen nach dem Sintern beim Abkühlen kleine tetragonale Bereiche in der monoklinen Phase. Wird jedoch  $Y_2O_3$  zur Stabilisierung genutzt, können vollständig tetragonale Materialien gesintert werden. Je nach  $Y_2O_3$ -Gehalt sind jedoch immer mehrere Varianten möglich. So kann z.B. auch eine tetragonale Phase mit kubischen Bereichen vorliegen oder auch ein Material mit vollständig kubischer Phase. Durch den Zusatz wird Druck auf die Körner ausgeübt, welcher die Umwandlung beim Überschreiten der t/m-Transformationstemperatur verhindert [52]. Dieser Zustand wird auch als metastabil bezeichnet. 3-5 Mol-%  $Y_2O_3$  führen dazu, dass die tetragonale Phase beim Abkühlen auf Raumtemperatur weiterhin vorliegt und sich ab 1170 °C nicht in die monokline Phase umwandelt [52, 55].

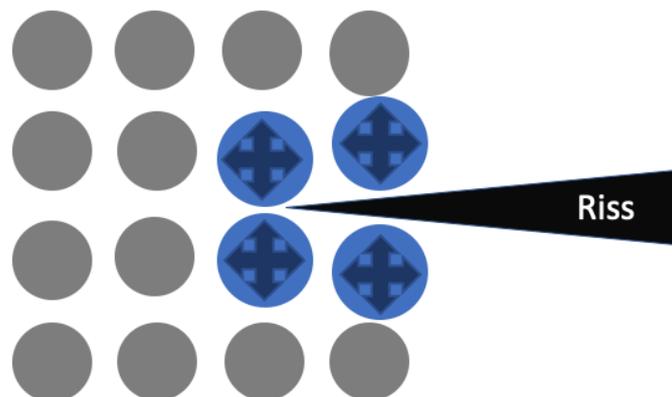
Aus der durch das Yttriumoxid bedingten Stabilisierung ergibt sich die genaue Bezeichnung der Zirkoniumdioxidkeramik. Die Kennzeichnung der verschiedenen Generationen erfolgt hauptsächlich über deren Mol-%-Anteil des  $Y_2O_3$ . Die ersten beiden Generationen sind jeweils mit 3 Mol-%  $Y_2O_3$  dotiert, die dritte mit 5 Mol-%  $Y_2O_3$  und die vierte mit 4 Mol-%  $Y_2O_3$  [36, 37]. Die Bezeichnung TZP bedeutet tetragonal zirconia polycrystals. Das bedeutet, dass die tetragonale Phase, welche eigentlich nur bis zu 1170°C vorliegt, stabilisiert wurde und somit auch bei Raumtemperaturen vorliegt. Daraus ergeben sich folgende Bezeichnungen: 3Y-TZP, 5Y-TZP, 4Y-TZP. Zudem werden die Abkürzungen FSZ für fully stabilized Zirconia und PSZ für partially stabilized Zirconia genutzt. Bei FSZ handelt es sich um vollstabilisierte polykristalline Zirkoniumdioxidkeramik, welches bei Raumtemperatur in der kubischen Phase vorliegt. Das PSZ hingegen ist eine teilstabilisierte polykristalline Zirkoniumdioxidkeramik, welches bei gleicher Temperatur kubische und tetragonale Anteile hat [55].

Um die Bezeichnung der Zirkoniumdioxidkeramiken für das folgende Verständnis der Generationen zu verdeutlichen, folgendes Beispiel:

## Einleitung und Problemstellung

„3Y-TZP-ZrO<sub>2</sub>“ bedeutet, es handelt sich um eine mit 3 Mol-% Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> stabilisierte, tetragonale, polykristalline Zirkoniumdioxidkeramik. Dies ist klassischerweise der Werkstoff der Gerüst-Keramiken [56].

Durch die Stabilisierung wird das Material unter eine Vorspannung gesetzt. Die t/m-Umwandlung kann sowohl durch eine Temperaturabnahme erfolgen oder aber auch durch einen Riss induziert werden. Wenn sich das Material in dem oben genannten metastabilen Zustand befindet, bleibt es in der tetragonalen Phase, solange es nicht durch einen mechanischen Faktor (z.B. einen Riss) zur Umwandlung angeregt wird. Dieser Effekt wird zum Vorteil genutzt und als die sog. Transformationsverfestigung bezeichnet. Tritt nun ein Riss im Material auf, wird die Keramik unter Zugspannung gesetzt. Zug entsteht dort, wo der Riss auftritt und das Keramikgefüge auseinanderzieht. Diese induziert die Phasenumwandlung und die kleinere tetragonale Kristallform wandelt sich um in die ca. 3-5 Vol-% größere monokline Form (s. Abbildung 3). Durch die hervorgerufene Größenzunahme im Rissbereich kommt es daraufhin zu einer Druckspannung innerhalb des Materials, welche den Riss zusammendrängt und somit die weitere Rissausbreitung hemmt oder sogar stoppt [36, 37, 57].



**Abbildung 3: Schema der Transformationsverfestigung**

*(selbst erstellte Abbildung)*

Das Prinzip der Transformationsverfestigung erhöht die mechanischen Kennwerte der Zirkoniumdioxidkeramik. Mit einer durchschnittlichen Biegefestigkeiten von über 1000 MPa (1.Generation, 3 Mol-% Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) bei der Biegeprüfung und einer Vickershärte

## Einleitung und Problemstellung

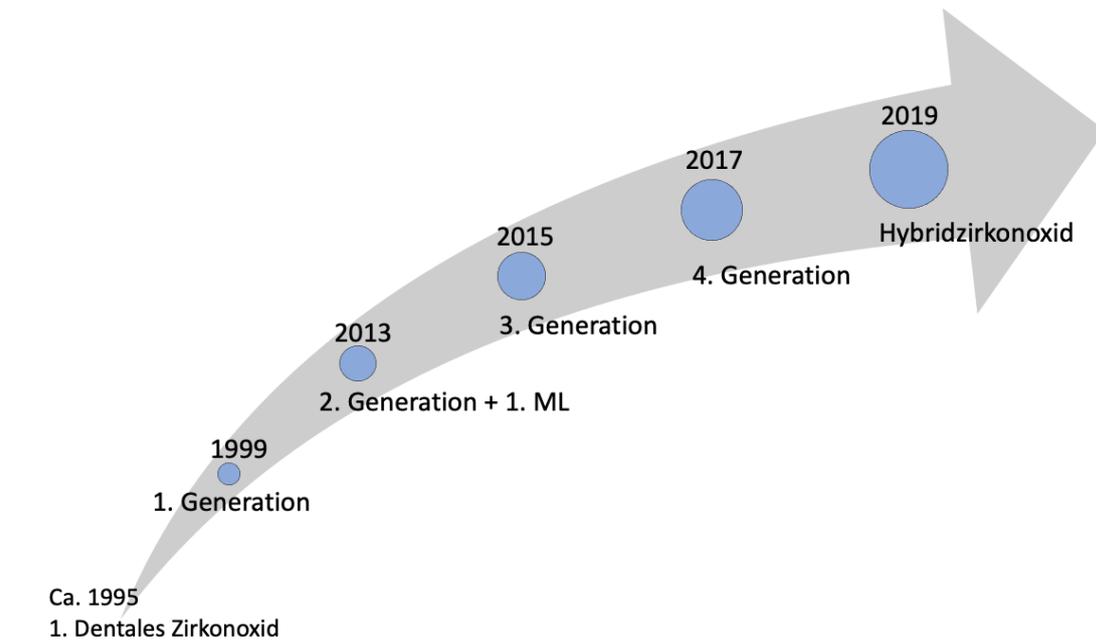
(HV) von über 1440 wird es zu Recht als „Hochleistungs-Keramik“ bezeichnet [21, 36, 37, 58, 59].

Im Anwendungsbereich der Zahnmedizin geht der Wunsch, ein ästhetischeres Ergebnis zu erlangen zum Teil mit der Erhöhung des  $Y_2O_3$ -Gehalts einher. Bei einem größeren  $Y_2O_3$ -Anteil bildet sich, in Abhängigkeit von der zugegebenen Menge  $Y_2O_3$ , neben der tetragonalen auch die kubische Phase aus. Das Material gewinnt dadurch an Transluzenz, die Eigenschaft der Phasenumwandlung an auftretenden Rissflanken sinkt jedoch proportional mit der Menge an metastabiler tetragonaler Phase [36, 37].

### Generationen

Die Entwicklung der Zirkoniumdioxidkeramiken hat verschiedene Stadien durchlaufen welche in Abbildung 4 dargestellt sind. Das Ziel war stets, eine gute Ästhetik mit einer ausreichenden Belastbarkeit zu vereinbaren. Diese Kombination sollte für den Patienten ein möglichst optimales Ergebnis erzeugen. Seit über 15 Jahren gilt Zirkoniumdioxidkeramik in der Zahntechnik als etabliertes Material [36, 37]. Besonders in der Zeit von 2009 bis 2015 wurde es durch Veränderung der  $Y_2O_3$ -Zusätze und den Brennzyklen stets weiterentwickelt, um ein endgültig zufriedenstellendes Material zu schaffen [60, 61]. Es war üblich, ein belastbares, aber opakes Gerüst mit einer optisch ansprechenderen Glaskeramik zu verblenden. Dieser zusätzliche Arbeitsschritt kostet jedoch Zeit, Geld und birgt die Gefahr des Chippings (Abplatzen der Keramikverblendung) [62]. Es wurde versucht, das Problem des Chippings auf mehrere Arten zu verringern. Neben den CAD/CAM-gefertigten Verblendungen, welche die Gestaltungsmöglichkeiten optimierten und somit Spannungen zwischen dem Gerüst und der Verblendung verringerten, gab es auch Bemühungen, ein monolithisches Material zu entwickeln, welches keiner weiteren Verblendung mehr bedarf [63].

Mit diesem Ziel wurden die Anteile der einzelnen Bestandteile der Zirkoniumdioxidkeramik (v.a. des  $Y_2O_3$  und des  $Al_2O_3$ ) über die Jahre verändert und es entstanden unterschiedliche Abwandlungen der Keramik, welche auch als „Generationen“ bezeichnet werden.



**Abbildung 4: Entwicklung der Zirkoniumdioxidkeramiken**

(selbst erstellte Abbildung, Informationen für die Abb. 4 aus [8])

Die erste Generation von Zirkoniumdioxidkeramiken trägt die Bezeichnung 3Y-TZP-A [36, 61]. Das Material ist neben  $Y_2O_3$  zusätzlich mit 0,25 Gew-%  $Al_2O_3$  dotiert, welches den Sinterprozess beschleunigen soll. Es lagert sich an den Korngrenzen an, wodurch ein weiteres Kornwachstum behindert wird. Somit entstehen viele kleine Körner, woraus ein feineres Gefüge resultiert. Vorteil ist, dass die mechanischen Eigenschaften steigen. Das durch  $Al_2O_3$  bedingte feinkörnige Gefüge, bricht das einfallende Licht stärker, wodurch das Material sehr opak wirkt. Die Transmission liegt bei 23 % (priti multidisc  $ZrO_2$  A2 Opaque, 1 mm dicker Prüfkörper). In einer Studie von Strawarczyk et al. wurden die Transluzenzen der drei Zirkoniumdioxidkeramik-Generationen mit denen von zwei Lithiumdisilikatkeramiken verglichen [37]. Auch die folgenden Werte für die Transmissionen der weiteren Generationen beziehen sich auf diese Studie, in der 1 mm hohe Probenkörper unter standardisierten Bedingungen untersucht wurden [36, 37, 61, 64]. Bei der biaxialen Biegeprüfung werden für die erste Generation Werte bis zu 1200 MPa erreicht und die Bruchzähigkeit liegt ungefähr bei  $5 MPa\sqrt{m}$  [8]. Das Indikationsspektrum reicht somit bis hin zu monolithisch gefrästen, mehrgliedrigen Brückenversorgungen [65].

## Einleitung und Problemstellung

3Y-TZP-NA und 3Y-TZP-LA (NA= kein  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , LA= wenig  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) stellen die zweite Generation dar. Ziel war es, die opaken Eigenschaften zu verringern. Wenn weniger Grenzflächen in einem Material vorhanden sind, kann das Licht nicht so stark gebrochen werden [61]. Aus diesem Grund wurde bei der zweiten Generation ein vermehrtes Kornwachstum angestrebt. Dieses resultiert aus weniger Zusätzen von  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (0,05 Gew-%), vergrößerten Sintertemperaturen und längeren Haltezeiten bei bestimmten Temperaturen. Nachteilig sind jedoch die verringerten mechanischen Festigkeiten, die aus größeren Körnern resultieren. Die biaxiale Biegeprüfung erzielte Werte um die 950 MPa. Bei den Keramiken dieser Generation liegt die Transmission bei 29 % (priti multidisc  $\text{ZrO}_2$  A2 Translucent, 1mm dicker Prüfkörper). Sie stehen den Standard-3Y-TZP-Keramiken in puncto Festigkeit jedoch noch immer nach und zeigen eine geringere Biegefestigkeit [6, 8, 61]. Laut der DIN EN Norm 6872 kann man mit dieser Generation, trotz geringerer Biegefestigkeit, noch dieselben Restaurationen wie mit der ersten Generation herstellen [65]. In einer Studie von Koenig et al. [66] wurde das klinische Verhalten von Restaurationen der zweiten Generation untersucht. Es zeigten sich gute Überlebens- (93,3 %) und Erfolgsraten (81,8 %) nach einem Jahr. Die Autoren beschrieben, dass 80 % der Fälle mit einem katastrophalen Versagen, bei Patienten in Zusammenhang mit Bruxismus festgestellt wurden. Laut Koenig et al. ist die Zirkoniumdioxidkeramik der zweiten Generation in funktioneller, ästhetischer und biologischer Hinsicht im Seitenzahnbereich gut einsetzbar, es sollte jedoch mit Bedacht eingesetzt werden [66].

Die dritte Generation, 5Y-TZP, ist seit 2015 auf dem Markt [67]. Sie wurde anstatt mit 3 Mol-% mit 5 Mol-%  $\text{Y}_2\text{O}_3$  stabilisiert, ein  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Anteil blieb mit 0,05 Gew-% erhalten [8]. Der erhöhte Zusatz  $\text{Y}_2\text{O}_3$  führt dazu, dass sich das Gefüge im Verhältnis 1:1 aus tetragonalen und kubischen Kristallen zusammensetzt. Da die kubischen Kristalle größer sind, wird genau wie bei der zweiten Generation das Licht weniger stark gestreut. Dazu kommt, dass das Licht durch den geometrisch gleichmäßigen kubischen Kristall (s. Abbildung 2) isotrop gestreut wird [68]. Auch hier sind die Festigkeitswerte im Gegensatz zur ersten Generation reduziert und liegen bei 550 MPa in der biaxiale Biegeprüfung und einer Bruchzähigkeit von ca.  $3 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ . Die Transmission hingegen nähert sich mit ca. 33 % (priti multidisc  $\text{ZrO}_2$  A2 High Translucent, 1 mm dicker Prüfkörper) denen der Silikatkeramiken an. Diese liegt z.B. für IPS e.max CAD LT A2

(Ivoclar Vivadent GmbH, Schaan, Liechtenstein) bei 44 % und IPS e.max CAD HT A2 (Ivoclar Vivadent GmbH, Schaan, Liechtenstein) bei 54 % (1 mm dicker Prüfkörper) [6, 8, 61].

Nordahl et al. konnten in einer Studie feststellen, dass die Bruchlastwerte der zweiten und dritten Generation keine erheblichen Unterschiede zeigten, in der Gegenüberstellung mit Lithiumdisilikatkeramik jedoch jeweils sehr viel belastbarer sind. Sie testeten die Keramiken alle nach einer Alterung von 5.000 Zyklen (5 °/55 °) und in unterschiedlichen Schichtstärken (Zirkoniumdioxidkeramikronen: 0,3 mm, 0,5 mm, 0,7 mm, 1 mm, 1,5 mm; Lithiumdisilikatkeramik-Kronen: 1 mm, 1,5 mm). Somit war ein Ergebnis dieser Studie, dass die Bruchfestigkeit vom hochtransluzenten Material geringer ist als die des weniger Transluzenten [69].

Andere Autoren vermerkten jedoch eine abnehmende Festigkeit von der zweiten Generation hin zur dritten Generation (s. Tabelle 1) [70]. Die Keramiken der dritten Generation eignen sich für die Herstellung von Kronen und bis zu dreigliedrigen Brücken. Im Vergleich zu der vorherigen Generation ist das Indikationsspektrum eingeschränkter [37, 65]. Die Ästhetik jedoch übertrifft die der anderen Generationen [71].

Generation Vier ist ein 4Y-TZP bei der die kubische Phase zu einem Viertel vorliegt. Der  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Anteil wurde seit der zweiten Generation nicht geändert und liegt somit auch hier bei 0,05 Gew-% (Savic, 2019). Als mechanische Kennwerte sind Werte von 800 MPa in der biaxialen Biegeprüfung festgestellt worden und eine Bruchzähigkeit von  $4,5 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  [8]. Vorhergehende Studien zeigten, dass es eine Abnahme der Bruchzähigkeit von der ersten bis hin zur vierten Generation gibt, was vor allem an dem erhöhten Gehalt an  $\text{Y}_2\text{O}_3$ , einem geringeren Gehalt an  $\text{Al}_2\text{O}_3$  und größeren Körnern im Gefüge liegen kann [72]. Im Vergleich zu der vorhergehenden dritten Generation steigt die Festigkeit wieder an. Im selben Zug kommt es zu einer Abnahme der Ästhetik [71]. Mit ihnen können laut der DIN EN Norm 6872 weitspannige Brückenversorgungen hergestellt werden [65]. Zum Teil wird jedoch auch empfohlen sich aufgrund der, im Gegensatz zum 3Y-TZP, verringerten Biegefestigkeit auf die Herstellung von bis zu dreigliedrigen Restaurationen zu beschränken [71].

**Tabelle 1: Generationen der Zirkoniumdioxidkeramiken im Überblick**

Informationen für die Tabelle 1 aus [67, 70, 72]

	1. Generation	2. Generation	3. Generation	4. Generation
Gefüge-zusammensetzung	polykristallin, tetragonal	polykristallin, tetragonal	polykristallin, kubisch (50 %), tetragonal (50 %)	polykristallin, kubisch (25 %), tetragonal (75 %)
Mol% Yttriumoxid	3	3	5	4
Festigkeit	ca. 1.000-1.200 MPa	ca. 900-1.000 MPa	ca. 500-650 MPa	ca. 800-950 MPa
Ästhetik	opak	transluzent	Höchste Transluzenz	transluzent
Beispiel	ZENO ZR	DD Bio ZX <sup>2</sup>	Katana Zirconia HT	Ceramill Zoild HT+

Da es trotz der Weiterentwicklung über die vier oben genannten Zirkoniumdioxidkeramik-Generationen schwierig ist, eine Keramik mit ausreichender Bruchfestigkeit und guten optischen Eigenschaften zu entwickeln, stellte Zhang eine weitere Möglichkeit vor [68]. Diese beruht vor allem auf der Überlegung, dass die tetragonalen Kristalle eine starke Doppelbrechung haben und unterschiedliche Brechungsindices die Streuung negativ beeinflussen. Sie gingen also von dem biegefesten 3Y-TZP der ersten Generation aus und überlegten, wie sie die Transluzenz verbessern konnten. Ein Ergebnis Ihrer Untersuchungen war, dass ein 3Y-TZP mit nahezu keinen Einschlüssen (z.B. Poren oder  $Al_2O_3$ ) und kleiner Korngröße von unter 100 nm ein funktionell und ästhetisch gutes Ergebnis lieferten. Als Beispiel für die eine solche Keramik wird in der Studie von Zhang Bruxzir (Glidewell; Newport Beach, USA) genannt [68].

### Multilayer-Zirkoniumdioxidkeramik

Naturgegeben gibt es Varianzen und einen Verlauf der Zahnfarbe und der Transluzenz innerhalb eines Zahnes. In der Regel ist die Schneidekante oder der Okklusalbereich heller und weniger opak [73, 74]. Richtung Zahnhals ändert sich die Farbe, sie wird dunkler, opaquer und nimmt in der Regel eine gelbliche Note an. Durch die verschiedenen Farben, welche bei monolithischen Keramiken angeboten werden (z.B. die Vita

Farbskala), ist es möglich, eine Restaurationsfarbe zu wählen, welche dem natürlichen Zahn nahekommt. Jedoch muss eine einzige Farbe für das gesamte Farbspektrum des Zahns gewählt werden. Die ganzen spezifischen Eigenschaften des natürlichen Zahnes, wie die genannte Farbabstufung und die Transluzenz können bei den klassischen Keramikblöcken nur durch eine zusätzliche, nach dem Schleifvorgang durchgeführte farbliche Individualisierung realisiert werden. Somit kommt es vor, dass sich ein Unterschied zwischen dem echten Zahn und der Keramikrestauration erkennen lässt.

Die Frage, wie sowohl eine ausreichende mechanische Festigkeit als auch ein ästhetisches Ergebnis für den Patienten in einem keramischen Material vereinigt werden kann wird bereits lange thematisiert [75].

Mit der Einführung der Multilayer-Zirkoniumdioxidkeramiken sollte es eine Antwort auf diese Frage geben. Diese waren in dem Jahr 2013 zum ersten Mal auf dem Markt erhältlich [8].

Was zuvor nur mit Schichtkeramiken mit unterschiedlich eingefärbten Materialien oder Maltechniken möglich war, gestaltete sich mithilfe der Multilayer-Zirkoniumdioxidkeramiken einfacher. Sowohl der erhöhte Zeitaufwand als auch die Abhängigkeit von den Fähigkeiten des Zahntechnikers werden reduziert. Ein weiterer Vorteil sind die mechanischen Eigenschaften der Zirkoniumdioxidkeramik. Durch ihre höheren Festigkeiten im Vergleich zu der Glasskeramik [18, 76] haben sie ein breiteres Indikationsspektrum [65].

Multilayer-Zirkoniumdioxidkeramiken zeichnen sich durch einen integrierten Farbverlauf aus. Hinzu kommt, dass auch die Transluzenz an den natürlichen Zahn angepasst ist. Somit kann laut Herstellerangaben eine „High-End-Ästhetik“ erzielt werden [3, 4].

Bis jetzt gibt es wenig wissenschaftliche Publikationen zu den neuen Multilayer-Zirkoniumdioxidkeramiken.

Elsaka führte 2019 eine Studie durch, in welcher die optischen und mechanischen Eigenschaften monolithischer Keramiken verschiedener Hersteller miteinander verglichen wurden [76]. Eine dieser Zirkoniumdioxidkeramiken war ein Multilayer (Ceramill zolid fx Multilayer, Amann Girrbach, Pforzheim, Deutschland). Die anderen beiden waren herkömmliche monolithische Zirkoniumdioxidkeramiken (Zenostar T (Wieland Dental + Technik GmbH & Co. KG, Pforzheim, Deutschland), Prettau Anterior

(Zirkonzahn GmbH, Gais, Italien)). Bei der Multilayer-Zirkoniumdioxidkeramik sowie bei der Keramik von Prettau Anterior war die kubische Phase komplett stabilisiert, bei der dritten Keramik war diese nur teilweise stabilisiert. Aus dem Multilayerrohling wurde die oberste Schicht herausgetrennt, da diese optisch am ähnlichsten zu den beiden anderen Materialien war. Ein Ergebnis dieser Studie war, dass die mehrschichtige Keramik eine höhere Transluzenz hatte. Die mechanischen Kennwerte waren jedoch bei dem Material Zenostar T am vorteilhaftesten. In der Diskussion von Elsaka wurden mehrere Faktoren als Einfluss auf die Ergebnisse angeführt. Diese Faktoren waren zum Beispiel die Korngröße, die chemische Zusammensetzung oder aber der  $Y_2O_3$ -Zusatz, welcher bei dem Material Zenostar T mit 4,5-6 Mol-% geringer war als bei den beiden anderen Materialien [76].

Wie bei den Generationen der Zirkoniumdioxidkeramik bereits dargestellt, geht bei der genannten Studie von Elsaka ein erhöhter  $Y_2O_3$ -Anteil auch mit einer erhöhten Transluzenz und mit verringerten mechanischen Eigenschaften einher. Eine eindeutige Aussage für die mechanischen Eigenschaften eines gesamten Multilayer-Zirkoniumdioxidkeramik-Prüfkörper kann aus dieser Studie nicht gezogen werden, da nur unterschiedliche Schichten getestet wurde.

Bei einigen Multilayer-Keramiken ist nicht eindeutig beschrieben, auf welchem Weg sie den Farbverlauf in ihr Material einarbeiten konnten. Der Hersteller Ivoclar Vivadent (Schaan, Liechtenstein) gibt an, dass der Farbverlauf mit einer erhöhten Biegefestigkeit einhergeht. Dies lässt darauf schließen, dass die Zirkoniumdioxidkeramik im inzisalen Bereich mit mehr  $Y_2O_3$  dotiert wurde als im zervikalen Bereich [77].

Im Gegensatz dazu gibt Amann Girrbaach (Koblach, Österreich) nur an, dass ein natürliche Farbverlauf vorhanden ist [78].

Eine Methode, einen Zirkoniumdioxidkeramik-Multilayerblock herzustellen, wurde von Kim et al. beschrieben [79]. Laut ihnen besteht die Herstellung aus drei Mischungsschritten, einem Formpressschritt und der anschließenden Wärmebehandlung, dem Kalzinierungsschritt. Die Mischschritte bezeichnen die Vermengung von unterschiedlich dotiertem Zirkoniumdioxidkeramik-Pulver mit Bindemitteln. Je nach Schicht wird eine mehr oder weniger mit  $Y_2O_3$  dotierte Zirkoniumdioxidkeramik verwendet. Somit resultiert am Ende des Herstellungsprozesses ein Block aus Zirkoniumdioxidkeramik, in dem sich drei, in ihrer Zusammensetzung unterschiedliche,

## Einleitung und Problemstellung

Schichten befinden. Diese sind nach dem Formpressen und Sintern fest miteinander verbunden und aufgrund fließender Übergänge nicht deutlich voneinander abzugrenzen. Im ersten Schritt wird 3Y-TZP mit einem organischen Bindemittel gemischt. Das 3Y-TZP macht in diesem Schritt 93-99 Gew-% aus und das Bindemittel lediglich 0,1-7 Gew-% [79].

Die Bestandteile im zweiten Mischschritt sind 3Y-TZP (10-90 Gew-%), 5Y-TZP (3-89,9 Gew-%) und das organische Bindemittel (0,1-7 Gew-%) [79].

Im dritten Schritt wird nur 5Y-TZP (93-99,9 Gew-%) verwendet und erneut das organische Bindemittel beigemischt (0,1-7 Gew-%) [79].

Wie im vorherigen Abschnitt erwähnt, hat das 5Y-TZP bessere optische Eigenschaften als das 3Y-TZP. Somit kommt durch die drei oben genannten Mischschritte ein Block zustande, welcher von zervical nach inzisal an Transluzenz gewinnt [79].

Das verwendete organische Bindemittel sollte eine Komponente aus der folgenden Gruppe beinhalten: Polyvinylalkohol, Polyvinylpyridin, Polyethylenglykol. Zudem ist es wichtig, dass der Massenanteil innerhalb des Bereichs von 0,1-7 Gew-% bleibt, da bei einem geringeren Zusatz die Fähigkeit abnimmt, das 3Y-TZP zu binden. Mischt man zu viel Bindemittel hinzu, reicht der Anteil des 3Y-TZPs nicht aus, um ausreichende mechanische Eigenschaften zu gewährleisten.

Den Mischschritten folgt das sog. Formpressen. Die genaue Platzierung der einzelnen Schichten ist nicht festgelegt, sondern flexibel anpassbar. Eine Annäherung ist aber die Verteilung 1:8:1 innerhalb des gesamten Gemisches. Das formgepresste Produkt sollte im Anschluss eine Höhe zwischen 10 und 30 mm haben.

Durch den großen Spielraum bei der Massenverteilung, vor allem im zweiten Schritt, ist es möglich, die Farbe noch mehr zu individualisieren. Zudem ist es möglich, die drei Mischungen wiederum miteinander zu mischen, wodurch bis zu zehn verschiedene Abstufungen möglich sind [79].

Der anschließende Kalzinierungsschritt erfolgt bei 850-1050 °C im Elektroofen und führt dazu, dass der organische Binder verschwindet. Ergebnis dieses Herstellungsprozesses ist ein mehrschichtiger Zirkoniumdioxidkeramikblock [79].

Es ist möglich, diesen Block im Anschluss an die Wärmebehandlung mit einer Färbelösung noch weiter zu individualisieren. Dazu stehen einige Zusätze zur Verfügung.

Eisen(III)-Chlorid ( $\text{FeCl}_3$ ) bringt zum Beispiel eine gelbe Note auf das Material, Kupfer(II)-Chlorid ( $\text{CuCl}_2$ ) hingegen eine blaue [79].

In der vorliegenden Studie wurde zusätzlich zu der Testung der mechanischen Kennwerte eine EDX-Analyse durchgeführt, welche Aufschluss über die Elementzusammensetzung der Zirkoniumdioxidkeramik-Multilayer geben soll. Ziel war es, zu testen, ob der Farbverlauf durch eine Erhöhung des  $\text{Y}_2\text{O}_3$ -Anteils zustande gekommen ist, oder ob dem Material Farbstoffe hinzugefügt wurden.

### 1.3 Sinterprozess Zirkoniumdioxidkeramik

Nach erfolgreicher Präparation des Zahnes, welcher eine Restauration aus Zirkoniumdioxidkeramik erhalten soll, schließt sich eine Abformung an. Diese wird entweder konventionell oder bei dem Computer Aided Design/Computer Aided Manufacturing (CAD/CAM) Workflow mit einem Intraoralscanner genommen. CAD/CAM ist heutzutage ein etabliertes, digitales Verfahren zur Herstellung von Zahnersatz [80]. Prinzipiell besteht dieser Prozess aus drei Schritten. Der Abformung, der Gestaltung und der Herstellung der Restauration. Mit dem Intraoralscanner wird der präparierte Zahnstumpf digitalisiert. Im Labor kann im Anschluss ein Modell hergestellt werden, auf welches digital z.B. eine Krone designt wird. Nach digitaler Gestaltung und Individualisierung der Restauration wird diese gefräst [81].

Dem Fräsen von Zirkoniumdioxidkeramik schließt sich der Sinterprozess an.

Aufgrund der hohen Festigkeitswerte, die Oxidkeramiken erreichen, hat sich das Verfahren etabliert, das Material im sogenannten Weißlingszustand zu fräsen. Weißling bezeichnet den Zustand der Zirkoniumdioxidkeramik, nachdem es gepresst (Grünling) und vorgesintert wurde [55, 82]. Das Vorsintern erfolgt bei ca.  $1100\text{ °C}$  wodurch der Keramikkörper eine Dichte von ungefähr 55 % der theoretischen Dichte erreicht [42]. Auf diesem Weg soll es zu einer Reduktion der Verarbeitungszeit und des Verschleißes der Fräse kommen [83]. Die Restauration wird überdimensional gefräst, um die anschließende Sinterschrumpfung, die ca. 20-25 Vol-% beträgt, auszugleichen [82].

Laut Definition bezeichnet das Sintern „einen Vorgang, bei dem eine Verdichtung und Verfestigung der Rohlinge durch ein Aneinanderrücken der Rohstoffpartikel stattfindet“ [84]. Der fertige keramische Werkstoff mit seinen definitiven Materialeigenschaften entsteht somit erst während dieses Sintervorgangs [85].

## Einleitung und Problemstellung

Im Allgemeinen zeichnet sich das Sintern von Zirkoniumdioxidkeramik dadurch aus, dass sich das Gefüge verdichtet, indem die Poren zum großen Teil eliminiert werden. Im selben Zug resultiert die oben genannte Sinterschrumpfung von ca. 20-25 Vol-% [61]. Grundsätzlich kann das Sintern in zwei Verfahren unterschieden werden, die Festphasensinterung und die Flüssigphasensinterung [86]. Die Sintertemperatur liegt beim Festphasensintern unterhalb der Schmelztemperatur aller Komponenten. Die Sinterung, wie sie in kristallinen Phasen, wie z.B. Zirkoniumdioxidkeramiken, abläuft, zeichnet sich durch drei Phasen aus [86, 87]. Im sog. Frühbereich oder Anfangsstadium bilden sich Brücken zwischen den einzelnen Pulverteilchen aus. Fehler und Spannungen, welche während der vorherigen Bearbeitung entstanden sein können, werden somit minimiert [87]. Dieser Stofftransport geschieht vor allem durch Diffusionsprozesse, wobei auch Verdampfung und Kondensation eine untergeordnete Rolle spielen. Durch die ca. 5 %-ige Schrumpfung in diesem Stadium wird eine Reduktion der Oberflächenenergie erzeugt [86]. Es schließt sich der Hauptbereich des Sinterprozesses an, in welchem sich die Körner aneinander annähern, die Kristalle wachsen, die Brücken sich vergrößern und die Poren als Resultat dieser Vorgänge weitestgehend eliminiert werden [86]. Vor allem nahe der Korngrenzen werden die Poren effektiv eliminiert, da der Stofftransport nach außen notwendig ist und die Diffusionsgeschwindigkeit an den Korngrenzen größer ist als innerhalb der Körner [87]. Nach diesem Stadium hat das Material ca. 95 % seiner theoretischen Dichte erreicht [86]. Im Spätbereich oder Endstadium kommt es zum endgültigen Dichtsintern des Materials mit dem Ziel 100 % der theoretischen Dichte zu erreichen. In diesem Stadium liegen noch vereinzelt geschlossene Poren im Material vor. Ihr Inhalt kann entweder komplett nach außen oder in größere Poren diffundieren, wodurch es ggf. zum Riesenkornwachstum kommen kann [86]. Diese inhomogene Kornverteilung kann sich negativ auf die Eigenschaften des endgesinterten Materials auswirken. Spontane Umwandlungen der metastabilen, tetragonalen Phase in die monokline Phase können resultieren und somit das Material schwächen [85]. Im Gegensatz dazu kommt es bei der Flüssigphasensinterung zum Aufschmelzen mindestens einer Materialkomponente. Das Auftreten einer festen und einer flüssigen Phase kann zum Beispiel bei dem Sintern von Porzellan beobachtet werden [86, 87].

## Einleitung und Problemstellung

Obwohl jeder Zirkoniumdioxidkeramik-Hersteller unterschiedliche Sintervorgaben hat, zeigt sich grob ein ähnlicher Prozess, in dem zunächst die Restauration bei Raumtemperatur mittig in den Ofen platziert wird. Der Ofen heizt sich je nach Material linear bis zu einer bestimmten Temperatur auf (zwischen 1300 °C und 1600 °C) [18, 55]. Ist diese erreicht, wird die Temperatur für eine definierte Zeit gehalten. Einige Materialien (z.B. IPS e.max ZirCAD Prime (Ivoclar Vivadent GmbH; Schaan, Liechtenstein) oder Dentona Optimill multilayer 3D (Dentona AG; Dortmund, Deutschland) erfordern zusätzlich eine zweite Heizrate, in welcher die Temperatur erneut linear ansteigt und gehalten wird. Es folgt stets eine anschließende Abkühlungsphase, welche individuell vom Hersteller vorgegeben wird [7, 77, 88, 89].

Der Sinterprozess der unterschiedlichen Zirkoniumdioxidkeramiken ist materialabhängig. Eine Übersicht über die in dieser Studie verwendeten Sinterprozesse findet sich in Tabelle 3.

Der entscheidende Faktor, um ein optimales Gefüge zu erzielen, ist die thermische Energie. Diese hängt zum einen von der Sintertemperatur und zum anderen von der Befüllung des Ofens ab. Eine zu hohe Sintertemperatur führt zu einem vermehrten Kornwachstum, woraus wiederum eine größere Transluzenz resultiert [90]. Wenn das Gefüge aus größeren Körnern besteht, sind zugleich weniger Korngrenzen vorhanden, an denen das Licht brechen kann. Als Leitwert ist eine Transluzenzsteigerung von 3 % bei einer um 100 °C erhöhten Sintertemperatur angegeben [90]. Dahingegen führen zu geringe Temperaturen während des Sintervorgangs dazu, dass das Gefüge nicht optimal verdichtet wird und übermäßig viele Restporositäten zurückbleiben. An diesen wird das Licht verstärkt gebrochen, wodurch die Restauration opaker wird als gewünscht. Zudem ist es wichtig, den Ofenbesatz zu beachten. Wenn mehr Material dichtgesintert werden soll, braucht man ggf. einen längeren Sinterzyklus, um zu gewährleisten, dass alle Objekte im Ofen die optimale thermische Energie erfahren. Um Fehler wie diese zu vermeiden, sollten die Herstellerangaben zu dem Sinterprozess immer befolgt werden [61, 90].

Zusammenfassend zeigt sich, dass das Streben nach der theoretischen Dichte mit einer Verringerung der Porosität einhergeht und die Transluzenz verbessern kann. Gelenkt werden kann dieser Prozess über die Sintertemperatur und die Korngröße. Die theoretische Dichte von 3Y-TZP kann bei 1450-1500 °C Sintertemperatur annähernd

erreicht werden und die Lichtdurchlässigkeit für ca. 0,5 mm dicke Probenkörper beträgt 17-18 % [91]. Kleine Nanopartikel haben im Vergleich zu größeren Nanopartikeln einen positiven Einfluss auf die Verdichtung und die Durchlässigkeit des Lichts. Sind die Partikel klein (<300 nm), kann das einfallende Licht ohne Hindernisse das Material durchdringen, da sie kleiner sind als die Wellenlänge des sichtbaren Lichts. Diese liegt bei 390-780 nm [18]. Somit wäre es aus optischen Gründen am besten, wenn die Körner möglichst klein wären. Diese wachsen jedoch aufgrund des Sinterprozesses an. Sobald größere Partikel vorliegen, wird das Licht gebrochen und gestreut. Bei größeren Partikeln gilt, dass größere Körner aufgrund weniger Korngrenzen im Material ästhetischer wirken [90]. Zudem hat die Struktur der Kristallite einen weiteren Einfluss auf die Lichtdurchlässigkeit. Zirkoniumdioxidkeramik mit kubischen Kristallen hat z.B. eine höhere Transluzenz als mit monoklinen oder tetragonalen Kristallen. Dies liegt daran, dass das Licht aufgrund der isotropen Struktur gleichmäßiger verteilt wird, als wenn andere Phasen in der Keramik vorliegen [18].

### 1.4 Prüfverfahren

#### 1.4.1 Dichte

Zur Bestimmung der Dichte wählte man in diesem Versuch das archimedische Prinzip. Dieses Verfahren wurde bereits in vorherigen Studien verwendet. Mondal et al. stellten eine Dichte fest, welche im Rahmen von 93-95 % der theoretischen Dichte (6,10 g/cm<sup>3</sup>) von Zirkoniumdioxidkeramik lag [92]. Auch Inokoshi et al. untersuchten in einer Studie unter anderem die Dichte von 3Y-TZP mit dem archimedischen Prinzip. Die Keramik IPS e.max ZirCAD zeigte eine durchschnittliche Dichte von 6,03 g/cm<sup>3</sup> [93].

Die reine Berechnung der Dichte mittels der Formel:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1)$$

gestaltet sich aufgrund der Form und Dimensionierung der Probenkörper als schwierig. Hierbei ist m die Masse des Werkstoffes und V dessen Volumen. Die Schwierigkeit besteht darin, die Dichte von dem reinen Material zu erfassen. Sowohl die Masse als auch das Volumen muss in dieser Form der Dichtebestimmung anhand von Vermessungen oder Wiegen erfasst werden.

Hierbei kann jedoch nicht berücksichtigt werden, dass in Keramiken nach dem Sinterprozess immer Restporositäten zurückbleiben, welche die Dichte beeinflussen [94]. Bei der Verwendung von Mittelwerten entstünden so Verfälschungen der Ergebnisse. Zudem kann es bei der Vermessung der Proben zu Messfehlern kommen [95]. Durch die vorhergegangene Bearbeitung der Haltepins mit Fräsen und Steinchen kann es dazu kommen, dass der Probenkörper keinen einheitlichen Durchmesser hat, sondern kleine Ungleichmäßigkeiten der Dimensionierung aufweist. Um die Dichte der reinen Zirkoniumdioxidkeramik zu erfassen, wobei die Poren und Ungleichmäßigkeiten der äußeren Form beachtet werden, bietet sich somit die Dichtebestimmung nach dem archimedischen Prinzip an. Die detaillierte Beschreibung dieser Dichtebestimmung findet sich im Kapitel Dichte im Methodenabschnitt.

### 1.4.2 Biegefestigkeit

Laut DIN EN ISO 6872:2015-11 stehen zur Prüfung der Biegefestigkeit von dentalen Keramiken drei Verfahren zur Auswahl: Die Drei-Punkt-Biegeprüfung, die Vier-Punkt-Biegeprüfung und die biaxiale Biegeprüfung.

Für die Drei- und Vier-Punkt-Biegeprüfung werden Probenkörper mit einem rechteckigen Querschnitt und genormten Maßen (Breite:  $4 \pm 0,2$  mm, Dicke:  $2,1 \pm 1,1$  mm, Fase  $0,12 \pm 0,03$  mm) hergestellt. Die Prüfung selbst erfolgt mit einer Universalprüfmaschine.

Im Drei-Punkt-Biegeversuch liegt die Probe mittig auf zwei Auflagerrollen (in der Skizze Abbildung 5 grau dargestellt), bestehend aus gehärtetem Stahl. Alternativ kann ein anderer Werkstoff verwendet werden, insofern er einen vergleichbaren Härtewert hat. Von oben wirkt sich die Kraft über eine dritte Rolle, welche mittig zwischen den Auflagerrollen positioniert wird, auf den Probenkörper aus [65].

Der Vier-Punkt-Biegeversuch unterscheidet sich dadurch, dass statt einem Kraftangriffspunkt zwei vorhanden sind. Auch hier liegt die Probe auf zwei Rollen eines harten Materials (s. Drei-Punkt-Biegeversuch) [65]. In der Distanz von  $\frac{1}{4}$  der Strecke zwischen den Auflagerrollen werden jeweils die beiden von oben kommenden Rollen positioniert.

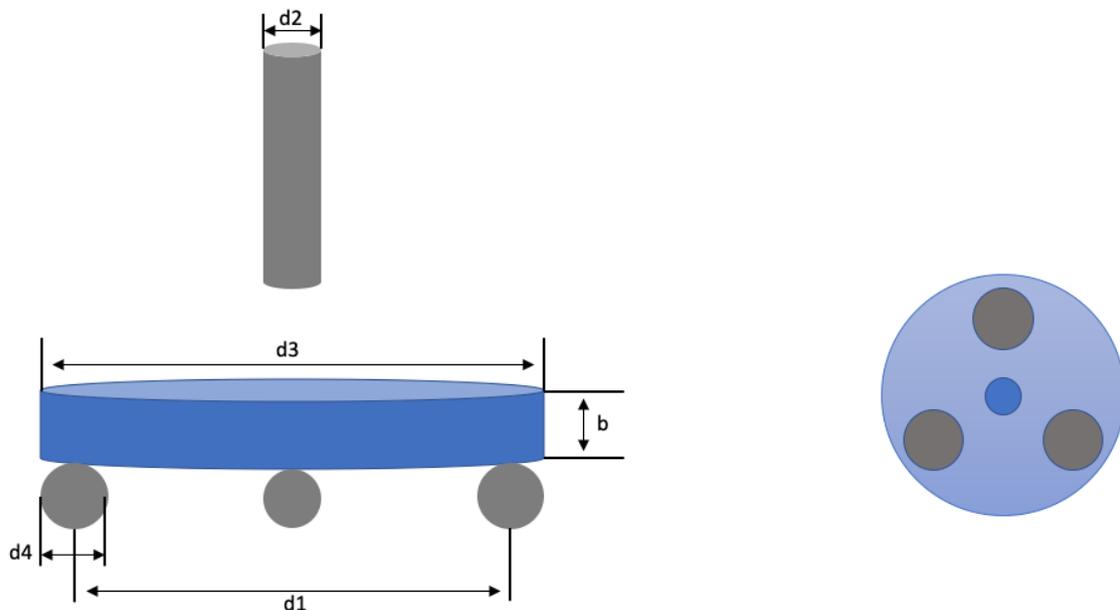
In Abbildung 5 ist der Vergleich der beiden Prüfungen dargestellt.

## Einleitung und Problemstellung



**Abbildung 5: Skizze vom 3-Punkt-Biegeversuch (links) und 4-Punkt-Biegeversuch (rechts)**  
(selbst erstellte Abbildung)

Im Gegensatz zu den beiden Prüfungen steht die biaxiale Biegeprüfung, bei der ein runder Probekörper hergestellt wird (s. Abbildung 6) [65]. Für eine ausreichende Abstützung liegt die Probe auf drei Stahlkugeln, welche in einem Kreis angeordnet sind. Die Winkel zwischen ihnen betragen  $120^\circ$  [65]. Mithilfe einer Universalprüfmaschine wird über einen Stempel mit dem Durchmesser  $1,4 \pm 0,2$  mm die Kraft mittig mit einer definierten Geschwindigkeit von 1 mm/s auf die Probe aufgebracht [65].



**Abbildung 6: Skizze der biaxialen Biegeprüfung**  
(Ansicht links: seitlich, Ansicht rechts: von oben; selbst erstellte Abbildung)

In der betrachteten Arbeit wird die biaxiale Biegeprüfung verwendet, da bei ihr die Kantendefekte, welche zum Beispiel durch den Sägevorgang hätten entstehen können, keinen Einfluss auf das Ergebnis haben [96]. Da im Drei- und Vier-Punkt-Biegeversuch

Balkenproben verwendet werden, kann es in diesen Fällen zu weniger aussagekräftigen Ergebnissen kommen, da hier Kantendefekte einen Einfluss haben können [75].

Studien zeigten, dass die Werte der biaxialen Biegeprüfung in der Regel zwischen denen des 3-Punkt-Biegeversuch (höhere Werte) und des Vier-Punkt-Biegeversuch (niedrigere Werte) liegen [97-99]. Ausschlaggebend für diese Feststellung ist, dass das belastete Volumen unterhalb der Krafterwirkung bei der 4-Punkt-Biegeprüfung größer ist als bei der 3-Punkt-Biegeprüfung [98]. Dadurch muss weniger Kraft verwendet werden, um den Bruch der Keramik zu verursachen. Durch die größeren Belastungsflächen bei dem 4-Punkt-Biegeversuch oder der biaxialen Biegeprüfung erhält man eine zuverlässigere Aussage über die Materialeigenschaften [100].

### Weibull-Modul

Aus den Daten der Biegeprüfung kann anschließend der Weibull-Modul als Maß für die Festigkeitsstreuung berechnet werden [57, 101]. Da Keramik ein sprödes Material ist und es bei Keramiken oft zu Streuungen der Festigkeitswerte kommt, ist es sinnvoll, den Weibull-Modul zu ermitteln [18]. Um einen Eindruck über die Versagenswahrscheinlichkeit des Materials zu bekommen, lässt sich sagen, dass ein kleiner Weibull-Modul einer großen Streuung der Daten entspricht und umgekehrt ein großer Weibull-Modul einer kleinen Streuung der Daten [101].

Anhand der Daten für  $\ln \ln [(1/1-P_f)]$  und  $\ln \sigma$  wird eine lineare Trendlinie zwischen den Werten erstellt.  $\sigma$  ist die Biegefestigkeit in MPa, welche zuvor mit der Formel (4) (s. Biaxiale Biegefestigkeit) berechnet wurde.  $P_f$  wird über die Formel  $P_f = \frac{i-0,5}{N}$  berechnet.  $i$  ist hierbei der Rang der Probe innerhalb einer aufsteigenden Aufreihung der Werte für die Biegefestigkeit und  $N$  entspricht der Anzahl der Proben [65].

Diese doppelt logarithmische Auftragung dient zur besseren Darstellung der Werte. Dargestellt wird der ermittelte Wert als „m“. Dieser beschreibt die Steigung der Trendlinie zwischen den Werten [65].

Für ein aussagekräftiges Ergebnis der Weibullstatistik sollten mindestens 15 Werte vorliegen. 30 sind jedoch zu bevorzugen [102]. Normalerweise bewegen sich die Werte für den Weibull-Modul von Hochleistungskeramiken zwischen 10 und 20 [103]. Dieser hohe Wert, also die geringe Streuung der Festigkeitswerte, ist zurückzuführen auf das feine, dichte Gefüge (Partikelgröße <100 nm) des Werkstoffs [47, 104].

### 1.4.3 Härte

Laut Definition in der DIN EN Norm 834-4 bezeichnet die Härte den „Widerstand, den ein Werkstoff beim Eindringen eines harten Körpers [...] entgegensetzt“ [105]. Sie wird ermittelt, um zu prüfen, inwiefern Restaurationsmaterialien Belastungen in der Mundhöhle standhalten können. Die Kaukräfte im Molarenbereich betragen in verschiedenen Studien zwischen 700 und 900 N [106]. Die Härte von Werkstoffen kann auf unterschiedliche Weisen ermittelt werden, welche in der DIN EN Norm 834-4 beschrieben sind. Bei keramischen Werkstoffen ist es üblich, die Härteprüfung nach Vickers zu verwenden [105].

Bei der Härteprüfung nach Vickers wird ein Diamant in quadratischer Pyramidenform (s. Abbildung 18) mit einer definierten Geschwindigkeit und Kraft auf den Prüfkörper aufgebracht, wo er für eine bestimmte Zeit gehalten wird [105, 107]. Über die Formel  $HV(F) = 1,854 \cdot 4 \cdot F/d^2$  wird die HV berechnet (s. Härte).

Da sie sich besonders für sehr harte und spröde Werkstoffe eignet, wurde sie für die Versuche in dieser Arbeit verwendet. Hinzu kommt, dass sie als etabliertes Verfahren einige Vergleichswerte in der Literatur liefert. Candido et al. untersuchten die HV von den drei Zirkoniumdioxidkeramiken Prettau Anterior, ICE Zirkon Transluzent (Zirkonzahn GmbH) und BloomZir (Bloomden Bioceramics Co, Hunan, China). Die von ihnen geprüfte HV lag bei  $1452,16 \pm 79,49$ ,  $1466,72 \pm 91,76$  und  $1516,06 \pm 104,02$  [59]. Auch Yener et al. testeten drei Zirkoniumdioxidkeramiken unterschiedlicher Hersteller. In ihrer Studie zeigten sich folgende Werte für die HV:  $1378 \pm 51$  für Zirkonzahn (Steger, Ahrntal, Italien),  $1414 \pm 27$  für Ceron (DeguDent GmbH, Hanau, Deutschland) und  $1357 \pm 24$  für Ceramill (Amann Girrbach GmbH, Koblach, Österreich) [108].

Ähnlich dazu ist die Härteprüfung nach Knoop, bei welcher der einzubringende Diamant eine rhombische Basis hat und somit einen länglichen Eindruck erzeugt [105].

Für die Härteprüfung von metallischen Werkstoffen wird in der Regel die Härteprüfung nach Rockwell verwendet [105]. Auch hier wird ein Prüfkörper in das Material eingebracht. Dieser ist, je nach zu prüfendem Material, kegel- oder kugelförmig. Die Rockwell-Prüfung unterscheidet sich von den anderen Härteprüfungen dadurch, dass zu Beginn eine definierte Vorkraft aufgebracht wird und dann erst die Messung durchgeführt wird. Zunächst wird dieser Prüfkörper mit einer kleineren Vorkraft (3 Kilogramm (kg)) auf die Probe gedrückt, wo die Kraft gleich null gesetzt wird. Es folgt eine größere

Zusatzkraft, welche im Anschluss aufgebracht und dann wieder entfernt wird. Anschließend wird die Eindringtiefe ausgemessen. Je nach zu prüfendem Material steht eine bestimmte Rockwell-Skala zur Verfügung, in der die Kraft und die Diamantenform definiert sind [109]. Die Rockwellprüfung A (Gesamtkraft: 60 kg, Zusatzkraft: 10 kg) und N (Gesamtkraft: 45 kg, 30 kg oder 15 kg, Zusatzkräfte 3 kg) werden mit festgelegten Eindringkräften durchgeführt und stehen auch für die Härteprüfung von keramischen Werkstoffen zur Verfügung [105].

Die Brinellprüfung wird bei weicheren Materialien, bis zu einer Brinellhärte (HB) von 400, geprüft. Bei ihr wird eine gehärtete Stahlkugel oder eine Hartmetallkugel verwendet, welche je nach zu prüfendem Material mit einer definierten Kraft für eine bestimmte Zeit auf den Probenkörper aufgebracht wird [107].

### 1.4.4 Energiedispersive Röntgenspektroskopie (EDX)

Da der Werkstoff Zirkoniumdioxidkeramik aus mehreren Komponenten besteht, gibt die (Energiedispersive Röntgenspektroskopie) EDX-Analyse Aufschlüsse über deren örtliche und quantitative Verteilung [110].

Die Hauptbestandteile der Zirkoniumdioxidkeramik sind schon an der Namensgebung des Materials erkennbar. Die Elemente Zirkon und Sauerstoff (Oxid), machen den Großteil der Masse aus. Wichtiger Bestandteil ist zudem das  $Y_2O_3$ , welches das Zirkon stabilisiert und somit in definierten Massenanteilen die oben genannte Transformationsverfestigung und die optischen Eigenschaften begünstigt. Da das Yttrium als Oxid vorliegt wird der hohe Sauerstoffanteil noch unterstützt.

Da es bei zu geringer Energieauflösung zu nicht gewünschten Peaküberlagerungen kommen kann, ist es möglich, dass bestimmten Elementen unpassende Anteile zugeordnet werden [111]. Im Periodensystem für die EDX-Analyse lassen sich die jeweiligen  $K\alpha$ -Werte einsehen, welche die Aufführung in der EDX-Analyse bedingen. Zum Beispiel hat das Element Rubidium mit einem  $K\alpha$ -Wert von 13,373 einen ähnlichen  $K\alpha$ -Wert wie Zirkon (15,744) und Yttrium (14,931). Weite Elemente, welche sich im Periodensystem um den Hauptbestandteil Zirkon sammeln, sind das Titan, das Hafnium und das Lanthan, die zusammen mit dem Zirkon der Titangruppe angehören [112-114]. Das Hafnium ist ein dem Zirkon sehr ähnliches Element. Aus diesem Grund kann es bei der Herstellung von Zirkoniumdioxidkeramik nicht herausgetrennt werden und tritt als

## Einleitung und Problemstellung

natürliche Verunreinigung auf [115]. Als weitere Elemente können Aluminium, Eisen, Nickel und Silizium als Oxid vorkommen. Das Aluminium dient zum einen als Sinterhilfsmittel und zum anderen zur Verstärkung der mechanischen Eigenschaften [61]. Nickel und Silizium-Kationen beeinflussen die Elektronenleitfähigkeit positiv [116]. Das vorhandene Eisen in der Zirkoniumdioxidkeramik dient als farbtragendes Element und führt, zusammen mit anderen Stoffen wie z.B. Cer und Yttrium, zu warmen Farbtönen, wie braun, gelb und rot [117].

## 2 Material und Methoden

### 2.1 Materialien

Für diese Untersuchung wurden drei verschiedene Zirkoniumdioxidkeramik-Multilayer-Keramiken unterschiedlicher Hersteller verwendet: IPS e.max ZirCAD Prime (IPS-Proben), Optimill Multilayer 3D (Optimill-Proben) und Ceramill zolid fx multilayer (Ceramill-Proben).

Für die drei Materialien sind von den Herstellern jeweils unterschiedliche Informationen zu der Schichtung oder der Zusammensetzung veröffentlicht. Das IPS e.max ZirCAD Prime setzt sich aus drei Schichten zusammen, einer Inzisalschicht, einer Übergangsschicht und einer Dentinschicht [118]. Die Inzisalschicht besteht aus 5Y-TZP, welches sich durch seine Transluzenz auszeichnet. Im Dentinbereich, welcher den Großteil des Blanks ausmacht, ist das widerstandsfähige 3Y-TZP enthalten [118]. Die Herstellung der Blanks erfolgt in drei Schritten. Diese vereinen sich in der vom Hersteller sogenannten „Gradient Technology“. Zunächst wird das Pulver so konditioniert, dass die Sinterkinetik vom 5Y-TZP und 3Y-TZP angepasst wird. Anschließend führt die Fülltechnologie dazu, dass ein stufenfreier Farbverlauf entsteht. In der Nachvergütung wird der Blank unter hohem Druck verdichtet [118]. Das Material Optimill Multilayer 3D ist in sechs Schichten eingeteilt. Der Hersteller Dentona gibt die Bestandteile dieser Keramik wie folgt an: 9,28 Gew-%  $Y_2O_3$ , 0,05 Gew-%  $Al_2O_3$ ,  $\leq 0,002$  Gew-%  $SiO_2$ ,  $\leq 0,15$  Gew-%  $Fe_2O_3$  und  $\leq 0,02$  Gew-%  $Na_2O$  [7]. Angaben zur Herstellung der Blanks lassen sich nicht finden. Die Multilayer-Keramik Ceramill zolid fx multilayer besteht zu über 99 Gew-% aus Zirkoniumdioxid, Hafnium(IV)-oxid und  $Y_2O_3$  [119]. Für dieses Material lassen sich weder Angaben zu der Schichtung noch zu der Herstellung der Blanks finden.

Die Multilayer-Zirkoniumdioxidkeramiken wurden anhand mehrerer Kriterien ausgewählt. Zum einen sollten sie laut Herstellerangaben ein vergleichbares Indikationsspektrum aufweisen: Dieses lässt vor allem die Herstellung von Kronen und Brücken im Front- und Seitenzahnbereich zu. Zum anderen sollten die Keramiken in einer einheitlichen Blankdimension von 16 mm x 98-98,5 mm verfügbar sein.

Pro Material wurden vier Schichten in festgelegter Höhe definiert und anschließend herausgefräst. Die Höhe der Schichten betrug nach dem Fräsen 1,5 mm. Pro Schicht

wurden 60 Prüfkörper hergestellt, von denen die Hälfte (n=30) direkt nach der Sinterung ohne weitere Einflüsse auf ihre mechanischen Eigenschaften getestet wurden.

Die andere Hälfte (n=30) wurde nach einer künstlichen Alterung in einem Thermocycler getestet. In einem Thermocycle erfolgte ein Temperaturwechsel zwischen zwei Wasserbädern von 5 °C und 55 °C mit je 30 s Verweildauer. Jede der Proben durchlief 10.000 Zyklen im Thermocycler.

Eine Übersicht der Prüfkörper wird in Tabelle 2 dargestellt.

**Tabelle 2: Übersicht Prüfkörper**

Material	Schicht	Biegeplättchen Dichte/Härte/ biaxiale Biegemessung	
		ohne Alterung (o.A.)	mit Alterung (m.A.)
Ivoclar ZirCAD Prime	I	30	30
	II	30	30
	III	30	30
	IV	30	30
Dentona Optimill Multilayer 3D	I	30	30
	II	30	30
	III	30	30
	IV	30	30
Ceramill Zoid FX Multilayer	I	30	30
	II	30	30
	III	30	30
	IV	30	30
		<b>Gesamt</b>	<b>720</b>

### 2.1.1 Probenherstellung

#### Fräsen

Die Herstellung der Probenkörper erfolgte unabhängig von dem Material auf dieselbe Art, welche im Folgenden beschrieben wird.

Die Probenherstellung erfolgte stets gemäß den Vorgaben für die biaxiale Biegeprüfung nach DIN EN ISO 6872:2015. Der 3D-Körper eines Zylinders wurde als STL-Datei

## Material und Methoden

konstruiert. Designet wurde dieser mit der Software SolidWorks 2018 (Dessault Systèmes SolidWorks Corporation; Waltham, USA).

Zunächst wurden die Probenkörper mittels der CAD-Technologie in den Weißling genestet, um sie anschließend von der Fräsmaschine Sirona InLab MC X5 (Dentsply Sirona Deutschland GmbH; Bensheim, Deutschland) fräsen zu lassen. Die Verarbeitung der Scheiben erfolgte im Trockenzustand. Aus den jeweiligen Materialien wurden Zylinder mit einer Höhe von 15 mm und einem Durchmesser von 16 mm gefräst (s. Abbildung 7).

Nach erfolgtem Fräsvorgang wurde die obere und untere Seite der Zylinder mit einem roten Farbstift (ohne Grafit) markiert, wodurch eine Verwechslung der Schichten im nachfolgenden Sägevorgang vermieden wurde.

Die Zylinder wurden an ihren Verbindern mithilfe eines Handstücks (KaVo Typ 4941, KaVo Dental GmbH; Biberach, Deutschland), einer Fräse und einem Steinchen aus dem Scheibenkörper herausgetrennt und an den ursprünglichen Verbinderstellen geglättet. Nachdem diese Stellen eingeebnet worden sind, wurden die Zylinder in vier vordefinierte Scheiben gesägt.



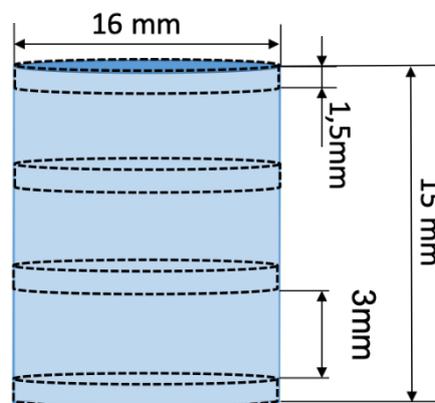
**Abbildung 7: Multilayer-Disk nach dem Fräsen**

### Sägen

Das Zersägen des zuvor gefrästen Zylinders erfolgte mithilfe einer Modellsäge (S-G 350, Harnisch+Rieth; Winterbach, Deutschland) entsprechend Abbildung 8 in vier Schichten von inzisal nach zervikal.

Auf diese Weise wurden runde Scheiben mit je einer Höhe von 1,5 mm hergestellt.

Zusätzlich wurde von jedem Material ein gesamter Zylinder mit einer Höhe von 15,0 mm für die Energiedispersive Röntgenspektroskopie (EDX) hergestellt und lediglich an den ursprünglichen Verbindungsstellen geglättet (s. Abbildung 11). Nach Sinterung hatten diese Zylinder einen Durchmesser von 13 mm und eine Höhe von 12 mm.



**Abbildung 8: gefräster Zylinder im Weißlingzustand**

*(selbst erstellte Abbildung)*

### Schleifen

Die hergestellten Plättchen wurden mit SiC-Schleifpapier verschiedener Körnungen auf ihre endgültige Höhe gebracht. Zunächst wurde Schleifpapier mit einer groben (P180) und anschließend eine feinere Körnung (P800) (Hermes Schleifmittel GmbH; Hamburg, Deutschland) verwendet, um die Oberfläche zu glätten, vergleichbare Ausgangssituationen zu schaffen und die mit einer inhomogenen Oberfläche einhergehende Fehleranfälligkeit zu minimieren.

Die Überprüfung und Einhaltung der gewünschten Scheibenhöhe erfolgte mit Hilfe eines digitalen Messschiebers (Gustav Stursberg GmbH, Remscheid, Deutschland). Die Dimensionen der Prüfkörper wurden im Weißlingszustand so gewählt, dass nach einer erfolgten Sinterung die vorgegebenen Dimensionen gemäß DIN EN ISO 6872:2015 erreicht werden (siehe Abbildung 10).

### Sintern

Das Sintern erfolgte je nach Material nach der Empfehlung des Herstellers im Sinterofen Programat S1 1600 (Ivoclar Vivadent AG; Schaan, Liechtenstein). Dafür wurden die Probenkörper auf den in Abbildung 9 zu sehenden Probenträger gelegt.

Die folgende Tabelle 9 soll einen Überblick über die unterschiedlichen Sinterparameter der Materialien geben.

**Tabelle 3: Sinterparameter gemäß Herstellerangaben**

*Informationen für die Tabelle aus [7, 77, 78, 89]*

Material	Starttemp.	Heizrate (1. Phase)	Höchste Temp (1.Phase)	Verweilzeit	Heizrate (2. Phase)
IPS	20°C	10°/min	900°C	30 min	3,3°C/min
Optimill	Raumtemp.	5°/min	900°C	30 min	2°/min
Ceramill	Raumtemp.	8°/min	1450°C	120 min	-
Material	Höchste Temp (2.Phase)	Verweilzeit	Abkühlung auf	Kühlzeit	Natürliche Abkühlung auf
IPS	1500°C	120 min	900°C/300°C	60 min/ 72,29 min	300°C
Optimill	1450°C	120 min	900°C	50 min	500°C
Ceramill	-	-	200°C	ca. 5 Std.	-

Nach dem Sintervorgang erreichten die Probenkörper einen Durchmesser von ca. 14,0 mm ± 2 mm und eine Höhe von 1,2 mm ± 0,2 mm gemäß DIN EN ISO 6872:2015 (s. Abbildung 10) Die finalen Maße nach dem Sintervorgang wurden wieder mit einer digitalen Schiebelehre kontrolliert



Abbildung 9: Proben auf dem Träger vor dem Sintern

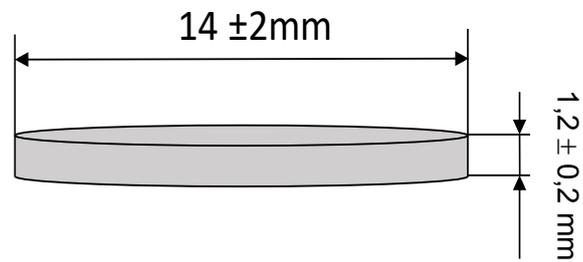


Abbildung 10: biaxiales Biegeplättchen nach Sinterung

*(selbst erstellte Abbildung)*

Das Sintern hat zu einer Schrumpfung von 20 % sowie dem Sichtbarwerden des Farbverlaufs geführt. (Abbildung 11) (Abbildung 12).

## Material und Methoden

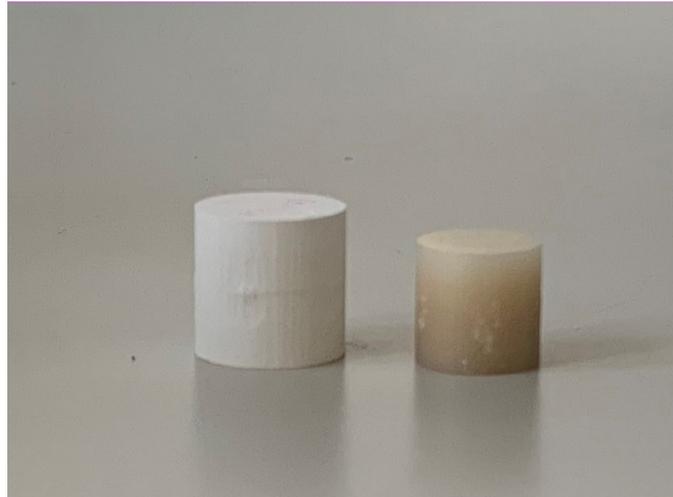


Abbildung 11: Vergleich Multilayer-Zylinder vor und nach dem Sintern



Abbildung 12: Größenvergleich und Farbverlauf

### 2.1.2 Alterung

Um die Temperaturwechsel in der Mundhöhle zu simulieren, erfolgte eine künstliche Alterung mithilfe des Thermocyclings. Im Thermocycler erfolgte ein Wechsel zwischen zwei Wasserbädern mit den Temperaturen von 5 °C und 55 °C mit 10.000 Zyklen. Die Verweildauer in den beiden Bädern betrug jeweils 30 Sekunden.

Dieses Vorgehen orientierte sich an einer in vitro Studie von Rayar et al., in welcher die künstliche Alterung ebenso in einem Temperaturwechsel zwischen 5 °C und 55 °C über 10.000 Zyklen erfolgte [120].

## 2.2 Methoden

Die vorhandenen Testkörper wurden in zwei gleich große Gruppen unterteilt. Eine Gruppe mit je 30 Probenplättchen der einzelnen Schichten wurde ohne Alterung, die andere Gruppe (n=30) mit künstlicher Alterung getestet. Die Versuche wurden in folgender Reihenfolge durchgeführt und in Abbildung 13 schematisch dargestellt:

1. Dichte
2. biaxiale Biegefestigkeit
3. Härte

Die EDX-Analyse der gesinterten Zylinder erfolgte unabhängig von diesem Ablauf.



**Abbildung 13: Schematischer Ablauf der Versuche**

*(selbst erstellte Abbildung)*

### 2.2.1 Dichte

Die Dichte der Probenkörper wurde nach der DIN-Norm 66137-3:2019-03 mithilfe des archimedischen Prinzip bestimmt. Dieses Prinzip besagt laut Povh [121] „Die Kraft, die auf einen Körper wirkt, ist gleich der Gewichtskraft des von ihm verdrängten Mediums“. In diesem Fall wurde das Sartorius-Dichtebestimmungsset (Sartorius AG; Göttingen, Deutschland) verwendet (s. Abbildung 14).

Im ersten Schritt wurde die Temperatur des Wassers bestimmt und die Waage tariert. Anschließend wurde das Probengewicht in der Luft ( $W(a)$ ) bestimmt, indem die Probe auf die Gestellwaagschale gelegt wurde. Nach dem erneuten Trieren der Waage wurde die Probe in den Tauchkorb gelegt. Auch das Gewicht des Prüfkörpers in Wasser ( $W(fl)$ ) wurde abgelesen und notiert. Der jeweiligen Temperatur des Wassers ist ein spezifischer Wert für die Wasserdichte zugeordnet, welcher einer Tabelle im Anhang der Bedienungsanleitung des Sartorius Dichtbestimmungsgerätes zu entnehmen ist (s. Tabelle 8 im Anhang). Anhand dieses spezifischen Wertes und der Werte für  $W(a)$  und  $W(fl)$  konnte mit folgender Formel (1) in Kombination mit Formel (2) die Dichte bestimmt werden:

$$\rho = \frac{W(a) \cdot \left[ \rho(fl) - 0,0012 \frac{g}{cm^3} \right]}{Korr G} + 0,0012 \frac{g}{cm^3} \quad (2)$$

$$G = W(a) - W(fl) \quad (3)$$

Hierbei ist:

$\rho$  = Dichte

$W(a)$  = Gewicht der Probe in der Luft

$W(fl)$  = Gewicht der Probe im Wasser

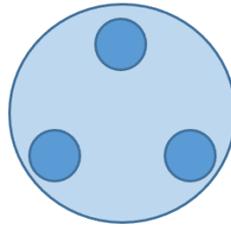


**Abbildung 14: Satorius Dichtebestimmungsgerät**

*Probe im Tauchkorb zur Bestimmung von  $W(f)$*

### 2.2.2 Biaxiale Biegefestigkeit

Die biaxiale Biegefestigkeit wurde nach der Norm DIN EN ISO 6872:2015-11 mithilfe einer Universalprüfmaschine 2,5kN zwicki (Zwick/Roell; Ulm, Deutschland) bestimmt. Die Auflage für den Prüfkörper besteht aus drei gehärteten Stahlkugeln mit einem Durchmesser von  $4,5 (\pm 2)$  mm. Die Kugeln wurden im Abstand von  $120^\circ$  auf einem Kreis mit dem Durchmesser von  $11 \pm 1$  mm angeordnet (siehe Abbildung 15). Der Probenkörper wurde konzentrisch auf den drei Kugeln platziert, um zu gewährleisten, dass die Kraft mittig auf die Probe trifft. Jeweils über und unter der Probe lag gemäß Norm eine 0,05 mm dicke Polypropylenfolie (Falken GmbH; Peitz, Deutschland) um den Druck des Stempels gleichmäßig zu verteilen.



**Abbildung 15: Skizze des Probenkörpers auf den 3 Stahlkugeln**

*(selbst erstellte Abbildung)*

Die Prüfung der biaxialen Biegefestigkeit wurde mittels Software TestXpert II V63.2 (Zwick/Roell; Ulm, Germany) durchgeführt. In Abbildung 16 ist die Prüfvorrichtung für die Biegeprüfung dargestellt.

Der Stempel fuhr mit einer konstanten Traversengeschwindigkeit von  $1 \pm 0,5$  mm/min nach unten auf den Prüfkörper zu. Dieser hat die Form eines Dübelstiftes und einen Durchmesser von  $1,4 \pm 0,2$  mm und bringt die Kraft mittig auf den Prüfkörper auf. Die Kraft, welche den Prüfkörper letztendlich zum Bruch bringt, wird bestimmt und mit einer Nachkommastelle angegeben. Mithilfe dieses Kraftwertes, der Prüfkörperhöhe, des Durchmessers der Probe und der Gleichung (3) konnte die biaxiale Biegefestigkeit  $\sigma$  in MPa berechnet werden.

$$\sigma = -0,2387 * P * \frac{(X - Y)}{b^2} \quad (4)$$

Hierbei ist:

$\sigma$  = die Biegefestigkeit in MPa

P = die beim Bruch gemessene Gesamtkraft (in N)

$$X = (1 + \nu) \ln (r_2/r_3)^2 + \left[\frac{1-\nu}{2}\right](r_2/r_3)^2$$

$$Y = (1 + \nu)[1 + \ln(\frac{r_1}{r_3})^2] + (1 - \nu)(\frac{r_1}{r_3})^2$$

$\nu$  = Poisson'sche Querkontraktionszahl

$r$  = Radius des Unterstützungskreises (in mm)

$r_2$  = Radius des belasteten Bereichs (in mm)

$r_3$  = Radius des Probenkörpers (in mm)

Die anschließende Berechnung des Weibull-Moduls wird wie folgt durchgeführt:

Die Festigkeitswerte der getesteten Proben wird dem Rang nach geordnet (aufsteigend). Aufgrund dieser Ränge wird mit der Formel

$$P_f = \frac{i-0,5}{N} \quad (5)$$

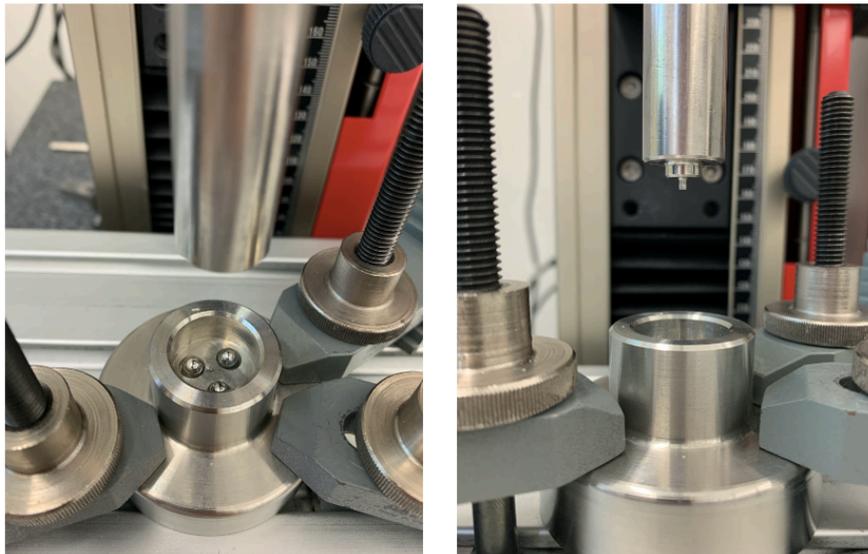
die Versagenswahrscheinlichkeit bestimmt.

Hierbei ist:

$i$  = Rang der Probe innerhalb einer aufsteigenden Aufreihung der Werte für die Biegefestigkeit

$N$  = Anzahl der Proben

Danach wird der doppelte natürliche Logarithmus von  $P_f$  ( $[(1/1-P_f)]$ ) und der natürliche Logarithmus von  $\sigma$  ( $\ln \sigma$ ) gebildet. Anhand  $\ln \ln [(1/1-P_f)]$  und  $\ln \sigma$  wird eine lineare Trendlinie zwischen den Werten erstellt. Laut DIN EN ISO 6872:2015 ist der Weibullmodul als die „Steigung der linearen Regressionsanpassung“ definiert [65].



**Abbildung 16: Prüfvorrichtung für die biaxiale Biegefestigkeit**

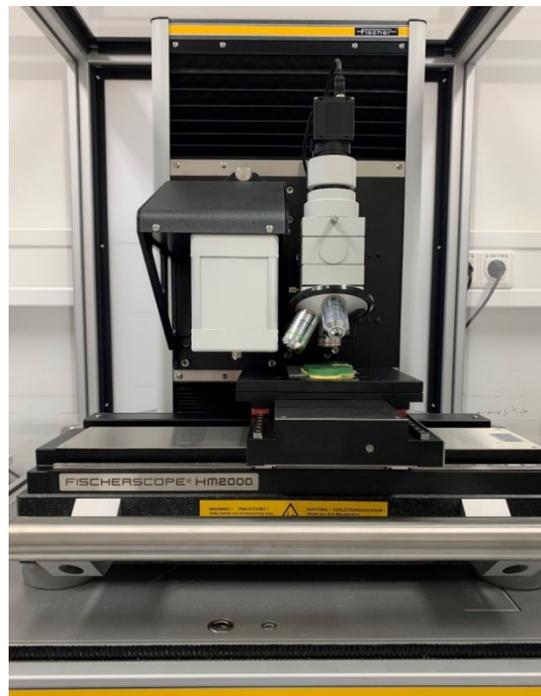
### 2.2.3 Härte

Um die Härte messen zu können, wurden zunächst zwei Teile der gebrochenen Plättchen eines jeden Materials und jeder Schicht, jeweils mit und ohne Alterung ausgewählt. Diese sollten möglichst groß sein und eine vergleichbare Höhe haben. Mithilfe von Silikonformern wurden diese in den Kunststoff Technovit 4071 (Kulzer GmbH; Hanau, Deutschland) eingebettet.

## Material und Methoden

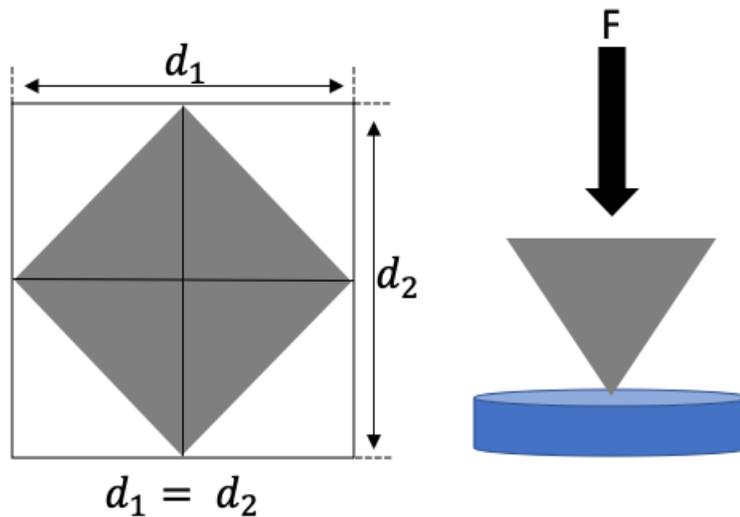
Um eine möglichst homogene, gleichmäßige Oberfläche zu schaffen, erfolgte die darauffolgende Politur mit dem SiC-Nassschleifpapier (Hermes Schleifmittel GmbH; Hamburg, Deutschland) an dem Schleif- und Poliergerät MetaServ 3000 (Buehler; Esslingen am Neckar, Deutschland). Es wurde die Reihenfolge P320, P500, P800, P1200, P2500, P4000 eingehalten. Im letzten Schritt der Vorbereitung erfolgte die Politur an derselben Maschine, bis die Proben auf Hochglanz poliert waren.

Mithilfe des Kunststoffes Ivolen (Ivoclar Vivadent AG; Schaan, Liechtenstein) wurden die Technovit-Kunststoffscheiben, in denen die Proben eingebettet waren, auf dem Probenträger fixiert.



**Abbildung 17: Härteprüfmaschine Fisherscope HM 2000 LT**

Die Härteprüfung wurde an der Härteprüfmaschine Fisherscope HM 2000 LT (Helmut Fischer GmbH; Sindelfingen, Deutschland) (s. Abbildung 17) mithilfe der Software WIN-HCU (Helmut Fischer GmbH; Sindelfingen, Deutschland) durchgeführt. In der Härteprüfung nach Vickers wird ein Diamant mit einer quadratischen Pyramidenform (s. Abbildung 18) mit einer definierten Kraft auf den Probenkörper gebracht und dort für eine bestimmte Zeit gehalten. Die Prüfmaschine bestimmt anhand der Eindringtiefe und des Kraftwiderstandes die Martenshärte (HM) und berechnet dann daraus die HV.



**Abbildung 18: Schema der Härteprüfung nach Vickers**

*(selbst erstellte Abbildung)*

Die Kraft  $F$ , welche für monolithische Werkstoffe in der Regel verwendet wird, beträgt 1,0 kg (d.h. 9,807 N). Bei zu schwachen Eindrücken oder zu starker Rissbildung kann dieser Wert jedoch variiert werden [105]. Die Prüfparametern orientierten sich sowohl an der DIN EN 843-4, an den Kennwerten der verwendeten Prüfmaschine, als auch an den Prüfparametern, die in einer Studie von Poole et al. [122]. In dieser wurde ebenfalls die Mikrohärtigkeit mit 0,980 N getestet. Mithilfe des Programms WIN-HCU (Helmut Fischer GmbH; Sindelfingen, Deutschland) positionierte man zehn Eindruckspunkte auf jedem Plättchen. Zuvor wurden die Probe mit dem Stereomikroskop Leica EZ4W (Leica Microsystems GmbH; Wetzlar, Deutschland) betrachtet um sicherzustellen, dass die Eindruckstellen nicht durch Risse oder Poren beschädigt sind. Der pyramidenförmige Diamant wurde mit einer Kraft von 1000 mN auf den Probenkörper aufgebracht und für 15 Sekunden in dieser Position gehalten.

#### 2.2.4 EDX

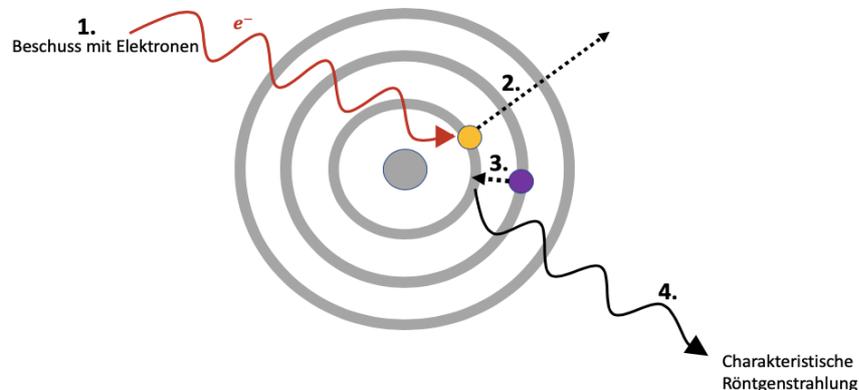
Mit einem vollständigen Zylinder jedes Materials wurde eine EDX durchgeführt, um die Elementzusammensetzung der Probe zu ermitteln.

Nachdem die Probe mit Elektronen beschossen wurde, gibt die charakteristische Röntgenstrahlung einen Aufschluss über die qualitative und quantitative Verteilung der Probenelemente.

Das Prinzip der Entstehung dieser charakteristischen Röntgenstrahlung erklärt sich wie folgt:

Die Probe (in diesem Fall der gesinterte Zylinder) wird während der EDX die ganze Untersuchungsdauer lang mit Elektronen beschossen. Währenddessen interagieren diese Elektronen mit denen der Atome in der Probe. Da die Elektronen, welche sich näher am Kern des Atoms befinden, energieärmer sind, wird eines von ihnen herausgeschlagen. So entsteht eine Lücke in der inneren Schale, woraufhin ein Elektron aus der Hülle darüber hinunterfällt. Bei dem Übergang in diesen energieärmeren Zustand wird die überschüssige Energie frei und abgestrahlt. Dies geschieht in Form eines Röntgenquants [110]. Ein Schema dieses Prozesses ist in Abbildung 19 dargestellt.

Ein Detektor absorbiert die freigewordene Röntgenstrahlung. Die qualitative und quantitative Verteilung eines Elements innerhalb des Prüfkörpers wird anhand eines EDX-Spektrums dargestellt. Da dieser Effekt spezifisch für die einzelnen Elemente ist, lässt sich die genaue Zusammensetzung der Zylinder darstellen und miteinander vergleichen [110].



**Abbildung 19: Schema EDX**

*(selbst erstellte Abbildung)*

Für diese Untersuchung wurden die durchgesinterten Zirkoniumdioxidkeramikzylinder mit Gold (Sputter coater K550; EMITECH Group; Montigny-le-Bretonneux, Frankreich) beschichtet.

Die EDX-Analyse wurde mit der REM Zeiss Crossbeam 340 (Carl Zeiss Microscopy Deutschland GmbH; Oberkochen, Deutschland) durchgeführt. Der Arbeitsabstand

## Material und Methoden

zwischen der Linse, welche den Elektronenstrahl bündelt, und der Probe beträgt 5,0 mm. Mit einer Beschleunigungsspannung von 30.000 kV werden die Elektronen auf die Keramik geschossen. Mit einer 50-fachen Vergrößerung wurden die Aufnahmen gemacht.

Es resultieren EDX-Spektren und Diagramme für die einzelnen Bestandteile des untersuchten Materials, welche Aufschlüsse über die Lokalisation und Menge der Komponenten geben [110]. Für die Analyse wurde der gesamte Zylinder in fünf Abschnitte unterteilt, welche nacheinander untersucht wurden.

### 2.2.5 Statistische Auswertung

Im Anschluss an die Prüfungen wurden die Ergebnisse statistisch ausgewertet. Für die Auswertung wurde das Statistik-Programm IBM Statistic SPSS 26 (IBM; Armonk, USA) verwendet.

Zunächst wurden die einzelnen Gruppen mittels Kolmogorov-Smirnov-Test auf Normalverteilung geprüft. Das Signifikanzniveau wurde dabei auf 0,05 gesetzt.

Da nicht alle Ergebnisse normalverteilt waren ( $p < 0,05$ ), wurden die nicht parametrischen Tests angeschlossen.

Als nicht parametrische Tests folgten der Kruskal-Wallis- und Mann-Whitney-U-Test. Die Nullhypothese lautete  $H_0$ : Die Verteilung der Ergebnisse ist innerhalb der jeweiligen Gruppen identisch.

Die Proben-Paare wurden so ausgewählt, dass auf drei Nullhypothesen getestet werden konnte.

$H_{01}$ : Die einzelnen Schichten eines Materials unterscheiden sich nicht.

$H_{02}$ : Die entsprechenden Schichten verschiedener Materialien weisen keinen Unterschied auf.

$H_{03}$ : Der Einfluss der künstlichen Alterung hat keinen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften der Multilayer-Zirkoniumdioxidkeramiken.

Somit konnten nur die relevanten Paare betrachtet werden. Aufgrund der großen Menge der Probenpaare und der daraus resultierenden Notwendigkeit des multiplen Testens wurde das Signifikanzniveau mit der Bonferroni-Holm-Korrektur angepasst, um dem  $\alpha$ -Fehler entgegenzuwirken. Das Signifikanzniveau wurde für die Prüfungen der Dichte und der biaxialen Biegefestigkeit auf  $p = 0,00052632$  und für die Prüfung der Härte auf  $p = 0,00089286$  angepasst. Da nach der Bonferroni- und der Bonferroni-Holm-Korrektur dieselben signifikanten Unterschiede vorlagen wird im Folgenden nur die Bonferroni-Korrektur genannt.

Im Anschluss wurde die Effektstärke der Ergebnisse mit der Formel  $r = \left| \frac{z}{\sqrt{n}} \right|$  im Programm Microsoft Excel (Microsoft Corporation; Redmond, USA) berechnet.

### 3 Ergebnisse

#### 3.1 IPS e.max ZirCAD Prime

##### 3.1.1 Dichte

Die Messung der Dichte erfolgte unter denselben Bedingungen Schicht für Schicht. Die einzelnen Ergebnisse sind vollständig in Tabelle 4 dargestellt.

Bei den IPS-Proben ohne Alterung zeigte sich bei der ersten Schicht eine Dichte von  $5,932 \text{ g/cm}^3$  bis  $6,034 \text{ g/cm}^3$ .

In der zweiten Schicht lagen die Werte zwischen  $5,956 \text{ g/cm}^3$  und  $6,064 \text{ g/cm}^3$

Schicht III zeigte eine Dichte von  $5,972 \text{ g/cm}^3$  bis  $6,085 \text{ g/cm}^3$ .

Die vierte und letzte Schicht hatte eine Dichte von  $5,90 \text{ g/cm}^3$  bis  $6,089 \text{ g/cm}^3$ .

Bei der Dichte der IPS-Proben ohne Alterung ließ sich ein Anstieg der Dichte von inzisal nach zervikal (oder von Schicht I zu Schicht IV) beobachten. Einzige Ausnahme stellte der kleinste Wert der dritten Schicht dar, welcher etwas höher als der entsprechende Wert der darauffolgenden vierten Schicht lag. Somit lag auch der Median der dritten Schicht etwas über dem der vierten Schicht (s. Abbildung 20). Zudem ist in dem Boxplot-Diagramm sichtbar, dass die Streuung der Werte in der vierten Schicht am größten war. Die der Schichten I bis III waren annähernd gleich groß.

Nach künstlicher Alterung betrug die Dichte der ersten Schicht  $5,964 \text{ g/cm}^3$  bis  $6,064 \text{ g/cm}^3$ .

Die zweite Schicht hatte die niedrigste Dichte von  $5,975 \text{ g/cm}^3$  bis  $6,097 \text{ g/cm}^3$ .

In der dritten Schicht der gealterten IPS-Proben lag die Dichte bei  $5,896 \text{ g/cm}^3$  bis  $6,049 \text{ g/cm}^3$ .

Die Werte betragen in der vierten Schicht  $5,943 \text{ g/cm}^3$  bis  $6,072 \text{ g/cm}^3$ .

Die erste Schichte zeigte signifikante Unterschiede (jeweils mit und ohne Alterung) im Vergleich zu den anderen drei Schichten ( $p < 0,001$ ). Ein weiterer signifikanter Unterschied fand sich zwischen der zweiten Schicht mit Alterung zu der vierten Schicht mit Alterung ( $p < 0,001$ ). Im Boxplot-Diagramm in Abbildung 20 zeigt sich bei den gealterten Proben (wie bei den nicht gealterten Proben) eine ansteigende Tendenz der Dichtewerte von Schicht I bis hin zu Schicht IV. Bei der Streuung zeigte sich kein großer Unterschied zwischen den unterschiedlichen Schichten.

Tabelle 4: Dichtewerte IPS e.max ZirCAD Prime

	Schicht I		Schicht II		Schicht III		Schicht IV	
	o.A.	m.A.	o.A.	m.A.	o.A.	m.A.	o.A.	m.A.
Min [g/cm <sup>3</sup> ]	5,932	5,964	5,956	5,975	5,972	5,896	5,903	5,943
Max [g/cm <sup>3</sup> ]	6,034	6,064	6,064	6,097	6,085	6,049	6,089	6,072
Med [g/cm <sup>3</sup> ]	5,980	5,982	6,027	6,022	6,039	6,031	6,034	6,037
Mean [g/cm <sup>3</sup> ]	5,983	5,986	6,018	6,025	6,032	6,027	6,014	6,035
SD [g/cm <sup>3</sup> ]	0,024	0,023	0,024	0,021	0,024	0,026	0,046	0,020

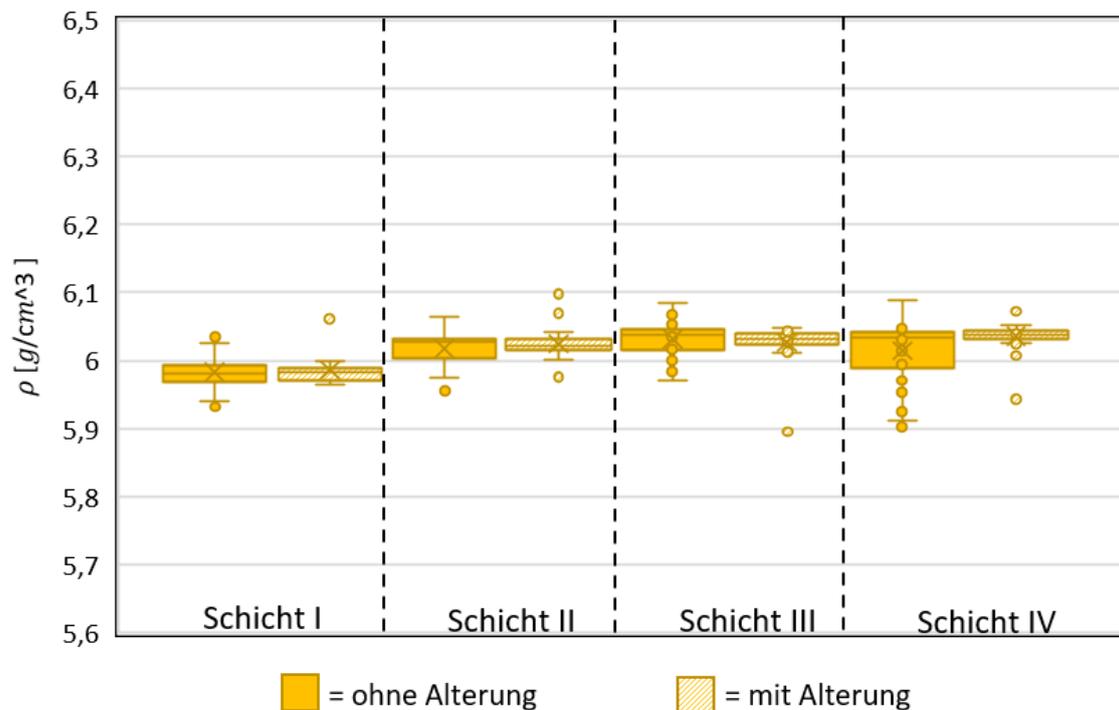


Abbildung 20: Vergleich der Dichte (und Darstellung des Medians) der IPS e.max ZirCAD Prime Schichten (o.A. und m.A.)

### 3.1.2 Biaxiale Biegefestigkeit

Für die erste Schicht der IPS-Proben ohne Alterung lag der Mittelwert (MW)  $\pm$  Standardabweichung (SD) der Ergebnisse bei 494,38 MPa  $\pm$  109,60. Der Weibull-Modul lag bei 5,19 (Abbildung 23, links).

Der MW der zweiten Schicht lag bei 601,69 MPa, die SD bei 94,73 MPa und der Weibull-Modul bei 7,55 (Abbildung 24, links).

Die Werte für dritte Schicht lagen bei einem MW  $\pm$  SD von 713,14 MPa  $\pm$  171,61 MPa. Weibull-Modul war hier 4,48 (Abbildung 25, links).

Für die vierte und letzte Schicht zeigte sich ein MW von 811,43 MPa  $\pm$  106,05 MPa. Mit einem Weibull-Modul von 8,36 gab es bei dieser Schicht die geringste Streuung der Festigkeitswerte (Abbildung 26, S. 51, links).

Nach künstlicher Alterung zeigte sich eine ähnliche Werteverteilung.

Die Festigkeit der ersten Schicht lag bei 482,54 MPa  $\pm$  130,99 MPa.  $M=4,32$  stellte hier den Weibull-Modul dar (Abbildung 23, rechts).

In Schicht II lag der MW bei 607,97 MPa und die SD bei 125,63 MPa. Der Weibull-Modul dieser Schicht lag bei 5,68 (Abbildung 24, rechts).

Es folgte die dritte Schicht, mit einem Durchschnittswert von 763,84 MPa, einer SD von 189,54 MPa und einem Weibull-Modul von 4,55 (Abbildung 25, rechts).

Der MW der letzten Schicht war 848,63 MPa mit einer SD von 108,80 MPa. Auch bei den gealterten Proben ließ sich der größte Weibull-Modul mit 9,025 und somit die geringste Streuung der Festigkeitswerte in der letzten Schicht feststellen (Abbildung 26, rechts).

Wie bei den Proben, welche nicht im Thermocycler gewesen waren, war eine Steigerung der Festigkeitswerte von der inzisalen bis hin zur zervikalen Schicht erkennbar.

Nach der Bonferroni-Korrektur lagen, wie bei der Dichte, einige signifikante Unterschiede zwischen den vier Schichten vor. Schicht eins (mit und ohne Alterung) unterschied sich signifikant ( $p < 0,001$ ) von der dritten und vierten Schicht (mit und ohne Alterung). Zudem unterschied sich die zweite Schicht (mit und ohne Alterung) signifikant von der vierten Schicht (mit und ohne Alterung) ( $p < 0,001$ ).

Abbildung 21 zeigt die unterschiedlichen Bruchmuster der IPS-Proben durch die Universal-Prüfmaschine für die Bestimmung der biaxialen Biegefestigkeit.



# Ergebnisse

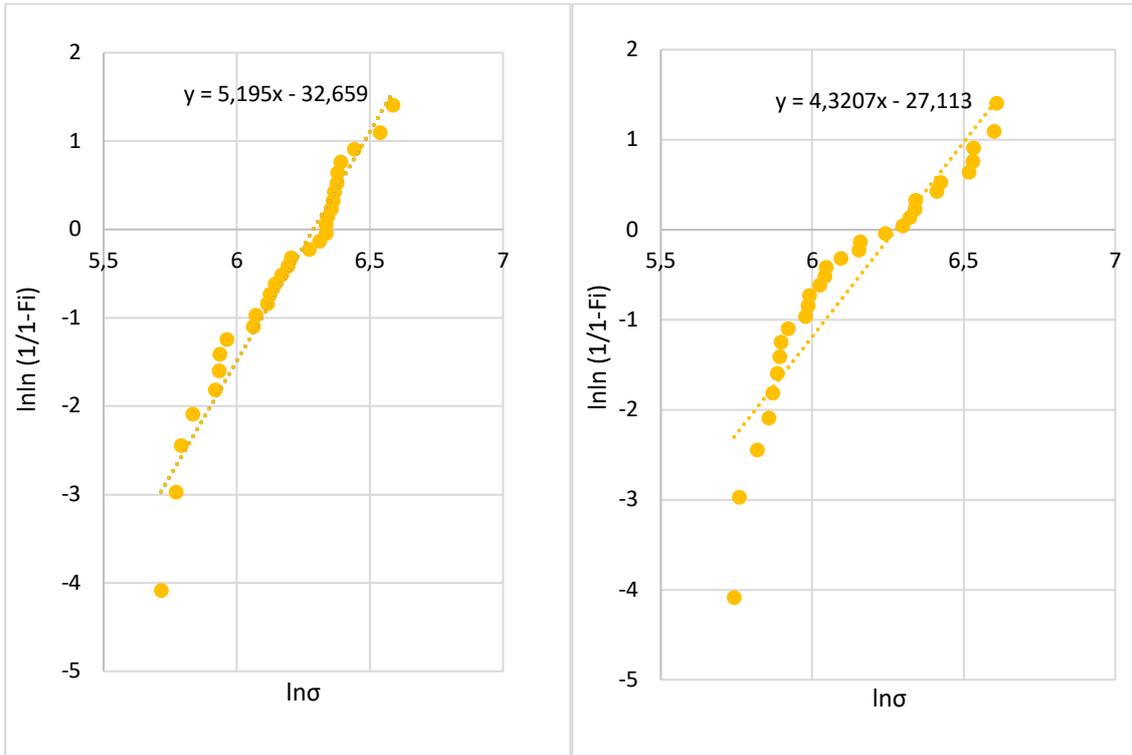


Abbildung 23: Streuung der ZirCAD-Festigkeitswerte (Schicht I; links: o.A., rechts: m.A.)

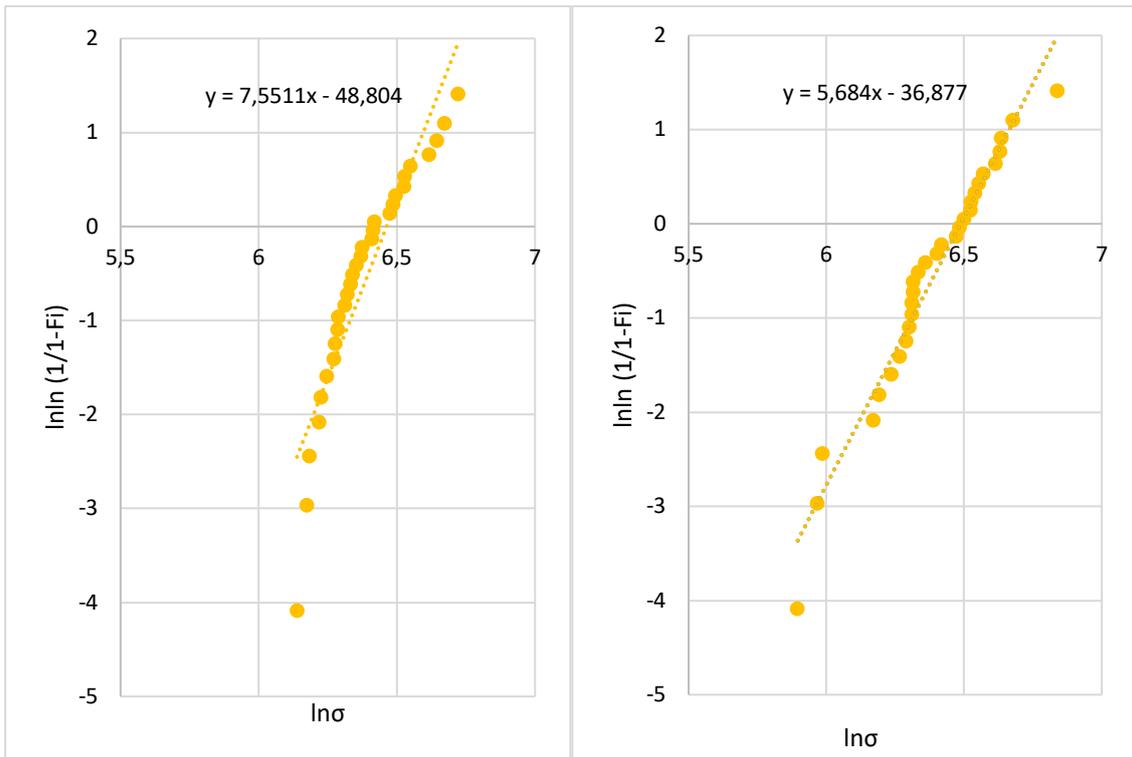


Abbildung 24: Streuung der ZirCAD-Festigkeitswerte (Schicht II; links: o.A., rechts: m.A.)

# Ergebnisse

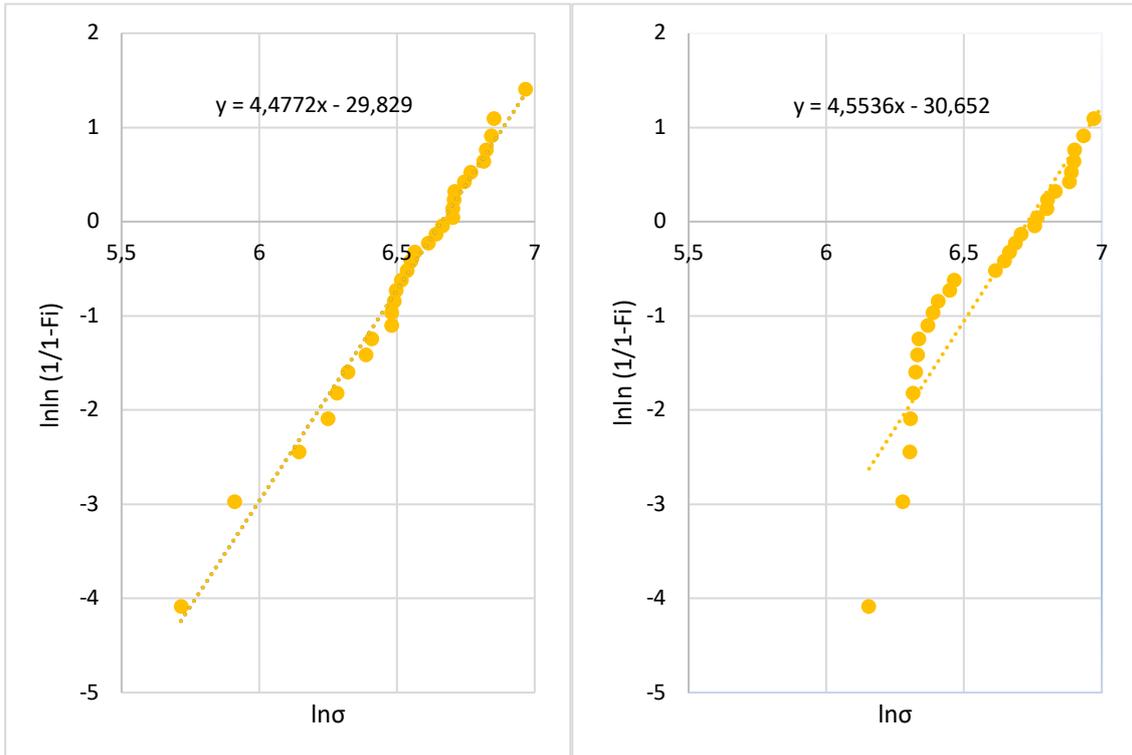


Abbildung 25: Streuung der ZirCAD-Festigkeitswerte (Schicht III; links: o.A., rechts: m.A.)

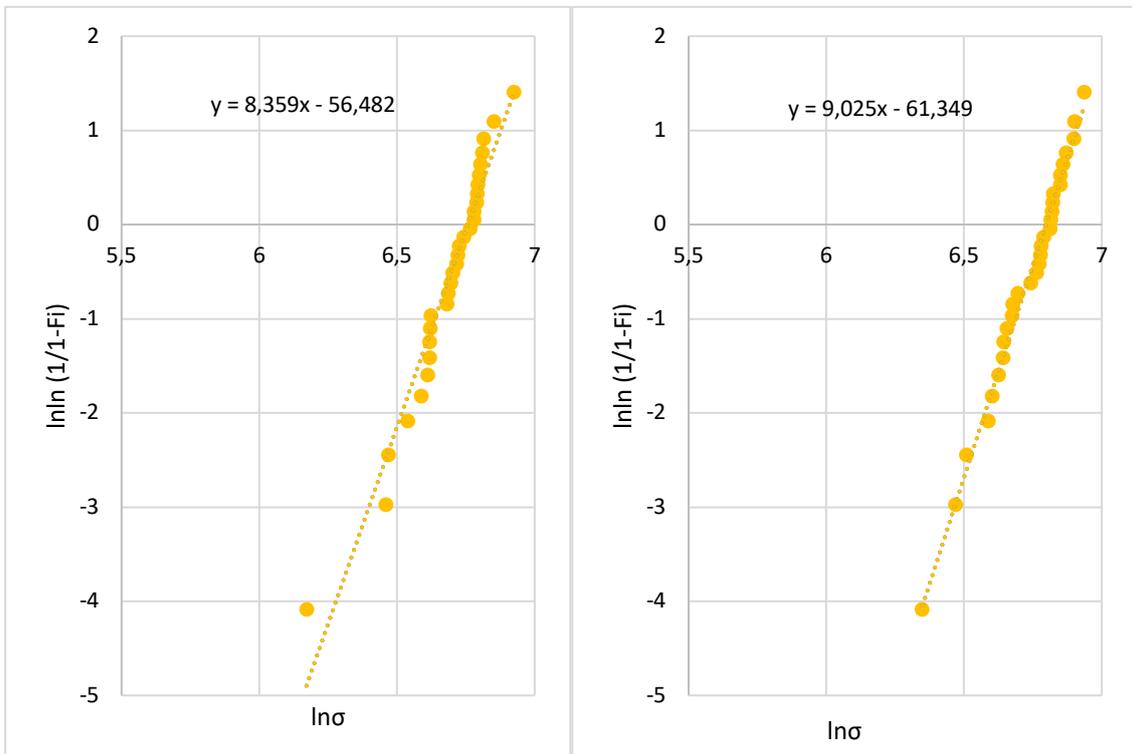


Abbildung 26: Streuung der ZirCAD-Festigkeitswerte (Schicht VI; links: o.A., rechts: m.A.)

### 3.1.3 Härte

Die Härteprüfung erfolgte zunächst an den ungealterten Proben.

Der MW der ersten Schicht lag bei einer HV  $\pm$  SD von  $1579,18 \pm 47,14$ .

Die HV der zweiten Schicht lag bei  $1559,79 \pm 63,33$ .

Es folgte die dritte Schicht bei der die HV bei  $1484,35 \pm 22,20$ , lag.

Die letzte Schicht erzielte folgende Werte für HV  $\pm$  SD:  $1506,24 \pm 63,88$ .

Es folgte die Prüfung der gealterten Proben. Bei diesen wurde in der ersten Schicht eine HV von  $1556,91 \pm 41,82$  gemessen.

Die HV der zweiten Schicht der IPS-Proben lag durchschnittlich bei HV von  $1607,10 \pm 149,71$ . Die hohe SD resultierte aus den auffallend hohen Werten, 1970,34 und 1803,98, welche in dieser Schicht gemessen worden.

Schicht III hatte im Durchschnitt eine HV von  $1501,41 \pm 32,35$ .

Bei dem Wert 1525,32 lag die durchschnittliche HV der vierten Schicht. Die SD war 57,73.

In Abbildung 27 zeigt sich die Verteilung der HV über die vier Schichten. Es ist keine Steigerung der Härte über die vier Schichten zu erkennen. Die zweite Schicht mit Alterung wies die höchste Härte auf. Bei diesem Material lagen die Härtewerte der Proben nach Alterung für jede Schicht höher als die Werte der ungealterten Proben. Als einzige Ausnahme ließen sich in der ersten Schicht geringere Festigkeitswerte nach der Alterung als vor der Alterung feststellen.

Im paarweisen Mann-Whitney-U-Test zeigte sich nach der Bonferroni-Korrektur nur ein einziger signifikanter Unterschied ( $p < 0,001$ ). Dieser lag bei ZirCAD zwischen der ersten Schicht ohne Alterung und der dritten Schicht ohne Alterung.

## Ergebnisse

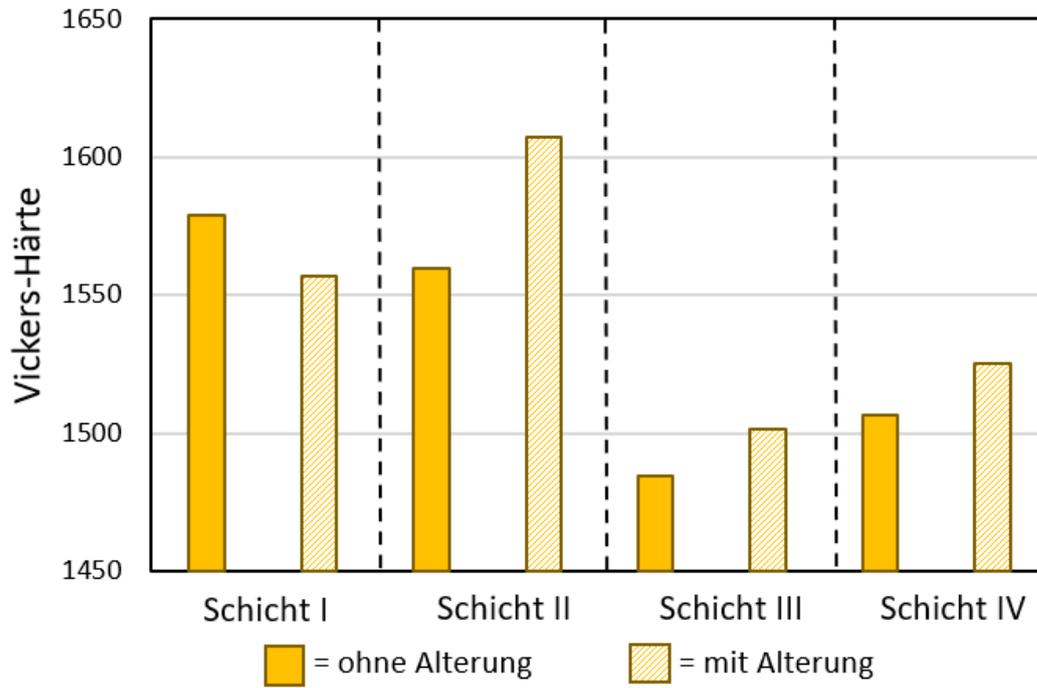


Abbildung 27: Vergleich der Härte der IPS e.max ZirCAD Prime Schichten (o.A. und m.A.)

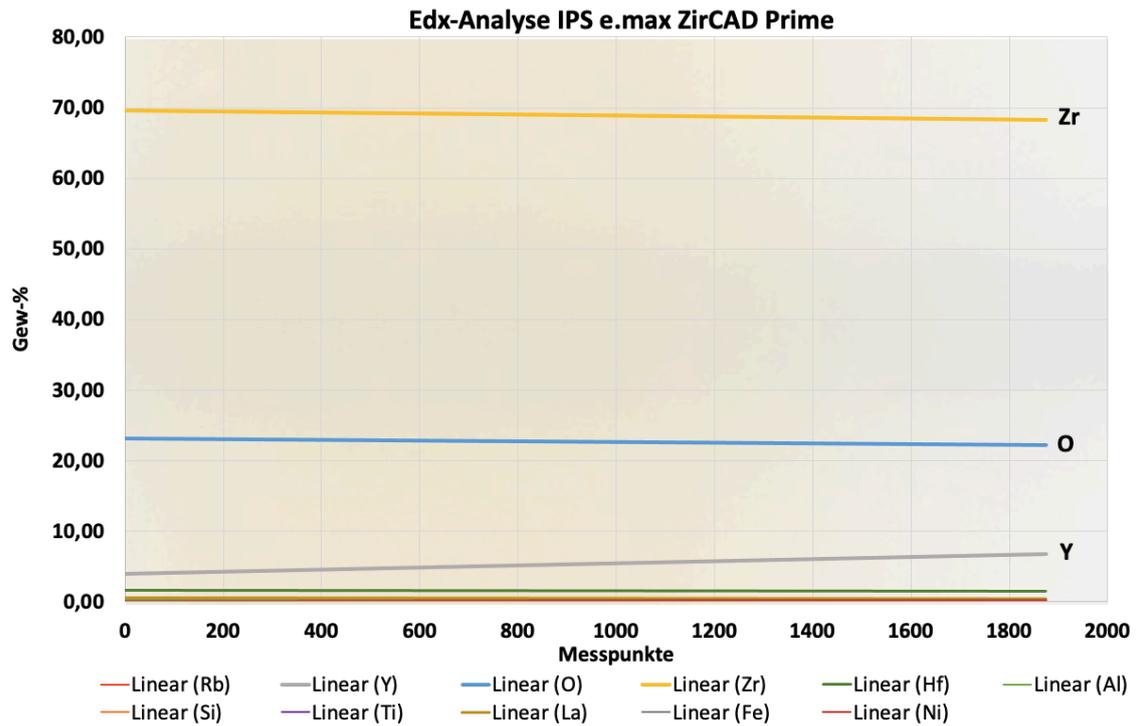
### 3.1.4 EDX

Da die Zylinder für die EDX-Analyse in Abschnitte unterteilt wurden, lagen nach durchgeführter Analyse fünf Ergebnis-Tabellen vor. Diese wurden zusammengefasst und in einem Punktdiagramm dargestellt (s. Anhang). Für die bessere Darstellung wurden die Trendlinien einzeln betrachtet und für alle Proben beispielhaft über eine Abbildung mit einem Farb- bzw. Transluzenzverlauf gelegt.

In Abbildung 28 sind die Trendlinien der in der Zirkoniumdioxidkeramik enthaltenen Elemente dargestellt. Hauptbestandteile sind das Zirkon (Zr), der Sauerstoff (O) und das Yttrium (Y). Über den Verlauf des Zylinders lässt sich ein Anstieg der Yttrium-Trendlinie erkennen (Anstieg: 0,0015). Dieser Anstieg geht einher mit der Abnahme der beiden anderen Hauptkomponenten Zirkon und Sauerstoff. Wie in dieser Abbildung dargestellt entspricht der erhöhte Yttriumanteil der Erhöhung der Transluzenz.

Neben den Ergebnis-Tabellen wurden EDX-Spektren über die gesamte Zylinderlänge erstellt. Zervikal lag der  $Y_2O_3$ -Anteil (Gew-%) bei 4.4 % und stieg bis inzisal auf 7.4 % an. Auch die zuvor beschriebene Abnahme des Zirkons und des Sauerstoffs wurde hier bestätigt. Neben den drei Hauptkomponenten der Zirkoniumdioxidkeramik ließen sich weitere Elemente in der Probe finden. Das Rubidium, Hafnium, Aluminium, Silizium, Titan, Eisen, Nickel und Lanthan.

# Ergebnisse



**Abbildung 28: Trendlinien der Gewichtsverteilung der einzelnen Bestandteile im IPS e.max ZirCAD Prime**

*(Transluzenzverlauf: links nach rechts entspricht cervical nach inzisal)*

*Bildquelle: Ivoclar Vivadent AG; Schaan, Liechtenstein [123], mit freundlicher Genehmigung von Jürgen Dettinger (Dipl. Ökonom, M.A.; Ivoclar Vivadent GmbH)*

### 3.2 Optimill Multilayer 3D

#### 3.2.1 Dichte

Die Dichte der Optimill Multilayer 3D Proben wurde nach demselben Verfahren getestet wie die IPS-Proben. Tabelle 5 zeigt die zusammengefassten Ergebnisse der Dichteprüfung für dieses Material.

Ohne künstliche Alterung zeigte die erste Schicht der Proben eine Dichte von  $5,817 \text{ g/cm}^3$  bis  $6,171 \text{ g/cm}^3$ .

Die darauffolgende zweite Schicht hatte eine Dichte von  $5,790 \text{ g/cm}^3$  bis  $6,402 \text{ g/cm}^3$ .

Der kleinste Wert der dritten Schicht lag bei  $5,894 \text{ g/cm}^3$ , der größte bei  $6,133 \text{ g/cm}^3$ .

In der letzten Zylinderschicht lagen die Werte bei  $5,891 \text{ g/cm}^3$  bis  $6,031 \text{ g/cm}^3$ .

Im Boxplot-Diagramm (Abbildung 29) wird deutlich, dass es eine stetig steigende Tendenz der Dichtewerte von Schicht I bis hin zu Schicht IV gibt. Die Streuung der Werte war bei den ersten beiden Schichten am größten und wurde über die dritte Schicht bis hin zur vierten Schicht immer kleiner.

Im Anschluss wurden die im Thermocycler gealterten Proben getestet.

Die oberste Schicht zeigte eine Dichte von  $5,952 \text{ g/cm}^3$  bis  $6,008 \text{ g/cm}^3$ .

Die Dichte von Schicht II lag bei  $5,683 \text{ g/cm}^3$  bis  $6,048 \text{ g/cm}^3$ .

Für die dritte Schicht lagen die Werte bei  $5,976 \text{ g/cm}^3$  bis  $6,120 \text{ g/cm}^3$ .

Die vierte Schicht hatte ihren Minimalwert bei  $5,951 \text{ g/cm}^3$  und den Maximalwert bei  $6,282 \text{ g/cm}^3$ .

Auch bei den Proben, die zuvor im Thermocycler gewesen sind, lässt sich die ansteigende Tendenz in der grafischen Darstellung im Boxplot-Diagramm erkennen (siehe Abbildung 29). Die Werte der gealterten Proben hatten eine geringe Streuung, jedoch sind bei der vierten Schicht mehr Ausreißer als bei den anderen Schichten erkennbar.

Innerhalb des Materials lagen nach Bonferroni-Korrektur signifikante Unterschiede der ersten Schicht im Vergleich zu weiteren Schichten vor ( $p < 0,001$ ). Die erste Schicht ohne Alterung unterschied sich signifikant zu der vierten Schicht ohne Alterung ( $p < 0,001$ ). Schicht 1 mit Alterung unterschied sich signifikant zu den drei weiteren Schichten mit Alterung ( $p < 0,001$ ).

Tabelle 5: Dichtewerte Dentona Optimill Multilayer 3D

	Schicht I		Schicht II		Schicht III		Schicht IV	
	o.A.	m.A.	o.A.	m.A.	o.A.	m.A.	o.A.	m.A.
<b>Min</b> [g/cm <sup>3</sup> ]	5,817	5,952	5,790	5,683	5,894	5,976	5,891	5,951
<b>Max</b> [g/cm <sup>3</sup> ]	6,171	6,008	6,402	6,048	6,133	6,120	6,031	6,282
<b>Med</b> [g/cm <sup>3</sup> ]	5,954	5,978	5,986	5,993	6,004	6,007	6,006	6,009
<b>Mean</b> [g/cm <sup>3</sup> ]	5,947	5,980	5,983	5,989	5,985	6,010	5,999	6,021
<b>SD</b> [g/cm <sup>3</sup> ]	0,024	0,011	0,108	0,060	0,053	0,026	0,029	0,060

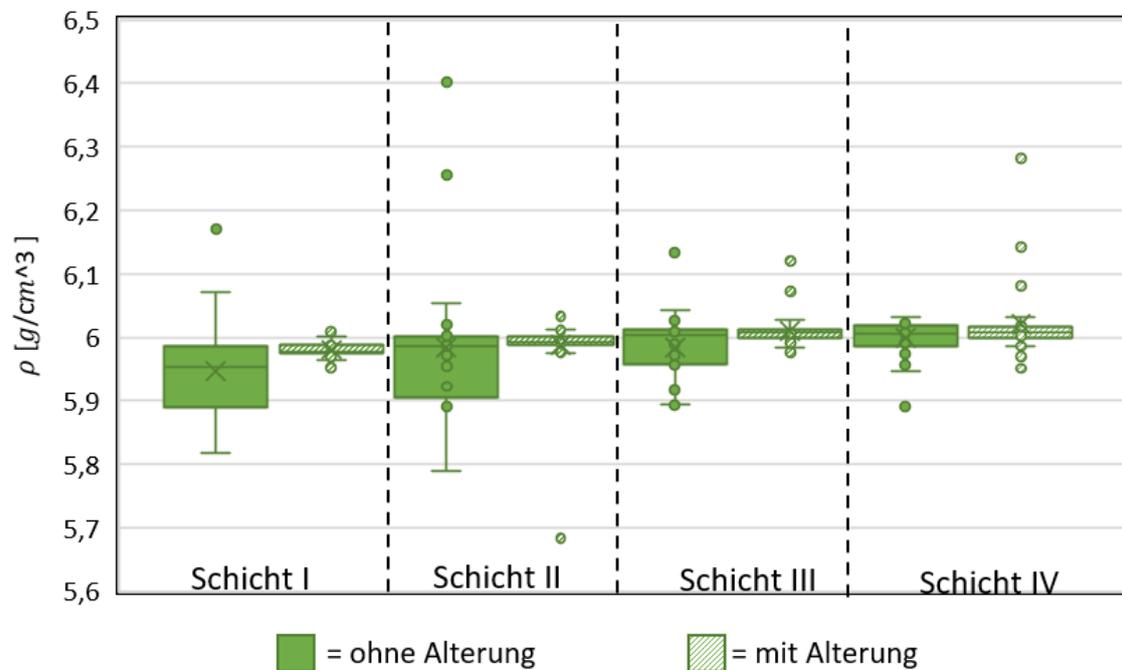


Abbildung 29: Vergleich der Dichte (und Darstellung des Medians) der Dentona Optimill Multilayer 3D Schichten (o.A. und m.A)

### 3.2.2 Biaxiale Biegefestigkeit

Alle Werte der biaxialen Biegefestigkeit sind in Abbildung 30 im Säulendiagramm dargestellt.

Bei den Optimill Multilayer 3D Proben von Dentona zeigte die erste Schicht der Proben ohne Alterung eine durchschnittliche Festigkeit von  $MW \pm SD$   $628,20 \text{ MPa} \pm 67,35 \text{ MPa}$ . Der Weibull-Modul lag bei 11,14 (Abbildung 31, links).

Die darauffolgende zweite Schicht hatte einen  $MW$   $645,16 \text{ MPa} \pm 82,18 \text{ MPa}$ . Der Weibull-Modul dieser Schicht war 9,14 (Abbildung 32, links).

$MW \pm SD$  der dritten Schicht lagen bei  $633,98 \text{ MPa} \pm 92,32 \text{ MPa}$ . Bis hin zu dieser Schicht nahm der Weibull-Modul erneut ab und erzielte einen Wert von 8,15 (Abbildung 33, links).

Die vierte Schicht der Dentona-Proben hatte ihren  $MW$  der biaxialen Biegefestigkeit bei  $625,35 \text{ MPa} \pm 103,26 \text{ MPa}$  (Abbildung 34, links). Der kleinste Weibull-Modul ließ sich in dieser Schicht mit einem Wert von 7,00 finden.

Der höchste Festigkeitswert lag somit in der zweiten Schicht. Obwohl die Werte zwischen den Schichten nur um die 20 MPa variierten, ließen sich die Unterschiede gut in dem Säulendiagramm darstellen (s. Abbildung 30).

Bei den Proben, bei denen die Alterung im Thermocycler simuliert wurde, zeigte sich eine andere Verteilung der Festigkeitswerte.

In der ersten Schicht lag der  $MW \pm SD$  der Festigkeitswerte bei  $640,30 \text{ MPa} \pm 103,12 \text{ MPa}$ .  $M=7,35$  stellte den für diese Schicht charakteristischen Weibull-Modul dar (Abbildung 31, rechts).

Es folgte Schicht II mit einem  $MW \pm SD$  der Festigkeit von  $671,92 \text{ MPa} \pm 88,26 \text{ MPa}$  und einem Weibull-Modul von 8,60 (Abbildung 32, rechts).

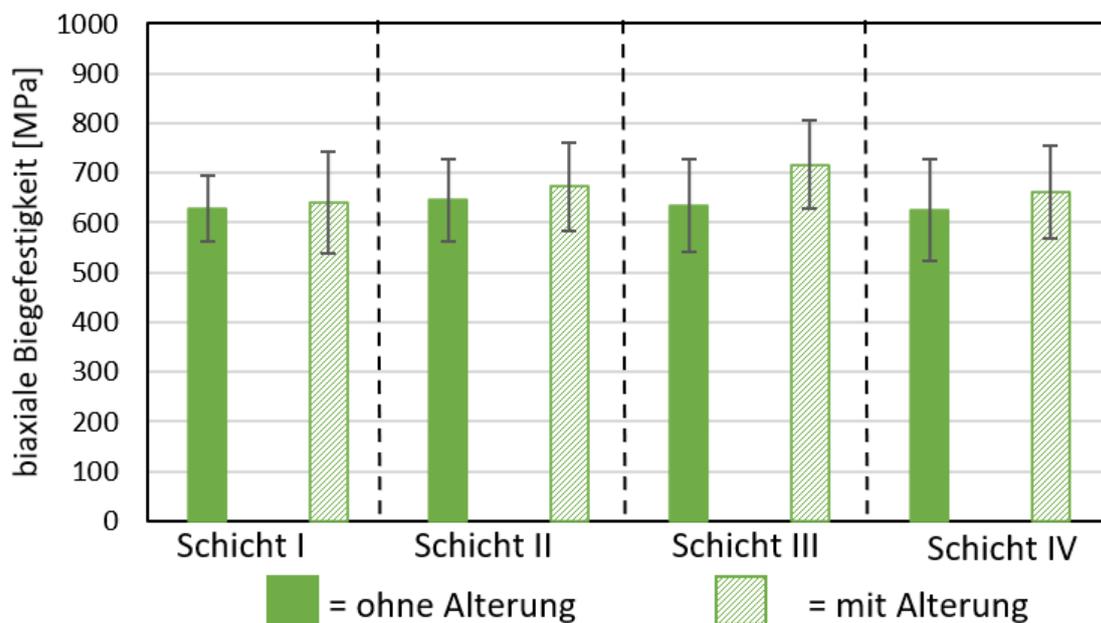
Die dritte Schicht erzielte bei den Dentona-Proben ohne Alterung mit einem  $MW$  von  $715,90 \text{ MPa}$  die höchsten Festigkeitswerte. Die  $SD$  lag bei  $89,07 \text{ MPa}$  und der Weibull-Modul bei 9,30 (Abbildung 33, rechts). Im Gegensatz zu den Proben, welche nicht gealtert wurden, lagen die höchsten Werte der biaxialen Biegeprüfung nicht in der zweiten, sondern in der dritten Schicht. Zudem lag die geringste Streuung der Werte in Schicht III vor.

## Ergebnisse

Der  $MW \pm SD$  der letzten Schicht lag bei  $661,22 \text{ MPa} \pm 92,71 \text{ MPa}$ . Der Weibull-Modul der letzten Schicht war mit  $m=8,47$  wieder etwas geringer als in der vorherigen Materialschicht (Abbildung 34, rechts).

Im dazugehörigen Säulendiagramm in Abbildung 30 zeigt sich ein stetiger Anstieg der durchschnittlichen Festigkeitswerte von Schicht I bis hin zu Schicht III. Mit dem MW von  $715,9 \text{ MPa}$  hatte das Material seine maximale Festigkeit innerhalb der dritten Materialschicht. Bis hin zur vierten Schicht nahmen die Festigkeitswerte ungefähr  $55 \text{ MPa}$  ab und fielen auf durchschnittlich  $661,22 \text{ MPa}$ .

Bei der statistischen Auswertung zeigten sich nach der Bonferroni-Korrektur keine signifikanten Unterschiede innerhalb der vier Schichten des Materials ( $p>0,001$ ).



**Abbildung 30: Vergleich der biaxialen Biegefestigkeit der Dentona Optimill Multilayer 3D Schichten (o.A. und m.A)**

# Ergebnisse

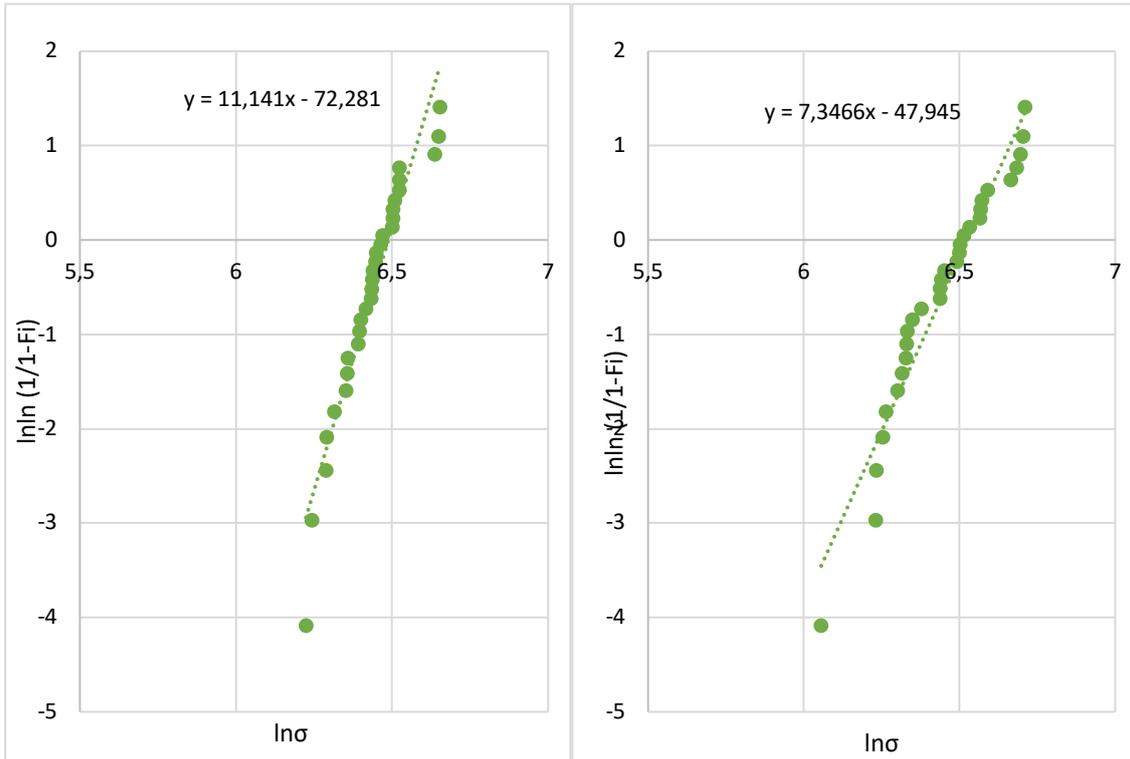


Abbildung 31: Streuung der Dentona-Festigkeitswerte (Schicht I; links: o.A., rechts: m.A.)

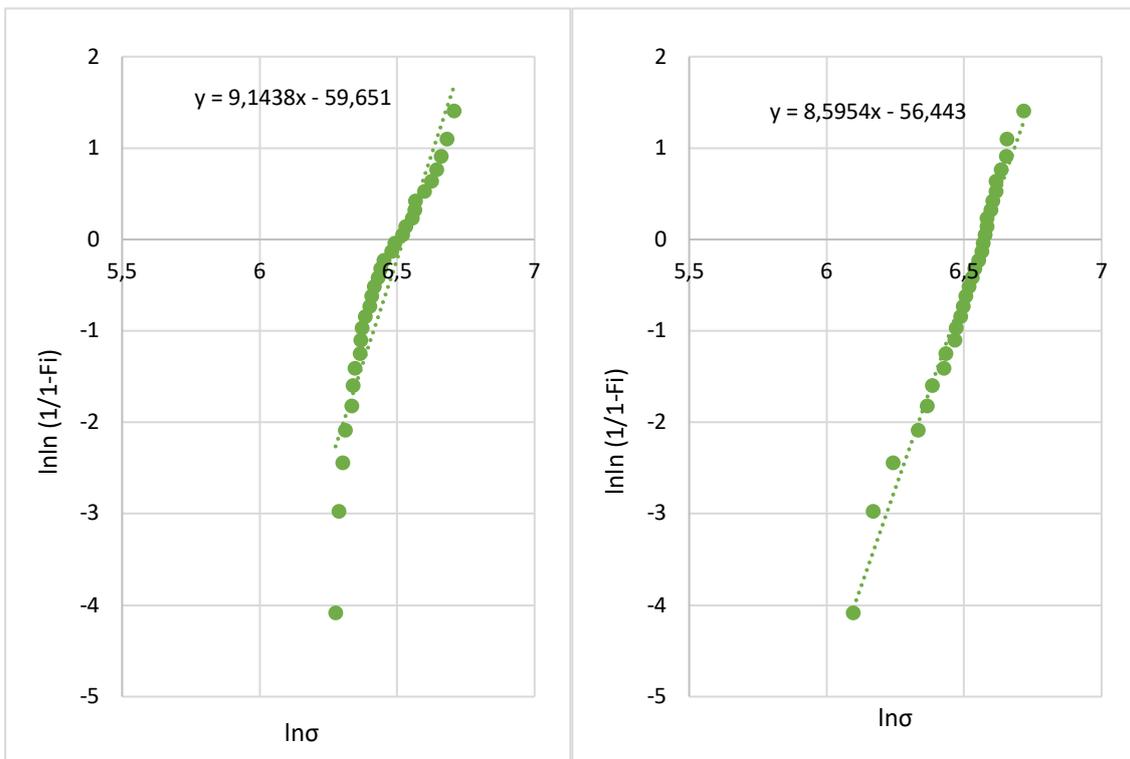


Abbildung 32: Streuung der Dentona-Festigkeitswerte (Schicht II; links: o.A., rechts: m.A.)

# Ergebnisse

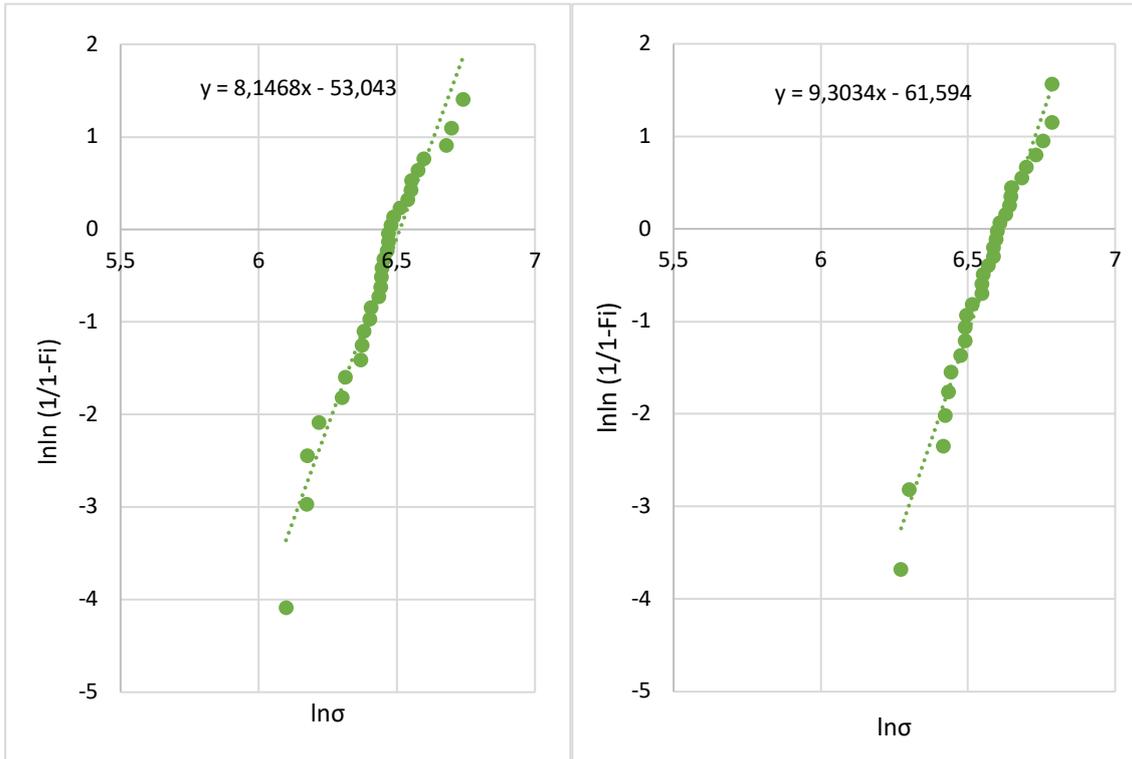


Abbildung 33: Streuung der Dentona-Festigkeitswerte (Schicht III; links: o.A., rechts: m.A.)

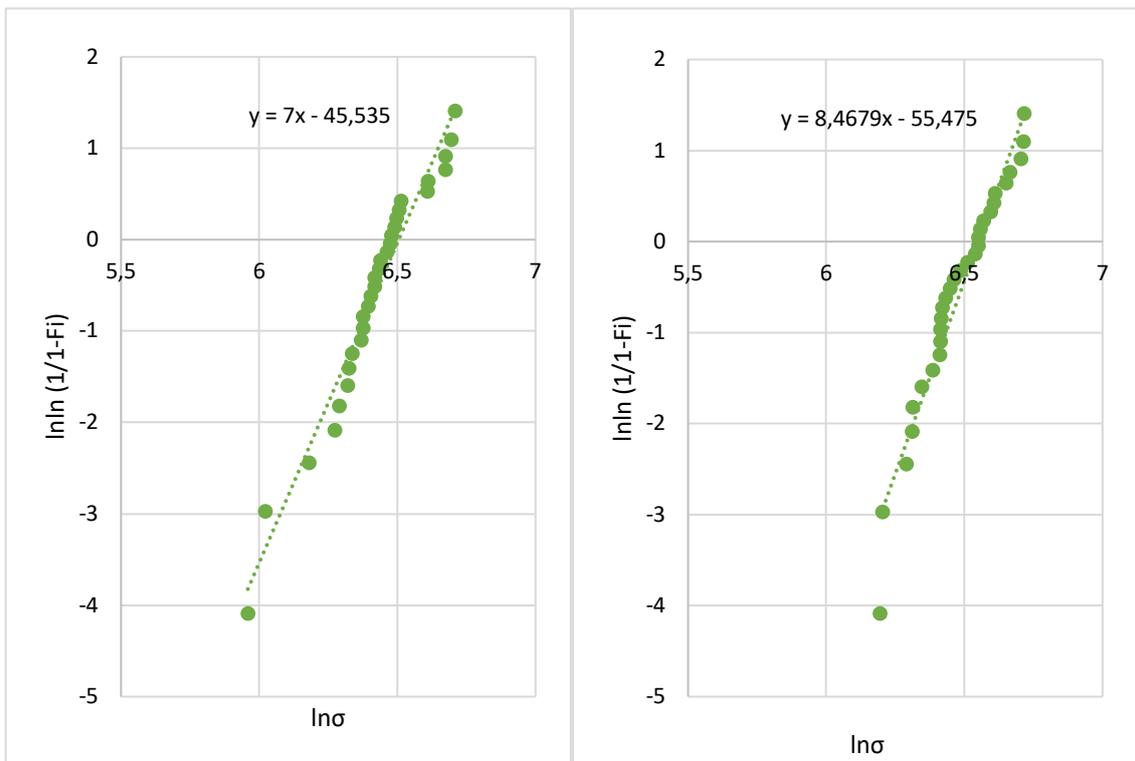


Abbildung 34: Streuung der Dentona-Festigkeitswerte (Schicht VI; links: o.A., rechts: m.A.)

### 3.2.3 Härte

Auch hier wurden erst die Proben ohne Alterung getestet, bevor die gealterten Proben getestet wurden. Die Ergebnisse sind in der Abbildung 35 dargestellt.

Die erste Schicht der nicht gealterten Proben erzielte eine durchschnittliche HV  $\pm$  SD von  $1534,48 \pm 20,73$ .

In der darauffolgenden zweiten Schicht lag der MW der HV bei 1560,62. Die SD lag bei 31,02.

Schicht III hatte im Schnitt eine HV  $\pm$  SD von  $1532,98 \pm 128,64$ .

Die letzte Schicht der Optimill-Proben hatte eine durchschnittliche HV von 1522,95. Die SD lag bei 74,15.

Somit lagen die Härtewerte der ungealterten Dentona-Proben ungefähr im selben Bereich.

Es folgte die Testung der Proben, welche zuvor im Thermocycler gewesen sind.

HV  $\pm$  SD der ersten Schicht lag bei  $1519,52 \pm 50,21$ .

In der darauffolgenden zweiten Schicht lag der Härtewert mit 1515,1 HV nur gering unter dem der ersten Schicht. Hier betrug die SD 28,42.

Die dritte Schicht hatte eine HV  $\pm$  SD von  $1514,49 \pm 26,15$ .

Schicht vier erzielte eine Härte, welche im Schnitt bei 1523,26 HV lag. Die SD betrug 33,46.

Wie bei den Proben, welche keine Alterung erfuhren, lagen die Mittelwerte der HV in einem ähnlichen Bereich.

Im Kolmogorov-Smirnov-Test zeigte sich, dass die Verteilung der Härtewerte innerhalb der Dentona-Proben nicht normalverteilt sind ( $p=0,039$ ). Im Mann-Whitney-U-Test lagen nach Bonferroni-Korrektur jedoch keine signifikanten Unterschiede vor ( $p<0,001$ ).

## Ergebnisse

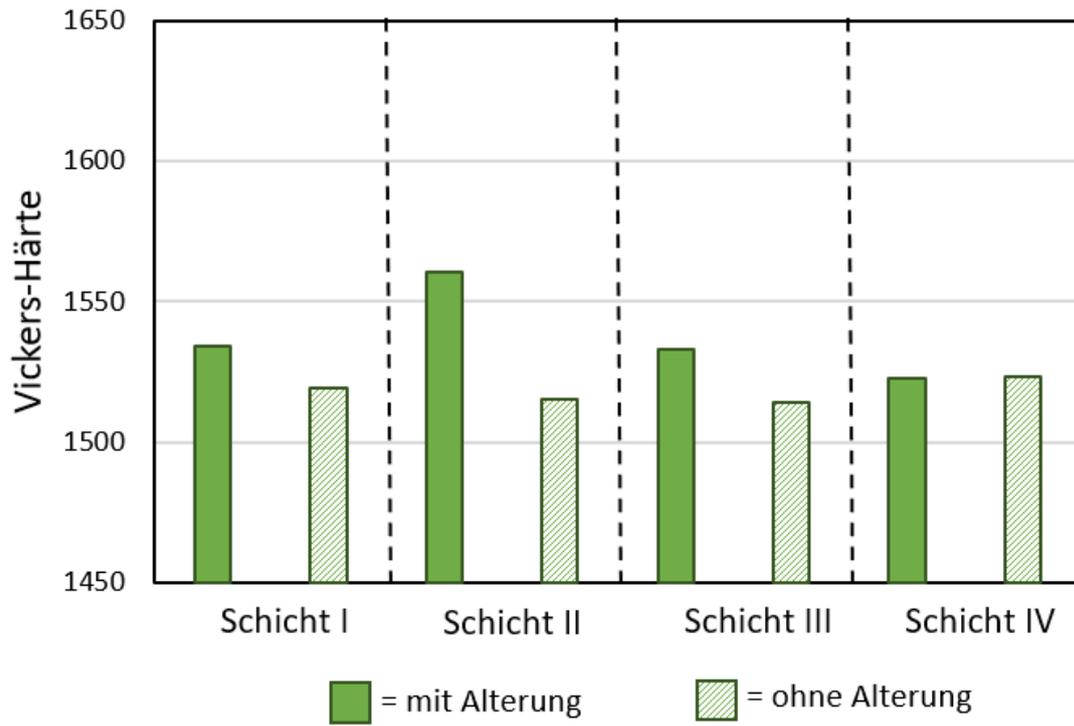


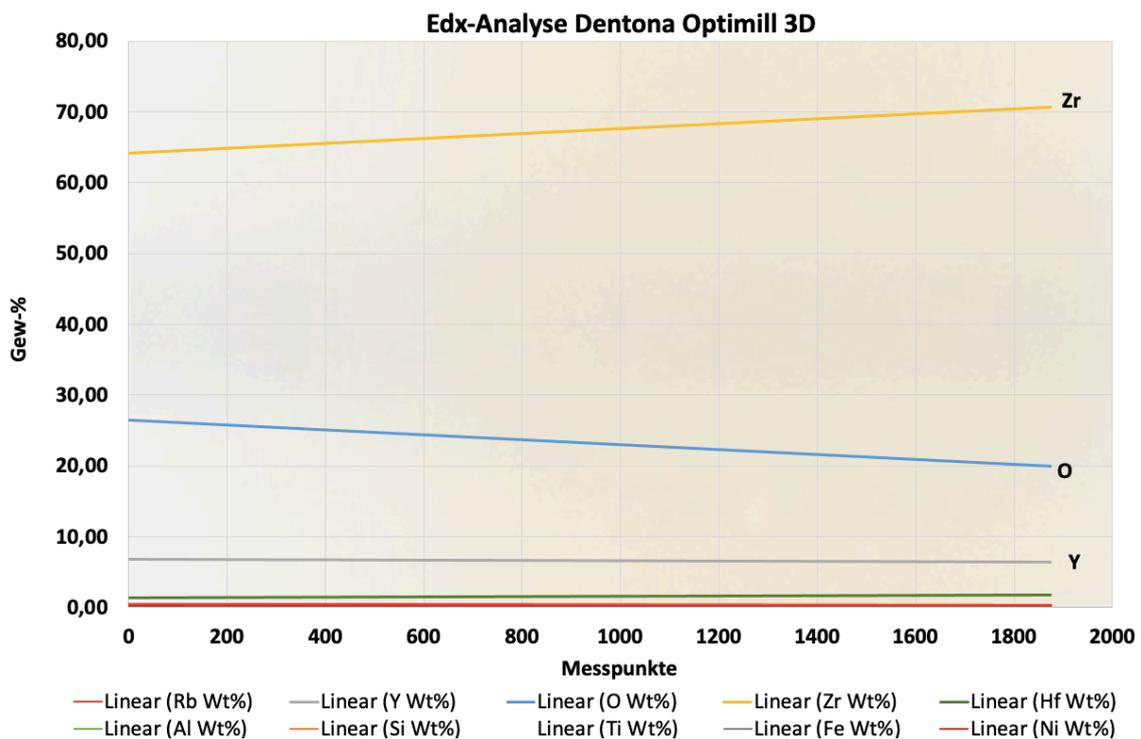
Abbildung 35: Vergleich der Härte der Dentona Optimill Multilayer 3D Schichten (o.A. und m.A)

### 3.2.4 EDX

Auch die Dentona-Proben wurde in fünf Abschnitte unterteilt und nach demselben Schema dargestellt wie die IPS-Proben. Da die Probe von inzisal nach zervikal geprüft wurde, wurde das beispielhafte Bild mit dem Farbverlauf andersherum hinter die Trendlinien gelegt. Es zeigt sich, dass es keine wesentliche Änderung des Yttrium-Anteils im Verlauf der Probe gab. Der Yttrium-Anteil blieb nahezu konstant (Anstieg ist annähernd Null). Im Gegensatz dazu nahm der Zirkonanteil von zervikal nach inzisal ab, während der Sauerstoffanteil zunahm (Abbildung 36).

Die Konstanz des Yttrium-Anteils wurde mit dem EDX-Spektrum bestätigt. Zervikal lag der Anteil bei 6,7 % und stieg nach inzisal um 0,4 % auf 7,1 % (s. Abbildung 36).

Auch in der Dentona-Probe waren neben den drei Hauptkomponenten weitere Elemente enthalten. Wie in der Ivoclar-Probe waren Rubidium, Hafnium, Aluminium, Silizium, Titan, Eisen und Nickel vorhanden. Lanthan war hier nicht enthalten.



**Abbildung 36: Trendlinien der Gewichtsverteilung der einzelnen Bestandteile im Dentona Optimill Multilayer 3D**

*(Transluzenzverlauf: links nach rechts entspricht inzisal nach cervical)*

*Bildquelle: Ivoclar Vivadent AG; Schaan, Liechtenstein [123], mit freundlicher Genehmigung von Jürgen Dettinger (Dipl. Ökonom, M.A.; Ivoclar Vivadent GmbH)*

### 3.3 Ceramill zolid fx multilayer

#### 3.3.1 Dichte

Eine tabellarische Zusammenfassung der Ergebnisse findet sich in Tabelle 6.

Hier werden zunächst die Ergebnisse der Proben ohne künstliche Alterung aufgezeigt. Schicht I hatte eine Dichte von  $5,950 \text{ g/cm}^3$  bis  $6,063 \text{ g/cm}^3$ .

In der zweiten Schicht stellte  $5,946 \text{ g/cm}^3$  den kleinsten Wert dar und  $6,014 \text{ g/cm}^3$  den größten.

Bei der darauffolgenden dritten Schicht betrug die Dichte  $5,974 \text{ g/cm}^3$  bis  $6,041 \text{ g/cm}^3$ .

In der letzten Schicht der Proben ohne Alterung lagen die Werte bei  $5,992 \text{ g/cm}^3$  bis  $6,063 \text{ g/cm}^3$ .

In der grafischen Darstellung dieser Ergebnisse (Abbildung 37) zeigt sich im Gegensatz zu den Materialien IPS e.max ZirCAD Prime und Dentona Optimill Multilayer 3D keine erhebliche Steigerung der Dichtewerte von der ersten Schicht bis hin zur vierten Schicht. Die Streuung der Werte bewegte sich in einem kleinen Bereich.

Die Dichte der ersten Schicht der Proben mit Alterung hatte den kleinsten Wert bei  $5,958 \text{ g/cm}^3$  und den höchsten Wert bei  $6,025 \text{ g/cm}^3$ .

Es folgte die Testung der zweiten Schicht, welche ihr Minimum bei  $5,960 \text{ g/cm}^3$  und ihr Maximum bei  $6,139 \text{ g/cm}^3$  erzielte.

Bei der dritten Schicht der Ceramill-Proben lag die Dichte bei  $5,944 \text{ g/cm}^3$  bis  $6,043 \text{ g/cm}^3$ .

Die letzte Dichtepfung war die der vierten Schicht. Die Dichte betrug  $5,926 \text{ g/cm}^3$  bis  $6,046 \text{ g/cm}^3$ .

Bei der grafischen Darstellung im Boxplot-Diagramm zeigt sich eine leichte, kontinuierlich ansteigende Tendenz der Dichtewerte von Schicht I bis hin zu Schicht IV. Wie bei dem Ceramill zolid fx multilayer Proben, welche nicht gealtert wurden, war auch hier die Streuung der Dichtewerte mit einem maximalen Unterschied von  $0,179 \text{ g/cm}^3$  (in der zweiten Schicht o.A.) im Vergleich zu den anderen Probengruppen gering.

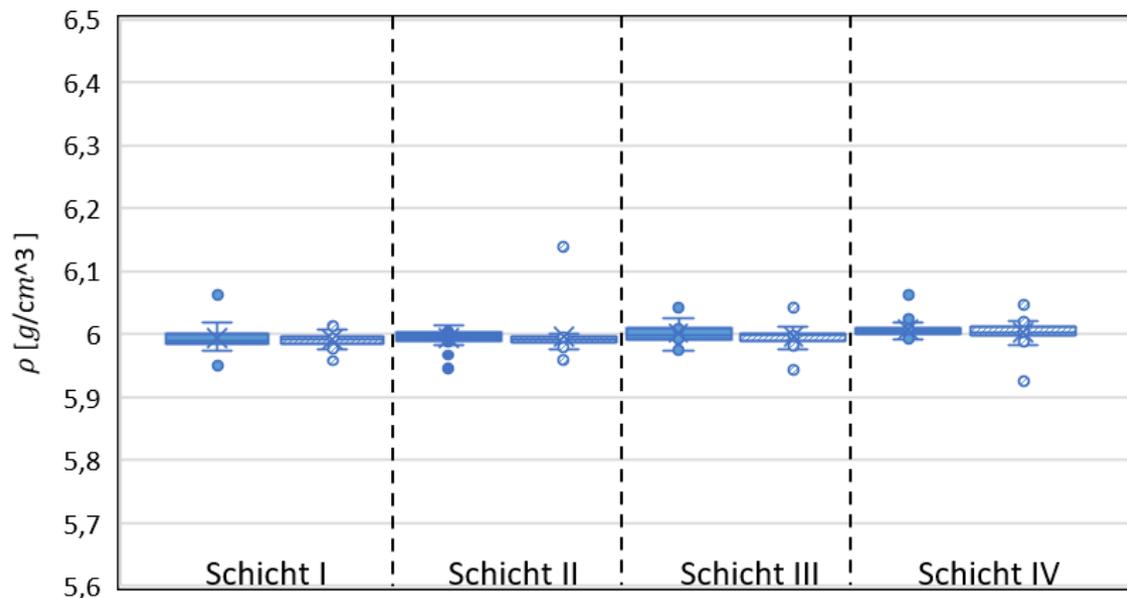
Im Vergleich der Proben aus dem Thermocycler zu den Proben ohne thermischen Einfluss zeigten sich weder bei der Verteilung noch bei der Streuung der Werte starke Unterschiede (s. Abbildung 37).

## Ergebnisse

Im Mann-Whitney-U-Test waren nach Bonferroni-Korrektur signifikante Unterschiede der Dichtewerte der ersten und zweiten Schicht (mit und ohne Alterung) zur letzten Schicht (mit und ohne Alterung) erkennbar ( $p < 0,001$  und  $p = 0,001$ ).

**Tabelle 6: Dichtewerte Ceramill zolid fx multilayer**

	Schicht I		Schicht II		Schicht III		Schicht IV	
	o.A.	m.A.	o.A.	m.A.	o.A.	m.A.	o.A.	m.A.
<b>Min</b> [g/cm <sup>3</sup> ]	5,950	5,958	5,946	5,960	5,974	5,944	5,992	5,926
<b>Max</b> [g/cm <sup>3</sup> ]	6,063	6,025	6,014	6,139	6,041	6,043	6,063	6,046
<b>Med</b> [g/cm <sup>3</sup> ]	5,990	5,991	5,994	5,998	5,999	5,998	6,005	6,003
<b>Mean</b> [g/cm <sup>3</sup> ]	5,994	5,992	5,994	5,995	6,002	5,996	6,007	6,003
<b>SD</b> [g/cm <sup>3</sup> ]	0,022	0,014	0,013	0,029	0,015	0,015	0,013	0,019



= ohne Alterung     
  = mit Alterung

**Abbildung 37: Vergleich der Dichte (und Darstellung des Medians) der Ceramill zolid fx multilayer Schichten (o.A. und m.A.)**

### 3.3.2 Biaxiale Biegefestigkeit

Wie bei den beiden vorherigen Materialien wurden zunächst die Proben ohne Alterung geprüft. Eine grafische Übersicht über die Ergebnisse ist in Abbildung 38 dargestellt.

Die erste Schicht hatte einen MW  $\pm$  SD von 643,88 MPa  $\pm$  83,08 MPa. Der Weibull-Modul dieser Schicht war 9,07 (Abbildung 39, links).

Es folgte die zweite Materialschicht mit einer durchschnittlichen HV von 650,17 MPa  $\pm$  75,42 MPa und einem Weibull-Modul von 10,20 (Abbildung 40, links).

Die Festigkeiten dieser Schicht waren die größten innerhalb der verschiedenen Schichten ohne Alterung. Dazu kommt, dass der Weibull-Modul der höchste war und somit die geringste Streuung der Festigkeitswerte in Schicht II festzustellen war.

Die Schicht III erzielte einen MW  $\pm$  SD von 643,01  $\pm$  84,54 MPa. Der Weibull-Modul dieser Proben lag bei 8,70 (Abbildung 41, links).

Schicht IV hatte einen MW  $\pm$  SD 576,05 MPa  $\pm$  94,16 MPa und ein Weibull-Modul von 6,64 (Abbildung 42, links).

Die grafische Darstellung lässt deutlich erkennen, dass die Festigkeitswerte der ersten drei Schichten ähnlich waren, die Werte der vierten Materialschicht jedoch darunter lagen.

Im Anschluss erfolgte die Prüfung der Proben, welche im Thermocycler gewesen sind.

Schicht I erzielte Festigkeitswerte von MW  $\pm$  SD von 607,69 MPa  $\pm$  80,11 MPa und einen Weibull-Modul von 8,49 (Abbildung 39, rechts).

In der zweiten Schicht lag der MW bei 659,14 MPa, die SD bei 103,40 MPa und der Weibull-Modul bei 10,34 (Abbildung 40, rechts).

Es folgt die dritte Materialschicht, welche mit einem Wert von 673,47 MPa  $\pm$  79,93 MPa die höchste durchschnittliche Festigkeit aufwies. Der dazugehörige Weibull-Modul war 10,04 (Abbildung 41, rechts).

Der geringste Festigkeits-Mittelwert ließ sich mit 602,44 MPa in der letzten Schicht verordnen. Die SD lag bei 97,59 MPa und der dazugehörige Weibull-Modul war  $m=$  13,58 (Abbildung 42, rechts).

Wie im Säulendiagramm (Abbildung 38) erkennbar, nahm die Festigkeit von Schicht I bis hin zu Schicht III zu. Hin zu Schicht IV gab es jedoch einen starken Abfall der Festigkeit von ungefähr 71 MPa auf den geringsten durchschnittlichen Festigkeitswert der vier Schichten.

## Ergebnisse

Im Vergleich der Proben ohne und mit Alterung fiel auf, dass der geringste Festigkeitswert der Ceramill-Proben jeweils bei der Schicht 4 erzielt wurde.

Innerhalb der Werte für die Biegefestigkeit zeigten sich im Mann-Whitney-U-Test nach Bonferroni-Korrektur keine signifikanten Unterschiede innerhalb der Ceramill-Proben ( $p > 0,001$ ).

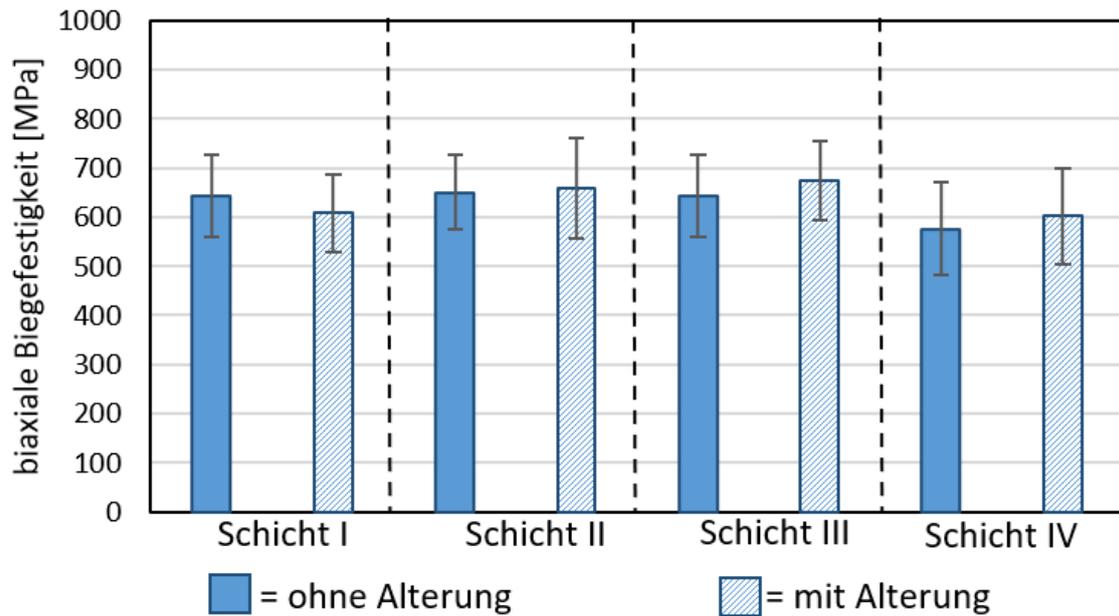


Abbildung 38: Vergleich der biaxialen Biegefestigkeit Ceramill zolid fx multilayer Schichten (o.A. und m.A.)

# Ergebnisse

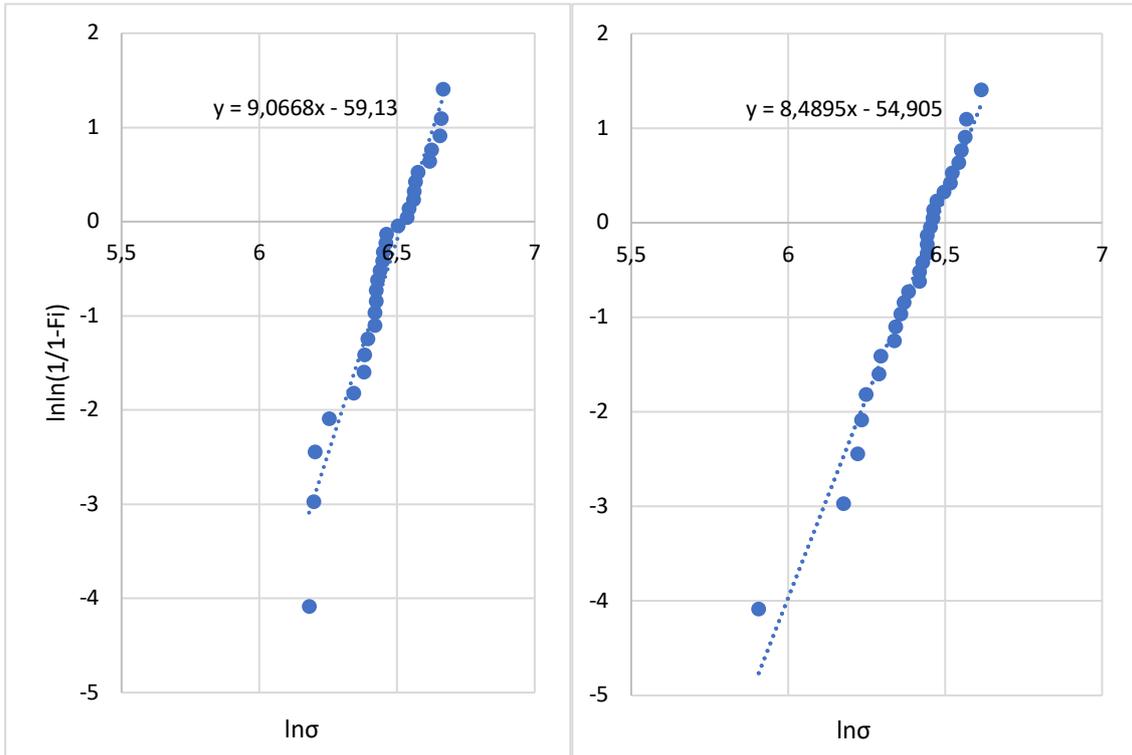


Abbildung 39: Streuung der Ceramill-Festigkeitswerte (Schicht I; links: o.A., rechts: m.A.)

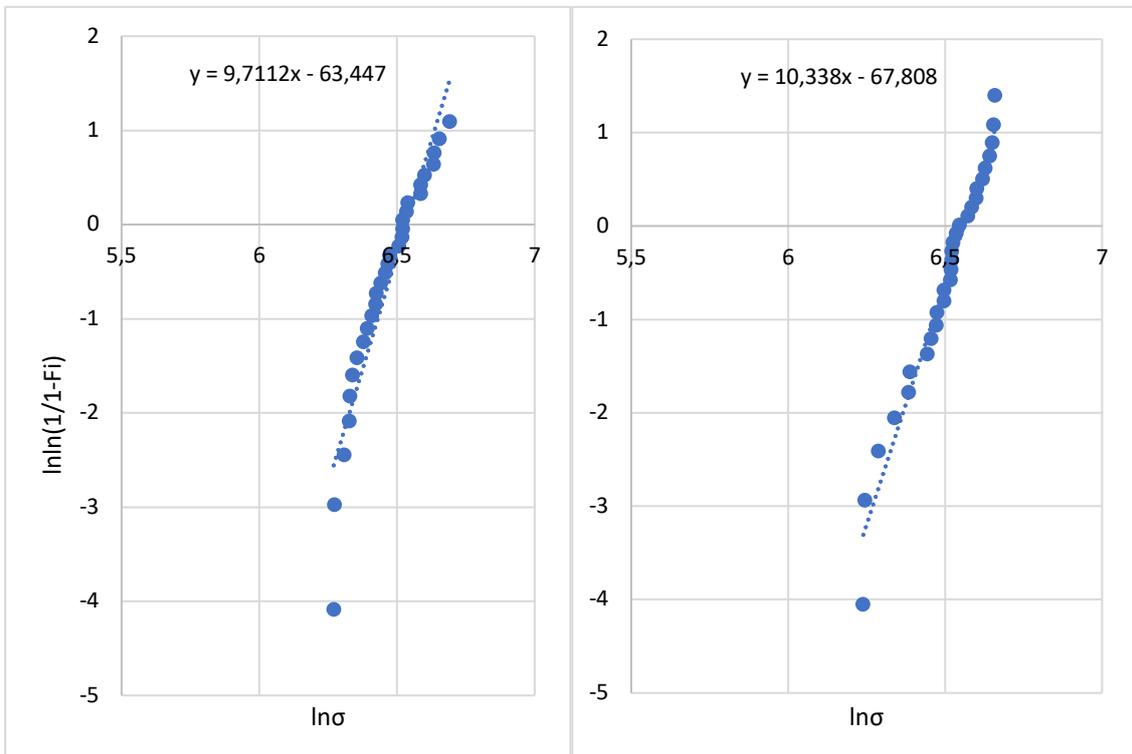


Abbildung 40: Streuung der Ceramill-Festigkeitswerte (Schicht II; links: o.A., rechts: m.A.)

# Ergebnisse

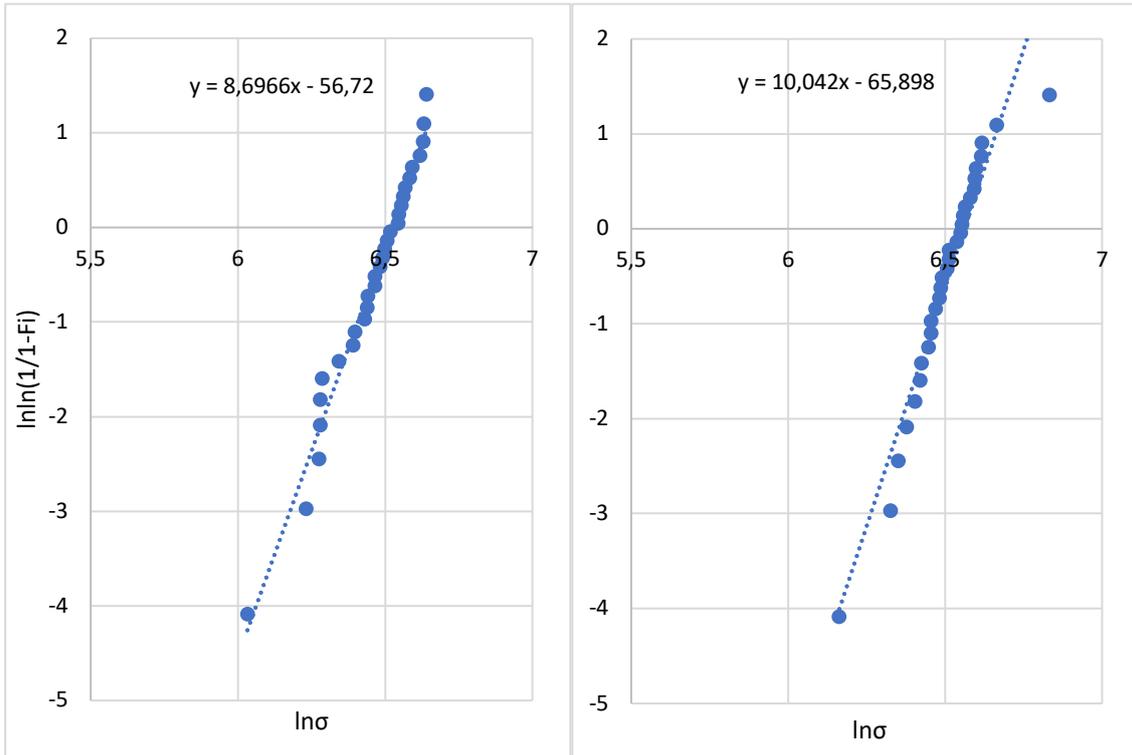


Abbildung 41: Streuung der Ceramill-Festigkeitswerte (Schicht III; links: o.A., rechts: m.A.)

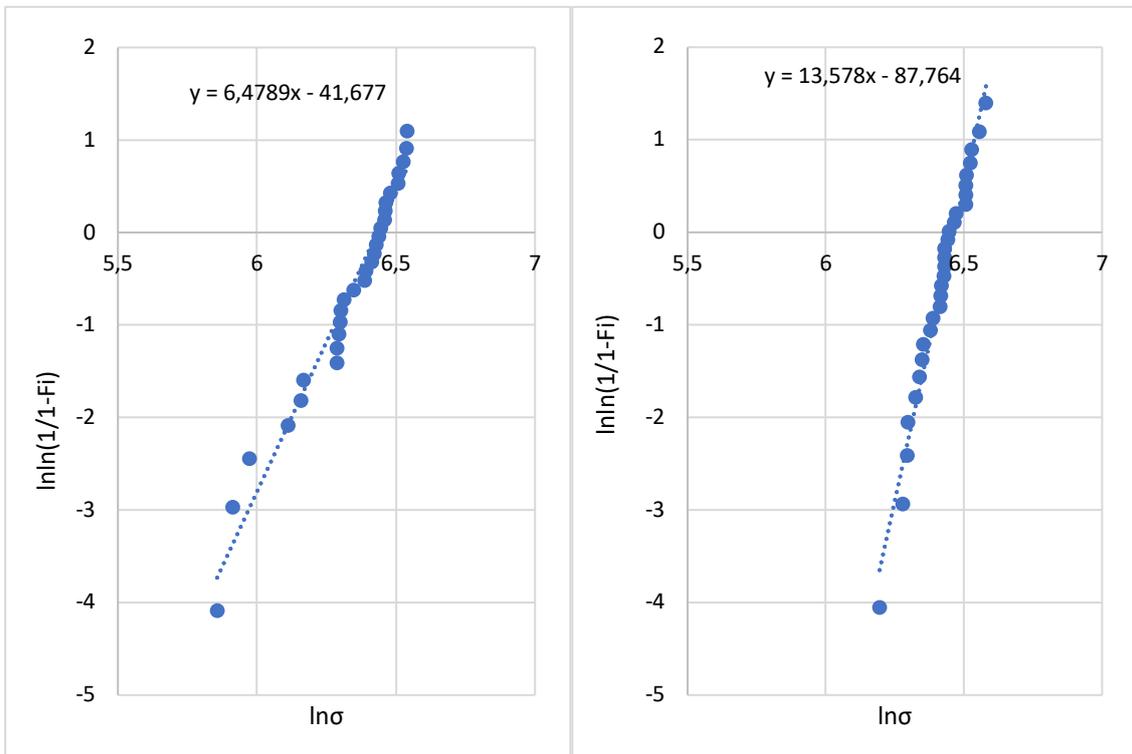


Abbildung 42: Streuung der Ceramill-Festigkeitswerte (Schicht VI; links: o.A., rechts: m.A.)

### 3.3.3 Härte

Der MW der HV der ersten Schicht ohne Alterung lag bei 1543,81, die SD bei 38,02.

In der zweiten Schicht betrug die durchschnittliche HV  $\pm$  SD 1539,84  $\pm$  32,25.

Schicht III hatte eine mittlere HV von 1520,19 mit einer SD von 52,83.

In der zervikalen Schicht lag der MW der Härte bei 1552,00 HV mit einer SD von 28,10.

Für die Proben ohne Alterseinfluss ließ sich keine konstante an- oder absteigende Tendenz der Härte erkennen. Die Härte fiel von der ersten bis zur dritten Schicht um 23,63 ab. Die letzte Schicht wies die höchste mittlere Härte auf.

Die erste Schicht der Proben, die im Thermocycler waren, erzielte eine HV  $\pm$  SD von 1538,54  $\pm$  24,11.

Es folgte die zweite Schicht mit einer mittleren Härte von 1550,11 HV. Die SD betrug 30,77.

In der dritten Schicht der Ceramill-Proben mit Alterung lag der MW  $\pm$  SD bei 2540,67  $\pm$  38,80.

Schicht IV hatte eine mittlere Härte von 1543,96 HV mit einer SD von 27,88.

Auch bei den gealterten Proben war keine steigende oder fallende Tendenz der Härtewerte über die Schichten hinweg zu erkennen. Schicht I hatte den niedrigsten MW, die darauffolgende zweite Schicht den höchsten.

In Abbildung 43 sind die Ergebnisse der Härteprüfung der Ceramill-Proben zusammengefasst.

Im Kruskal-Wallis-Test zeigte sich kein signifikanter Unterschied innerhalb der Schichten ( $p > 0,05$ ).

## Ergebnisse

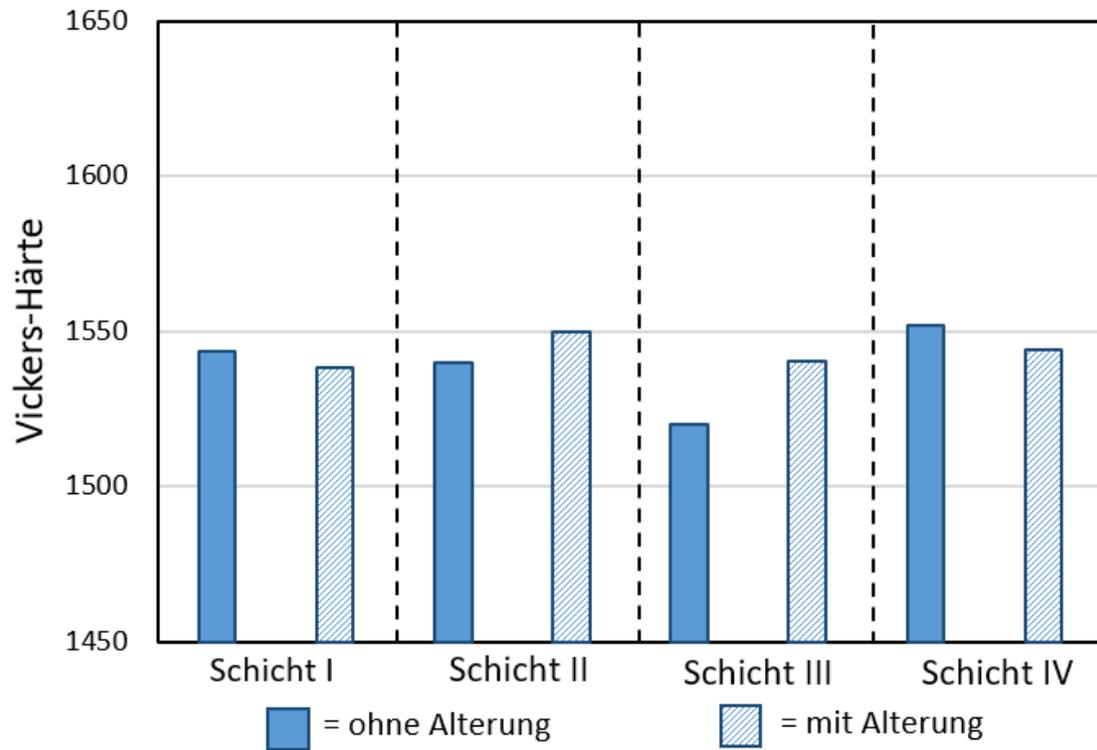


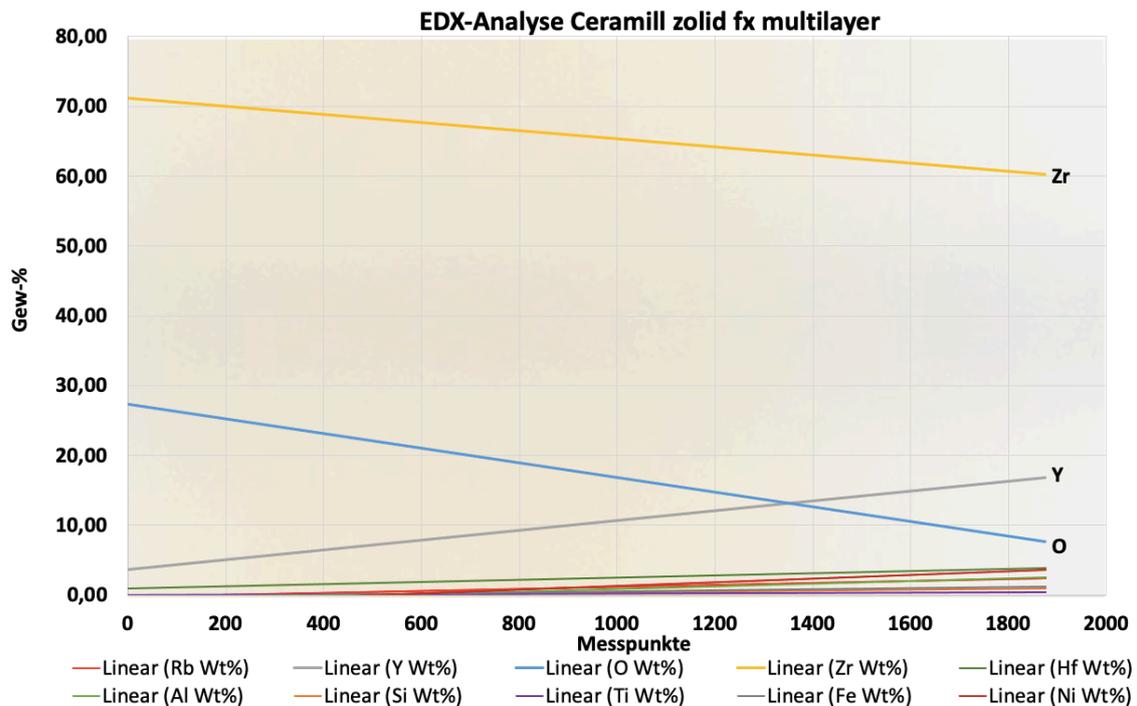
Abbildung 43: Vergleich der Härte der Ceramill zolid fx multilayer Schichten (o.A. und m.A.)

## Ergebnisse

### 3.3.4 EDX

In Abbildung 44 zeigt sich zum einen die starke Abnahme des Zirkon- und Sauerstoff-Anteils von zervikal nach inzisal. Dahingegen nahm die Menge am Yttrium stark zu (Anstieg: 0,007). Somit wies das Material Ceramill zolid fx multilayer im Hinblick auf den Yttrium-Anteil den größten Unterschied innerhalb des geprüften Zylinders auf. Mit einem Wert von 6,7 % am zervikalen Ende und einem Wert von 16,5 % am inzisalen Ende der Probe wurde der große Unterschied auch in dem EDX-Spektrum deutlich.

Die Elemente Rubidium, Hafnium, Aluminium, Silizium, Titan, Eisen und Nickel waren auch in dieser Probe vorhanden, während das Lanthan nicht vorhanden war.



**Abbildung 44: Trendlinien der Gewichtsverteilung der einzelnen Bestandteile im Ceramill zolid fx multilayer**

*(Transluzenzverlauf: links nach rechts entspricht cervical nach inzisal;*

*Bildquelle: Ivoclar Vivadent AG; Schaan, Liechtenstein [123], mit freundlicher Genehmigung von Jürgen Dettinger (Dipl. Ökonom, M.A.; Ivoclar Vivadent GmbH)*

### 3.4 Vergleich der Materialien

#### 3.4.1 Vergleich der Dichte

Bei dem Vergleich der Dichtewerte der drei Materialien zeigten sich nach Bonferroni-Korrektur signifikante Unterschiede ( $p < 0,001$ ). Die zweite und dritte Schicht (je mit und ohne Alterung) der ZirCAD-Proben unterschieden sich von der zweiten und dritten Schicht (je mit und ohne Alterung) der Dentona- und Ceramill-Proben (jeweils  $p < 0,001$ ). Zudem unterschied sich die vierte ZirCAD-Schicht mit Alterung von den vierten Schichten mit Alterung der Dentona- und Ceramill-Proben ( $p < 0,001$ ).

Im Vergleich der Dentona- und Ceramill-Proben unterschieden sich die jeweiligen ersten Schichten (mit und ohne Alterung) zueinander ( $p < 0,001$ ). Ein weiterer signifikanter Unterschied war zwischen der dritten Schicht mit Alterung von Dentona zu der dritten Schicht mit Alterung von Ceramill zu finden ( $p < 0,001$ ).

In Abbildung 45 und Abbildung 46 ist der Vergleich der einzelnen Schichten der Materialien untereinander dargestellt. Die Boxen sind der Legende entsprechend nacheinander angeordnet. „I“ steht für die IPS-Proben, „D“ für die Dentona-Proben und „C“ für die Ceramill-Proben. Das „S“ in der Legende beschreibt die entsprechende Schicht.

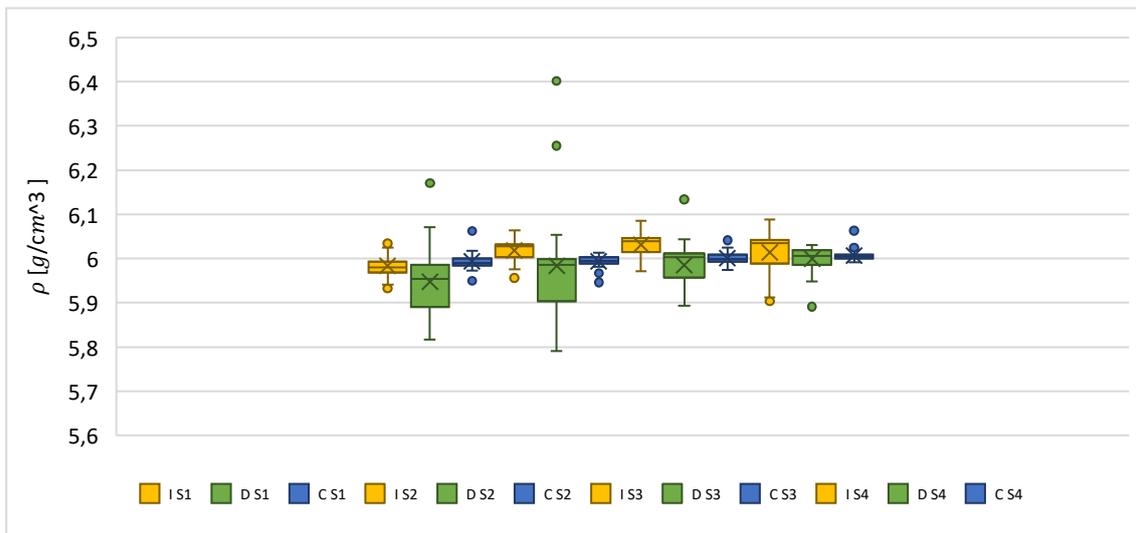


Abbildung 45: Vergleich der Dichte o.A.

## Ergebnisse

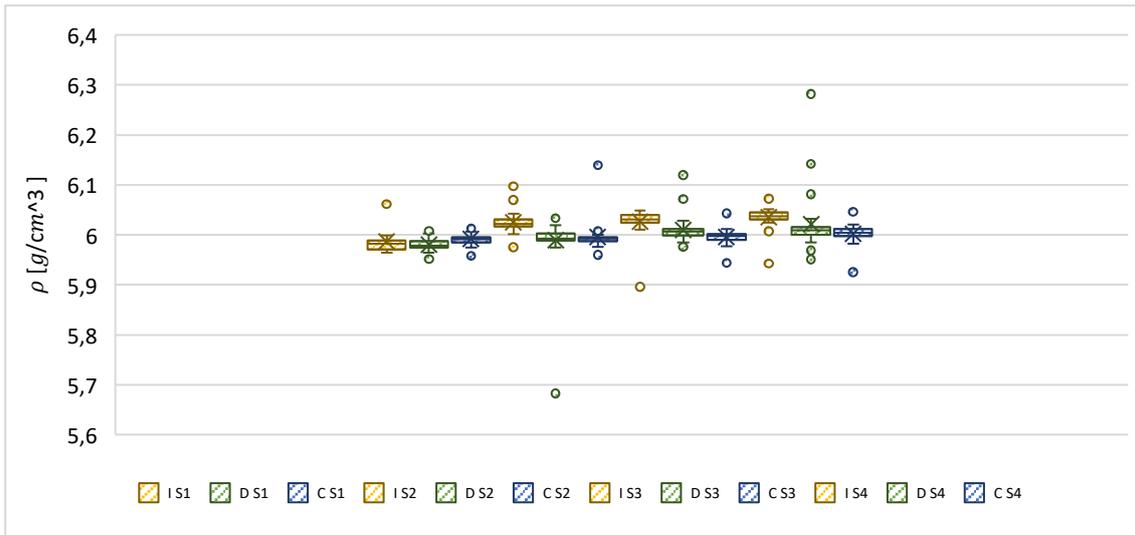


Abbildung 46: Vergleich der Dichte m.A.

### 3.4.2 Vergleich der biaxialen Biegefestigkeit

Im Vergleich zu den Dentona- und Ceramill-Proben gab es jeweils signifikante Unterschiede nach Bonferroni zwischen der ersten ZirCAD-Schicht (mit und ohne Alterung) zu den ersten Schichten (mit und ohne Alterung) der anderen beiden Gruppen (jeweils  $p < 0,001$ ). Auch die letzte Schicht unterschied sich signifikant zu den letzten Schichten der zwei weiteren Materialien (mit und ohne Alterung) (jeweils  $p < 0,001$ ).

Die Werte der biaxialen Biegefestigkeit der Dentona- und der Ceramill-Proben zeigten keine signifikanten Unterschiede ( $p > 0,001$ ).

Abbildung 47 stellt den Vergleich der Biegefestigkeit ohne Alterung dar und Abbildung 48 zeigt den Vergleich nach dem Einfluss künstlicher Alterung.

# Ergebnisse

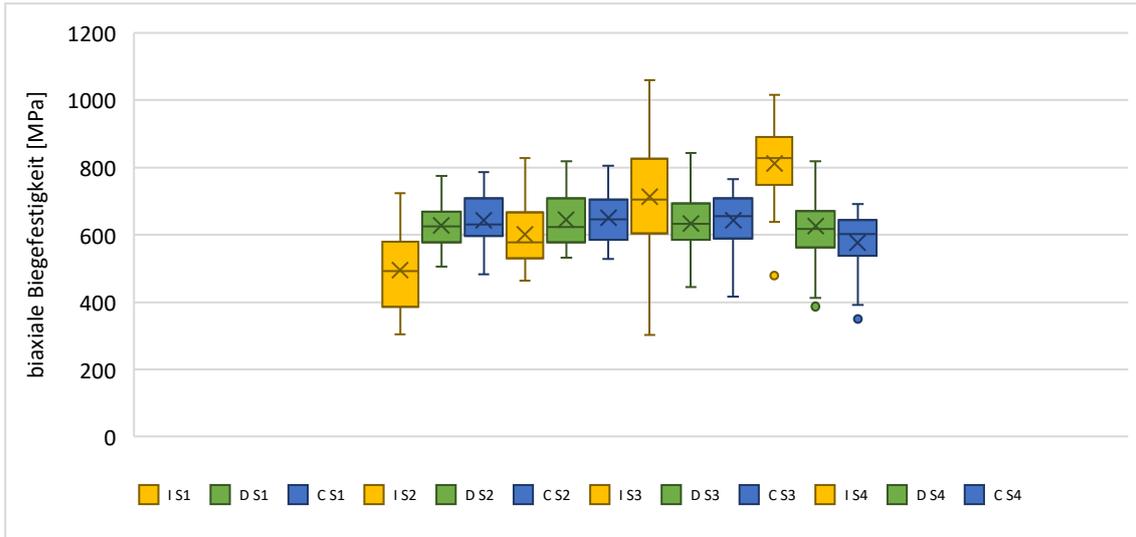


Abbildung 47: Vergleich der biaxialen Biegefestigkeit o.A.

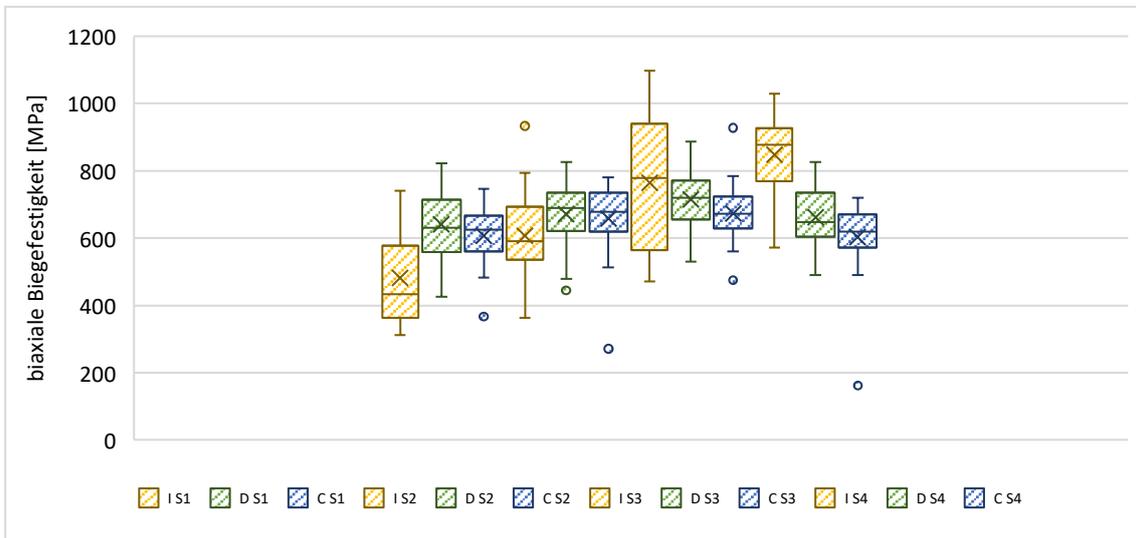


Abbildung 48: Vergleich der biaxialen Biegefestigkeit m.A.

# Ergebnisse

## 3.4.3 Vergleich der Härte

Die Härtewerte der drei Materialien wiesen keine weiteren signifikanten Unterschiede ( $p \geq 0,019$ ) auf.

In Abbildung 49 und Abbildung 50 ist der Vergleich zwischen den drei Materialien dargestellt.

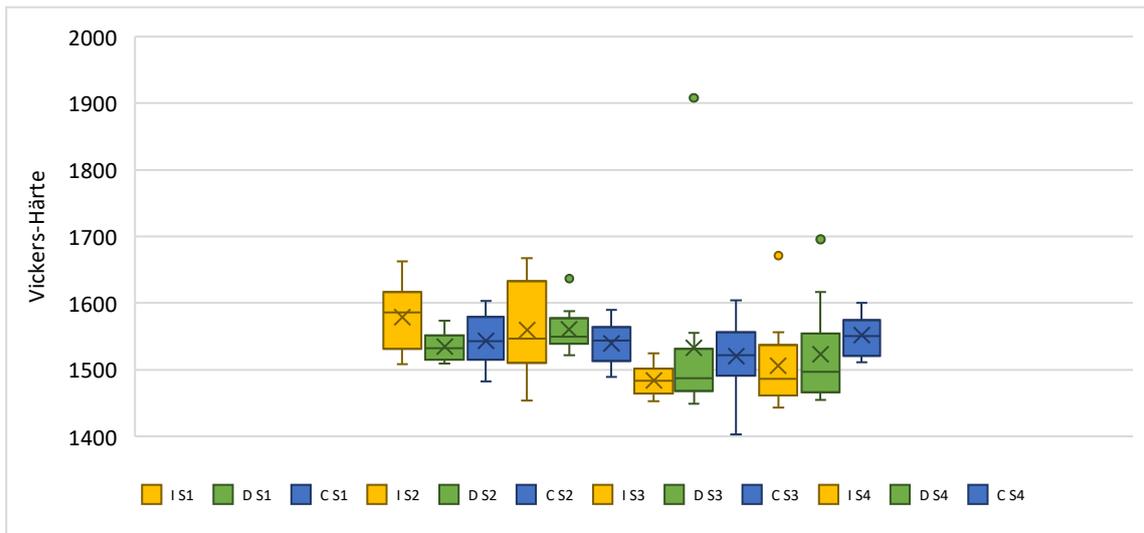


Abbildung 49: Vergleich der Härte o.A.

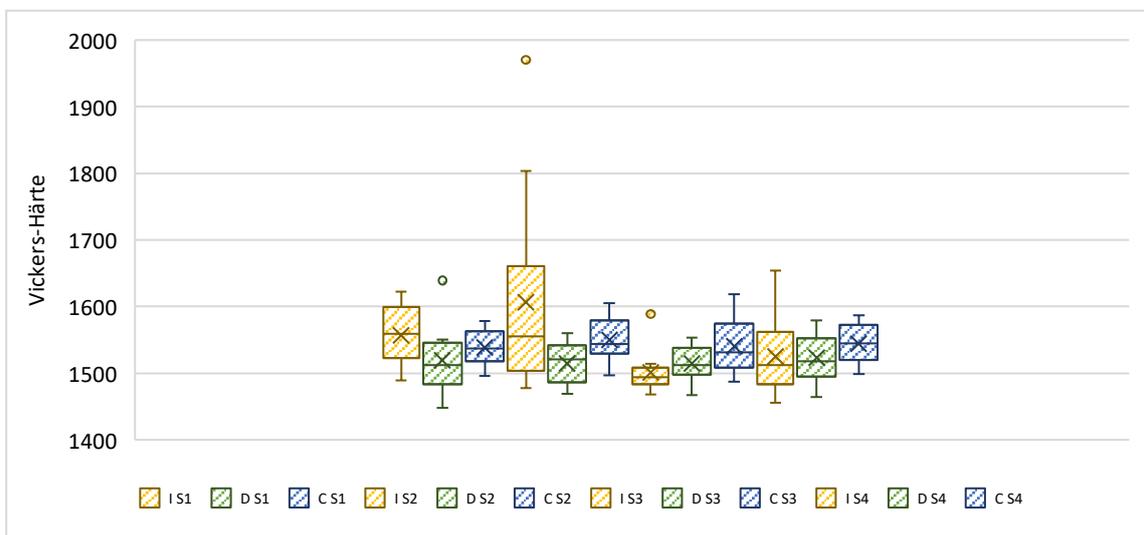


Abbildung 50: Vergleich der Härte m.A.

## 4 Diskussion

### 4.1 Methodendiskussion

Da die neuen Materialklassen der Multilayer-Zirkoniumdioxidkeramiken erst seit dem Jahr 2013 verfügbar sind, gibt es bis zum heutigen Tag wenig Studien zu ihnen [8]. Besonders Unterschiede zwischen Multilayer-Zirkoniumdioxidkeramiken verschiedener Hersteller wurde kaum untersucht.

Die drei Hersteller Ivoclar Vivadent, Dentona und Amann Girrbach geben für ihre Multilayer-Keramiken, die in dieser Studie verwendet wurden, unterschiedliche Zusammensetzungen an. Somit lag es nah, dass sich materialbedingte Unterschiede der mechanischen Eigenschaften finden würden. Die Multilayer-Zirkoniumdioxidkeramik IPS e.max ZirCAD Prime besteht aus einer Inzisalschicht, einer Übergangsschicht und einer Dentinschicht [3, 118, 124]. Dentona Optimill Multilayer 3D hingegen setzt sich aus sechs Schichten zusammen [7]. Im Gegensatz zu diesen beiden Herstellern gibt Amann Girrbach lediglich an, dass die Multilayer-Zirkoniumdioxidkeramiken Ceramill zolid fx multilayer einen integrierten Farbverlauf hat und nennt keine definierten Schichten [119].

Ein Aspekt, welcher zu Unterschieden zwischen den Materialien, aber auch innerhalb einer Schicht derselben Multilayer-Zirkoniumdioxidkeramiken führen kann, ist die manuelle Probenherstellung. Die Schritte des Sägens und des Schleifens wurden per Hand durchgeführt. Eine Fehlerquelle könnte zum Beispiel das Schleifpapier sein, welches sich fortlaufend abnutzt und nach einer gewissen Zeit keine identischen Oberflächenbeschaffenheiten der Proben garantieren kann. Aus diesem Grund wurde das Papier ausgetauscht, sobald die Effizienz merklich abnahm. Die Gleichmäßigkeit der Probenoberfläche wurde optisch überprüft.

Die Dichteprüfung erfolgte, wie im Methodenteil beschrieben, nach dem archimedischen Prinzip. Die Unterschiede in der Höhe der Probenkörper können auf diese Weise in die Formel einbezogen werden. Auch die Poren, welche in der Zirkoniumdioxidkeramik vorkommen, werden bei diesem Prinzip berücksichtigt. Somit erhält man ein präzises Ergebnis der Dichte.

In der vorliegenden Studie wurde die Biegefestigkeit anhand der biaxialen Biegeprüfung getestet. Alternativen zu dieser Biegeprüfung sind der 3-Punkt-Biegeversuch und der 4-

## Diskussion

Punkt-Biegeversuch. Diese drei Prüfmethode erzielen uneinheitliche Werte für die Biegefestigkeit. In einer Studie von Shen et al. wurden mit dem Drei-Punkt-Biegeversuch unter anderem zwei 3Y-TZP- Keramiken getestet. Das Material Lava Plus (3 M ESPE; USA) zeigte eine Biegefestigkeit von  $817,07 \pm 71,78$  MPa. Das Material Ceramill zolid White (Amann Girrbach; Koblach, Österreich) erreichte  $875,92 \pm 58,32$  MPa [125].

Dehestani und Adolfsson verwendeten für eine Studie den Vier-Punkt-Biegeversuch, um die Biegefestigkeit von 3Y-TZP zu testen. Für die Keramik TZ-3YS-E (Tosoh, Tokio, Japan) zeigte sich eine Biegefestigkeit von etwa 900 MPa [126].

Die biaxiale Biegefestigkeit wurde z.B. in einer Studie von Moqbel et al. getestet. Untersucht wurde die 3Y-TZP Keramik Khatana HT10 (Kuraray Noritake Dental; Tokio, Japan), welche eine Biegefestigkeit von  $720 \pm 37$  MPa [58].

In einer weiteren Studie von Jerman et al. zeigte die 3Y-TZP Keramik Opaque (Pritidenta GmbH, Leinfelden-Echterdingen, Deutschland) eine mittlere biaxiale Biegefestigkeit von 888 MPa [127].

Wie bereits erwähnt, können Materialfehler durch die Bearbeitung entstehen. Durch die Verwendung der biaxialen Biegeprüfung sollten diese weniger Einfluss auf die Ergebnisse haben, als bei der 3- oder 4-Punkt-Biegeprüfung [100].

Schwankungen innerhalb einer Probengruppe könnten sich auf die manuelle Bearbeitung zurückführen lassen. Unter Berücksichtigung dieser Fehlerquelle wurde eine große Probenzahl (30 pro Schicht und Pro Material = insgesamt 720 Proben) gewählt. Somit können trotz Ausreißern materialtypische mechanische Eigenschaften festgestellt werden.

Zur Testung der Härte wurde die Mikrohärtigkeit nach Vickers verwendet. Mit 10 Eindrücken pro Probengruppe überstieg die Anzahl der Prüfungen, die in einigen anderen Studien. In den Studien von Candido et al. und Yener et al. wurden jeweils 4 und 3 Eindrücke durchgeführt [59, 108].

Die verwendeten Verfahren sind evidenzbasiert und ermöglichen den Vergleich zu einigen durchgeführten Studien.

Alle durchgeführten Tests wurden sowohl ohne als auch mit Alterung durchgeführt. Für die Simulation der Alterung wurden 10.000 Zyklen im Thermocycler gewählt. Die Temperaturen der beiden Bäder betragen  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  und  $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Als Orientierung der

Prüfparameter diente eine Studie von Rayar et al. [120]. Die gewählte künstliche Alterungsmethode mittels Thermocycler entspricht einer simulierten Alterungsdauer von einem Jahr in situ [128]. Die durchschnittliche Tragedauer einer Zirkoniumdioxidkeramikkrone sollte jedoch deutlich darüber liegen. Kontonasaki et al. fassten im Jahr 2019 einige Kurzzeitstudien zusammen, in denen sich zeigte, dass monolithische Kronen aus Zirkoniumdioxidkeramik auch nach mehreren Jahren eine hohe Überlebensrate aufwiesen [129]. Das Ergebnis dieser Studie gibt also keinen zuverlässigen längerfristigen Ausblick über diese Zeit hinaus, lässt jedoch eine Tendenz erkennen.

Neben der thermischen Belastung im Mund muss eine Restauration auch den Kaukräften standhalten. Diese betragen laut Jansen van Vuuren et al. im Seitenzahnbereich (erster Prämolare bis zum zweiten Molaren) im Durchschnitt 430,4 N. Maximal konnten in einer Studie von Jansen van Vuuren et al. Beißkräfte bis zu 1642,8 N auftreten [130]. Für Folgestudien wäre es z.B. interessant, die Risszähigkeit ( $K_{IC}$ -Wert) der verschiedenen Multilayer-Schichten zu untersuchen. So könnte geprüft werden, ob alle Schichten einem Riss denselben Widerstand entgegenbringen oder ob Unterschiede, eventuell durch den  $Y_2O_3$ -Gehalt bedingt, vorliegen. Zudem könnte in weiteren Studien neben dem Thermocycler auch ein Kausimulator zum Einsatz kommen. So könnte geprüft werden, inwiefern sich diese Einflüsse summieren und die mechanischen Eigenschaften des Materials beeinflussen. Auch in-vivo-Untersuchungen, besonders Langzeitstudien, wären wünschenswert, um den Stellenwert der neuen Multilayer-Zirkoniumdioxidkeramiken noch besser einordnen zu können.

### 4.2 Ergebnisdiskussion

In der hier durchgeführten Studie ließen sich bezüglich der mechanischen Eigenschaften sowohl materialbedingte wie auch schichtbedingte Abweichungen feststellen.

Bei der Prüfung der Dichte zeigten sich einige deutliche Unterschiede. Die Dichte der Proben bewegte sich immer im Bereich von  $5,790 \text{ g/cm}^3$  (m.A.:  $5,683 \text{ g/cm}^3$ ) bis  $6,402 \text{ g/cm}^3$  (m.A.:  $6,282 \text{ g/cm}^3$ ). Diese Ergebnisse stimmen größtenteils mit den Werten der Literatur überein und überschreiten diese in Ausnahmefällen sogar. Hier sind Dichtewerte von  $5,7$  bis  $6,1 \text{ g/cm}^3$  für Zirkoniumdioxidkeramik angegeben [47, 131, 132]. Somit hat das Material Zirkoniumdioxidkeramik im Vergleich zu weiteren dentalen

Restaurationsmaterialien, wie z.B. Kunststoffen oder anderen Keramiken, eine relativ hohe Dichte. Zum Vergleich gibt der Hersteller Ivoclar Vivadent für die Lithiumdisilikatekeramik IPS e.max Press eine Dichte von  $2,5 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$  an [133]. Über die vier Schichten hinweg hatten die IPS Proben eine mittlere Dichte von  $6,012 \text{ g/cm}^3$  (m.A.:  $6,018 \text{ g/cm}^3$ ), die Dentona-Proben eine Dichte von  $5,978 \text{ g/cm}^3$  (m.A.:  $6,001 \text{ g/cm}^3$ ) und die Ceramill-Proben erzielten im Schnitt Dichtewerte von  $5,999 \text{ g/cm}^3$  (m.A.:  $5,997 \text{ g/cm}^3$ ).

Bei den beiden Materialien IPS e.max ZirCAD Prime und Dentona Optimill Multilayer 3D ist eine steigende Tendenz der Dichte über die Schichten hinweg zu beobachten. Die inzisalen Schichten der Werkstoffe haben geringere Dichtewerte als die zervikalen Schichten. Im Gegensatz zu diesen Beobachtungen ist bei den Ceramill-Proben weder eine stark unterschiedliche Streuung der Werte mit und ohne Alterung noch eine erhebliche Steigung der Dichtewerte innerhalb des Materials zu erkennen. Die beobachtete Steigung war nur minimal. Diese unterschiedlichen Tendenzen können auf die verschiedenen Zusammensetzungen der drei Materialien zurückzuführen sein. Da sich sowohl die Festlegung der Schichten als auch die Elementzusammensetzung der Probengruppen unterscheiden, sind materialbedingte Unterschiede wahrscheinlich. Im Mann-Whitney-U-Test konnte kein signifikanter Einfluss der Alterung auf die Dichtewerte verzeichnet werden. Signifikante Unterschiede der Dichte konnten jedoch beim Vergleich der ersten mit der vierten Schicht bei jedem Material festgestellt werden ( $p < 0,001$ ). Diese Feststellung könnte auf den steigenden Yttriumgehalt von den zervikalen zu den inzisalen Schichten zurückzuführen sein. Diesen Anstieg des Yttriumgehalts konnte man in der EDX-Analyse bei den IPS-Proben und den Ceramill-Proben feststellen. Das Element Yttrium hat mit  $4,47 \text{ g/cm}^3$  eine im Vergleich zum Zirkon geringere Dichte [134]. Nimmt dieses Element also im Verlauf der Restauration zu und das dichtere Zirkon ab (vgl. EDX-Analyse), ist die Dichte inzisal geringer als zervikal. Bei dem Material Optimill Multilayer 3D konnte bei der EDX-Analyse kaum ein Anstieg des  $\text{Y}_2\text{O}_3$ -Gehalts nachgewiesen werden. Die Dichte des Materials steigt jedoch trotzdem über die Schichten hinweg an. Kolakarnprasert et al. [135] führten im Jahr 2019 eine Studie durch, die sich mit der Komposition, Mikrostruktur und Transluzenz von Multilayer-Zirkoniumdioxidkeramiken auseinandersetzte. Es wurden drei Multilayer-Zirkoniumdioxidkeramiken von Katana untersucht (UTML(5Y-TZP),

STML(4Y-TZP), ML(3Y-TZP)). Die Schichten der jeweiligen Materialien zeigten keine großen Unterschiede bezüglich der Transluzenz zwischen den Schichten. Jedoch wurde festgestellt, dass das UTML, das 5Y-TZP, mit 75 % den größten Anteil der kubischen Phase besaß. Die Korngröße nahm von UTML über STML zu ML ab, was mit der Abnahme der Transluzenz übereinstimmte. Zusätzlich wurde die jeweilige Materialdichte bestimmt. Die ermittelten Dichtewerte lagen bei  $6,00 \text{ g/cm}^3$  für UTML,  $6,02 \text{ g/cm}^3$  für STML und  $6,04 \text{ g/cm}^3$  für ML [135]. Das Material mit dem höchsten  $\text{Y}_2\text{O}_3$ -Gehalt hat somit die geringste Dichte. Diese Beobachtung konnte in der hier durchgeführten Studie für alle drei Materialien bestätigt werden. Auch Arnold gab folgende Dichtewerte für die monokline, tetragonale und kubische Phase an:  $5,8 \text{ g/cm}^3$ ,  $6,10 \text{ g/cm}^3$  und  $6,27 \text{ g/cm}^3$  [53]. Die Hypothesen  $H_{01}$  und  $H_{02}$  konnten somit bei der Dichteprüfung für alle Materialien widerlegt werden. Sowohl die einzelnen Schichten eines Materials als auch die jeweiligen Schichten der verschiedenen Materialien wiesen signifikante Unterschiede voneinander auf.

Beim Vergleich der Materialien untereinander fällt auf, dass die Streuung der Dichtewerte der Proben ohne Alterung größer ist als die Streuung der Werte nach den 10.000 Zyklen im Themocycler.

Eine Erklärung für die größere Streuung vor Alterung der Proben könnte die Phasenumwandlung sein. Aufgrund der thermischen Belastung kann es, wie auch z.B. bei einem Riss, zu einer Umwandlung der Phasen kommen. Dieser Vorgang wird als „Low Temperature Degradation“ (LTD) oder auch „Niedertemperaturdegradation“ bezeichnet. Sowohl Kohorst et al. [136] als auch Borchers et al. [137] untersuchten die stressinduzierte Umwandlung von stabilisierter Zirkoniumdioxidkeramik (3Y-TZP). Diese Art der Umwandlung der metastabilen tetragonalen Phase in die monokline Phase geschieht in einer feuchten Umgebung und kann auch ohne das Vorhandensein eines Risses stattfinden. Chevalier und Gremillard bezeichnen sie als konkurrierenden Prozess zur Transformationsverfestigung. In einer Veröffentlichung befassten sie sich im Jahre 2019 mit dem aktuellen Stand der LTD. Eine Auswirkung der LTD ist, dass die Oberfläche der Keramik rauer wird, aufgrund von Oberflächenerhebungen bei der Phasenumwandlung. Laut Chevalier und Gremillard, ist dieser Effekt eher bei Zirkoniumdioxidkeramik-Implantaten als bei prothetischen Restaurationen relevant [138]. In den getesteten Keramik-Proben könnten durch verschiedene Einflüsse (z.B.

Mikrorisse) schon vor der Alterung monokline Anteile vorliegen. Diese Anteile hätten vor der künstlichen Alterung Einfluss auf die Dichte. Während der Phasenumwandlung werden die tetragonalen Anteile in monokline umgewandelt. Somit könnte die LTD dazu führen, dass eine einheitlichere Dichte nach der Alterung vorliegt.

Die Biegefestigkeit von Zirkoniumdioxidkeramiken wurde häufiger untersucht als deren Dichte. Somit gibt es einige Referenzwerte. Diese beziehen sich allerdings eher auf die herkömmlichen Zirkoniumdioxidkeramiken, wie z.B. das 3Y-TZP, nicht aber auf die Multilayerkeramiken. Für ihren jeweiligen Multilayerblock geben die Hersteller Ivoclar und Dentona jedoch selbst Werte an. Das Material IPS e.max ZirCAD Prime soll im Inzisalbereich eine durchschnittliche biaxiale Biegefestigkeit von 540 MPa haben und im Dentinbereich soll diese bei 1200 MPa liegen [118]. Bei dem Dentona Optmill Multilayer 3D soll die Biegefestigkeit vom inzisalen zum zervikalen Bereich sukzessive von 600 MPa auf 900 MPa ansteigen [7]. Welche Biegeprüfung die Firma Dentona verwendete, ist nicht angegeben und erschwert somit den Vergleich mit IPS e.max ZirCAD Prime. Amann Gurrbach macht wie bei der Aufteilung der Schichten keine genauen Angaben zu der Biegefestigkeit ihres Multilayers Ceramill zolid fx multilayer. Als Wert für den gesamten Multilayer geben sie nur  $700 \pm 150$  MPa an [119].

Der Anstieg der Festigkeit konnte in der vorliegenden Studie nur für das Material IPS e.max ZirCAD bestätigt werden. Die Werte für die biaxiale Biegefestigkeit ohne Alterung stiegen von Schicht 1 (inzisal) zu Schicht 4 (zervikal) von durchschnittlich 494 MPa auf 811 MPa an. Mit 1016 MPa als höchsten Wert werden jedoch noch nicht die Herstellerangaben erreicht. Trotzdem lässt sich die ansteigende Tendenz bestätigen und  $H_{01}$  widerlegen. Rosentritt et al. [124] veröffentlichten 2020 eine Studie, in der sie den Zusammenhang zwischen dem „Nesting“ einer Restauration in einem IPS e.max ZirCAD Prime Blank und der Bruchkraft feststellten. Proben, welche aus dem inzisalen Bereich des Blanks gefräst wurden, wiesen eine geringere Bruchkraft ( $1004 \pm 446$  N) auf als diejenigen, welche aus dem zentralen Bereich gefertigt wurden ( $1760 \pm 607$  N) [124]. Diese ansteigende Tendenz lässt sich, wie vom Hersteller angegeben, auf den nach inzisal ansteigenden  $Y_2O_3$ -Gehalt zurückführen. Auch in der EDX-Analyse passt der Anstieg des Yttriumgehalts von 4,4 Gew-% auf 7,4 Gew-% zu den Ergebnissen der Festigkeitsprüfung. Die Tatsache, dass mehr  $Y_2O_3$  zu einem Material führt, welches in

der Biegeprüfung weniger belastbar ist, konnte in mehreren Studien nachgewiesen werden [124, 139-142]. Neben dem Gehalt an Yttrium ist die Phase der Zirkoniumdioxidkeramik auch stets von Bedeutung. So kann je nach Zusammensetzung eine voll- oder teilstabilisierte Zirkoniumdioxidkeramik vorliegen. Zirkoniumdioxidkeramiken, in denen eine kubische Phase vorhanden ist, sind erwiesenermaßen weniger biegefest als die, in denen keine vorliegt [139]. Diese Faktoren könnten die geringere biaxiale Biegefestigkeit der Ceramill-Proben im Vergleich zu den IPS-Proben erklären. In der EDX-Analyse wurde bei IPS e.max ZirCAD Prime zervikal 4,4 % Yttrium und bei Ceramill zolid fx multilayer 6,7 % Yttrium nachgewiesen. Mit der biaxiale Biegefestigkeit in Schicht IV der Proben kann diesen Zusammenhang untermauert werden. Die IPS-Proben erzielten eine biaxiale Biegefestigkeit von 811,43 MPa ohne Alterung (m.A.: 848,63 MPa), die Ceramill-Proben im Gegensatz dazu 576,05 MPa (m.A.: 602,33 MPa). Wenn 8-15 Mol-% eines stabilisierenden Oxids wie  $Y_2O_3$  eines ist hinzugefügt werden, ist die kubische Phase stabilisiert [53]. Zusätzlich zu dem Anteil des Yttriums ist auch die Sintertemperatur entscheidend. So kann auch mit einem Zusatz von wenig Mol-%  $Y_2O_3$  bei einer sehr hohen Sintertemperatur (ca. 2400°) die kubische Phase erzielt werden. Je mehr  $Y_2O_3$  beigemischt wird, desto niedrigere Temperaturen sind nötig, um die kubische Phase zu stabilisieren [143].

Ein andere Aspekt in Bezug auf das Sintern wurde von Sulaiman et al. untersucht [144]. In dieser Studie wurde eine zum Teil stabilisierte Zirkoniumdioxidkeramik (partially stabilized Zirconia = PSZ) (Prettau, Zirkonzahn, Taufers, Italien) und eine komplett stabilisierte Zirkoniumdioxidkeramik (fully stabilized Zirconia = FSZ) (Prettau Anterior, Zirkonzahn) untersucht. Das PSZ enthält 4-6 %  $Y_2O_2$ , das FSZ <12 %  $Y_2O_2$ . Ziel der Studie war zu prüfen, ob das Färben des Materials oder ein Vakuumsintern einen Einfluss auf die Transluzenz und/oder die biaxiale Biegefestigkeit hat. Die PZS -Kontrollgruppe erzielte im Schnitt eine biaxiale Biegefestigkeit von 1100 MPa, die FSZ-Kontrollgruppe im Gegensatz dazu durchschnittlich 700 MPa. Das Vakuumsintern verbesserte die Werte der biaxialen Biegefestigkeit des PSZ. Beim FSZ zeigte sich dagegen kein signifikanter Unterschied. Somit hatte das Sintern ohne Sauerstoff einen größeren Einfluss auf die Zirkoniumdioxidkeramik mit einem höheren Anteil an tetragonaler Phase. Der Zusammenhang zwischen dem  $Y_2O_3$ -Gehalt und der biaxialen Biegefestigkeit welcher sich in der Studie von Sulaiman et al. zeigt, konnte in der vorliegenden Studie für das

Material IPS e.max ZirCAD Prime bestätigt werden [144]. Einen Zusammenhang zu dem Vakuumsintern gab es nicht, könnte jedoch ein Anreiz für weitere Studien in Bezug auf die Biegefestigkeit von Multilayer-Zirkoniumdioxidkeramiken sein.

Maruo et al. [145] führten eine Studie durch, in welcher eine Multilayer-Zirkoniumdioxidkeramik des Herstellers Katana in drei Schichten unterteilt wurde. Eine inzisale, eine mittlere und eine zervikale Schicht. Diese wurden anschließend unter anderem auf ihre Biegefestigkeit untersucht. Im Test des 3-Punkt-Biegeversuchs zeigte sich, dass die inzisale Schicht die geringste Biegefestigkeit aufwies [145]. Dieser Zusammenhang zwischen Transluzenz und geringeren Biegefestigkeiten konnte in der hier durchgeführten Studie beim Material IPS e.max ZirCAD Prime bestätigt werden. Auch Carrabba et al. [140] konnten 2017 diesen Zusammenhang nachweisen. Sie verglichen drei Y-TZP-Keramiken mit unterschiedlichem  $Y_2O_3$ -Gehalt (Aadva ST, Aadva EI, Aadva NT; GC Tech; Tokio, Japan) untereinander und mit einer Lithiumdisilikatkeramik (IPS e.max CAD LT). Im 3-Punkt-Biegeversuch und der Messung der Transluzenz zeigte sich eine inverse Beziehung zwischen Festigkeit und Transluzenz der getesteten Materialien. Somit waren die opaksten Proben auch die bruchfestesten [140].

Bei den anderen beiden Materialien, Dentona Optimill Multilayer 3D und Ceramill zolid fx multilayer wurden in dieser Studie keine eindeutigen Anstiege der biaxialen Biegefestigkeit festgestellt.  $H_{01}$  kann für diese beiden Keramiken nicht widerlegt werden. Jedoch lässt sich  $H_{02}$  dadurch widerlegen, dass innerhalb der Materialien bei denselben Schichten signifikante Unterschiede vorlagen.

Bei den Dentona-Proben blieb die biaxiale Biegefestigkeit relativ konstant ( $p= 0,001-0,848$ ). Ohne Alterung lagen die Mittelwerte von Schicht I bis hin zu Schicht IV bei 628,2 MPa, 645,16 MPa, 633,98 MPa und 625,35 MPa. Die EDX-Analyse zeigte auch beim  $Y_2O_3$ -Gehalt über den Verlauf des Zylinders kaum Veränderungen. Der  $Y_2O_3$ -Gehalt lag zwischen 6,7 % und 7,1 %.

Die Ergebnisse der biaxialen Biegefestigkeit der Ceramill-Proben wiesen wie die Dentona-Proben keine auffallende Veränderung über die vier herausgetrennten Schichten aus ( $p= 0,003-0,906$ ). In der EDX-Analyse zeigte sich jedoch ein starker Anstieg des  $Y_2O_3$ -Gehalts über die Länge des Zylinders. Inzisal liegt er bei 16,5 Gew-% und zervikal bei 6,7 Gew-%. Der hohe Wert inzisal könnte darauf hindeuten, dass das die

Zirkoniumdioxidkeramik in der kubischen Phase stabilisiert ist. Ein solches Material ist, wie Holman et al. [139] bestätigen konnten, weniger belastbar als eines, welches in der tetragonalen Phase teilstabilisiert ist. In einer Studie verglichen Holman et al. die Biegefestigkeit von neuen Zirkoniumdioxidkeramiken mit herkömmlichen. Getestet wurden zwei 3Y-TZP-, eine 4Y-TZP-, zwei 5Y-TZP- und eine Lithiumdisilikatkeramik. Im 3-Punkt-Biegeversuch und der Testung der Biegeermüdungsfestigkeit ließ sich feststellen, dass das 3Y-TZP die größte Biege- und Biegeermüdungsfestigkeit aufwies. Die Lithiumdisilikatkeramik erreichte in diesen Versuchen die geringsten Werte. Somit ließ sich auch hier ein Zusammenhang zwischen Transluzenz und Bruchfestigkeit des Materials erkennen [139]. Neben Holman et al. wiesen auch Maruo et al. in ihrer Studie unter anderem darauf hin, dass mit zunehmender kubischer Phase in einem Material die Transformationsverfestigung abnimmt [145].

Einige weitere Studien, wie z.B. von Kwon et al. [141] oder Sulaiman et al. [142], bestätigen die Beziehung zwischen einer abnehmenden Bruchfestigkeit und einem steigenden  $Y_2O_3$ -Gehalt. Kwon et al. testeten unter anderem die 3-Punkt Biegefestigkeit einer 3Y-TZP Keramik (Katana HT) und die einer 5Y-TZP Keramik (Katana UTML). Das Material Katana UTML besteht aus vier Schichten: einer Schmelzschicht, zwei Übergangsschichten und einer Dentinschicht [88]. Für die Prüfung der Biegefestigkeit wurde die Schmelzschicht herausgetrennt und getestet. Die 3Y-TZP erzielte in ihrer Studie Biegefestigkeitswerte von bis zu  $1194 \pm 111$  MPa. Dem gegenüber erzielte die Schmelzschicht der 5Y-TZP-Keramik nur Werte bis zu  $688 \pm 159$  MPa [141]. In der vorliegenden Studie lagen die durchschnittlichen Festigkeitswerte der ersten Schicht (o.A.) im Vergleich dazu bei 494,38 MPa für IPS e.max ZirCAD Prime, bei 628,20 MPa für Dentona Optimill Multilayer 3D und bei 643,88 MPa für Ceramill zolid fx multilayer. Somit sind die Werte der Biegefestigkeit vergleichbar. Die Tatsache, dass die Werte für IPS e.max ZirCAD Prime, Dentona Optimill Multilayer 3D und Ceramill zolid fx multilayer niedriger liegen, kann materialbedingt sein oder an der durchgeführten Prüfung liegen. Wie schon im Kapitel Biegefestigkeit beschrieben, führt der 3-Punkt-Biegeversuch in der Regel zu höheren Werten als der biaxiale Biegeversuch [98]. In der Studie von Sulaiman wird neben dem erhöhten  $Y_2O_3$ -Gehalt auch die Schichtung als Grund für die geringere Festigkeiten der Multilayer-Zirkoniumdioxidkeramiken diskutiert [142].

Rosentritt et al. untersuchten unter anderem die mechanischen Eigenschaften einer konventionellen monolithischen Zirkoniumdioxidkeramik (4Y-TZP) mit einer mehrschichtigen Keramik [6]. In dieser Studie war der  $Y_2O_3$ -Anteil der beiden Werkstoffe gleich hoch. Es wurde gezeigt, dass es bei dem 4Y-TZP keinen Unterschied der Biegefestigkeit zwischen Multilayern und dem klassischen Material gab [6].

Neben dem  $Y_2O_3$ -Gehalt kann auch die Korngröße einen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften der Multilayer-Keramiken haben. Diese wird unter anderem durch die Anlagerung von  $Al_2O_3$  an den Korngrenzen gesteuert. Die sog. „Kornwachstumsbegrenzung“ beschreibt, dass das  $Al_2O_3$  die Körner daran hindert, weiter zu wachsen [61]. Neben  $Al_2O_3$ -Zusätzen kann die Korngröße durch den Sinterprozess beeinflusst werden. Da sich die Sintervorgaben der drei Materialien unterscheiden, kann eine identische Korngröße nicht angenommen werden. Inwiefern sich unterschiedliche Korngrößen auf die mechanischen Eigenschaften der Keramik auswirken, wurde in diversen Studien beleuchtet. Erhöhte Sintertemperaturen und verlängerte Haltezeiten führen zu einem verstärktem Kornwachstum. Dieses kann insofern einen negativen Einfluss haben, als dass es zu spontanen t-m-Umwandlungen mit daraus folgenden Rissen im Material kommen kann. Diese Beobachtung wurde in diversen Studien für 3Y-TZP gemacht [85, 146]. So könnte es zum Beispiel bei den Dentona- und Ceramill-Proben der Fall sein, dass die Keramiken aufgrund zu großer Körner versagen, bevor sich ein Versagen aufgrund eines erhöhten  $Y_2O_3$ -Gehalts feststellen lässt. Weitere Studien würden sich aus diesem Grund anbieten, die Festigkeit der Multilayer-Zirkoniumdioxidkeramiken in Abhängigkeit von der Korngröße untersuchen.

Ein weiterer Punkt, welcher zur Diskussion steht, ist das Vorkommen des Elements Lanthan in den Proben. In der EDX-Analyse konnte Lanthan nur bei der IPS-Probe nachgewiesen werden. Das Lanthan war nicht über die gesamte Probe hinweg nachweisbar, sondern nur in bestimmten Bereichen vorhanden. Der durchschnittliche Lanthan-Anteil für den gesamte IPS-Zylinder lag bei 0,55 Gew-%. Zhang et al. konnten in einer Studie zeigen, dass sich Lanthanoxid positiv auf die Alterungsbeständigkeit und die Transluzenz von Zirkoniumdioxidkeramiken auswirkt [147]. Auch Nogiwa-Valdez et al. konnten einen abschwächenden Einfluss von Lanthan auf die hydrothermale Degradation von 3-TZP feststellen [148]. Diese Beobachtung könnten erklären, dass die künstliche Alterung im Thermocycler in der hier durchgeführten Studie keinen

signifikanten Einfluss auf die Biegefestigkeit von IPS e.max ZirCAD Prime hatte. Jedoch ließen sich auch bei den anderen beiden untersuchten Materialien, in denen kein Lanthan nachgewiesen werden konnte, keine signifikanten Einflüsse der Alterung auf die Biegefestigkeit feststellen. Wie sich das Vorhandensein oder nicht Vorhandensein von Lanthan in den drei Keramiken auswirkt, bleibt Fragestellung möglicher weiterer Untersuchungen.

Mit der hier durchgeführten Studie lässt sich nicht einordnen, ob das enthaltende Lanthan auch zu den mechanischen Eigenschaften der IPS-Proben beiträgt.

Nach der Prüfung der biaxialen Biegeprüfung wurden die Weibull-Module der Schichten aller drei Materialien berechnet. Diese lagen zwischen 4,32 und 13,58. Die erste (m. und o. A.), die zweite (m.A) und die dritte (m. und o.A.) IPS-Schicht zeigten eine große Festigkeitsstreuung. Hier lagen die Weibull-Module unter 5. Die Übrigen Probengruppen zeigten eine homogenere Verteilung der Festigkeitswerte. Ihre Weibull-Module lagen größtenteils im Rahmen der Werte, welche in anderen Studien genannt werden.

Für teilstabilisierte polykristalline Zirkoniumdioxidkeramik wurden in vorhergehenden Studien von Jerman et al. und Nakamura et al. Weibull-Module von 7,4 und 10,8 angegeben [127, 149]. In beiden Studien wurden die Weibull-Module nach Prüfung der biaxialen Biegefestigkeit berechnet. In einer Studie von Marro et al. wurde der Weibull-Modul berechnet, nachdem die Biegefestigkeit mit dem Vier-Punkt-Biegeversuch geprüft wurde. Hierbei zeigte sich ein Weibull-Modul von  $m=12$  [150].

Die Härte der getesteten Materialien war in der Regel sehr einheitlich. Es ließen sich keine eindeutigen schichtabhängigen Steigerungen der Härte bemerken. Es zeigte sich eine durchschnittliche HV, welche 1500 überschreitet. Grund für die hohe Härte des Materials Zirkoniumdioxidkeramik sind die überwiegend ionischen Bindungen des Materials [151].  $H_{01}$  lässt sich in der vorliegenden Studie für das Material IPS e.max ZirCAD durch nur einen signifikanten Unterschied innerhalb der Schichten widerlegen. Die anderen Materialien weisen keine signifikanten Unterschiede der Härte auf. Auch im Vergleich derselben Schichten liegen keine signifikanten Unterschiede zwischen den drei Keramiken vor.  $H_{02}$  kann somit nicht widerlegt werden. Arnold gibt an, dass die HV von vollstabilisierter Zirkoniumdioxidkeramik (CSZ) und teilstabilisierter Zirkoniumdioxidkeramik (PSZ) bei 1200 liegt. Die von teilstabilisierter polykristalliner Zirkoniumdioxidkeramik (TZP) bei 1300. Die Biegefestigkeit ist laut Arnold stärker

## Diskussion

abhängig von der Stabilisierung der Zirkoniumdioxidkeramik [151]. In einer Studie von Majic Renjo et al. [152] wurde die HV von 3Y-TZP mit unterschiedlicher Belastung (0.49 N, 0.98 N, 1.96 N, 4.90 N, 9.81 N und 29.42 N) gemessen. Ein Ergebnis deutete darauf hin, dass die HV mit zunehmender Prüfkraft abnahm. Ein Diagramm in der Publikation zeigt folgende Werte: für 0,49 N lag die HV bei ca.1750. Für 0,98 N bei ca. 1425 N. Eine Prüfung mit 1,96 N ergab eine HV von ca. 1350, eine mit 4,9 N ungefähr eine HV von 1320. Erst ab 9,81 N nahm die Härte wieder ab und ergab den HV-Wert 1305. Bei der Testung mit der höchsten Prüfkraft (29,42 N) wurde eine HV von 1308 erreicht. Diese Beobachtung wird als Eindruckgrößeneffekt bezeichnet [152]. Sie könnte auch der Grund sein, aus dem die in dieser Studie erfassten Härtewerte teilweise die Angaben der Hersteller überstiegen. Die Firma Dentona gibt für das Material Optimill Multilayer 3D eine HV von 1250 (HV 10) an. Amann Girrbach nennt als Härtewert für das Material Ceramill zolid fx  $1300 \pm 200$  (HV10) [7, 119]. Die von den Herstellern genannten Härtewerte beziehen sich auf keine bestimmte Schicht des Materials. Auch in dieser Studie konnte keine erkennbare Tendenz erkannt werden, welche einen Zusammenhang mit dem  $Y_2O_3$ -Gehalt vermuten lässt.

In der vorliegenden Untersuchung zeigte sich nach der Bonferroni-Korrektur nur ein einziger signifikanter Unterschied der Härtewerte. Dieser lag zwischen der ersten ZirCAD-Schicht ohne Alterung und der dritten IPS-Schicht ohne Alterung ( $p < 0,001$ ). Es lagen keine signifikanten Unterschiede zwischen den Härtewerten von Ivoclar zu Dentona und Ceramill vor ( $p < 0,001$ ). Die Multilayer-Zirkonoxidkeramiken von Dentona und Ceramill wiesen in Bezug auf ihre Härtewerte keine signifikanten Unterschiede auf ( $p < 0,001$ ). Diese materialbedingten Unterschiede lassen jedoch nicht auf einen Zusammenhang zwischen dem  $Y_2O_3$ -Gehalt und der Härte schließen. Zwischen den Schichten der jeweiligen Materialien lässt sich keine an- oder absteigende Tendenz der Härte erkennen. Bei der Härte der IPS-Proben ohne Alterung kam es zu Schwankungen von 227,48 HV, bei denen mit Alterung waren es 514,16 HV. Die Schwankung der Härtewerte der Dentona-Proben ohne und mit Alterung betragen 458,71 HV und 191,24 HV. Bei den Ceramill-Proben lagen die Schwankungen bei 201,56 HV (ohne Alterung) und 131,13 HV (mit Alterung). Camposilvan et al. [64] führten 2018 eine Studie durch, die die mechanischen Eigenschaften verschiedener Zirkoniumdioxidkeramiken untersuchte. Eines der Ergebnisse war, dass die Härte der

Keramiken mit einem größeren  $\text{Y}_2\text{O}_3$ -Gehalt (mind. 5,5 Mol%) minimal härter war als die der Keramiken mit nur 3 Mol% [64]. Die Keramiken mit mehr  $\text{Y}_2\text{O}_3$  wiesen einen größeren Anteil an der kubischen Phase auf. Auch ihre Korngrößen waren im Vergleich zu den Gruppen mit weniger  $\text{Y}_2\text{O}_3$  in der Regel größer. Die Zirkoniumdioxidkeramiken mit mind. 5,5 Mol%  $\text{Y}_2\text{O}_3$ -Gehalt hatten eine Korngröße von  $770 \pm 93$  nm (6,1 %  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ) und  $1718 \pm 327$  nm (5,9 %  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ). Sie erzielten eine Härte zwischen ca. 13,3 GPa (5,9 %  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ) und ca. 13,5 GPa (6,1 %  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ). Die Härte der Materialien mit weniger  $\text{Y}_2\text{O}_3$ -Zusätzen lag bei einer Korngröße von  $432 \pm 40$  nm bei ca. 12,9 GPa (2,4 %  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ) und bei einer Korngröße von  $333 \pm 27$  nm bei ca. 13,2 GPa (2,5 %  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ). Die vier untersuchten Materialien unterschieden sich somit in ihrer Härte um weniger als 0,5 GPa [64]. Zusammenfassend merken die Autoren an, dass die kubische Phase in einem Material sowohl gute als auch schlechte Einflüsse hat: vorteilig sind die Transluzenzsteigerung und die Abwesenheit der hydrothermalen Degradation. Da auch die Transformationsverfestigung abnimmt, wirkt sich die kubische Phase auch nachteilig aus und limitiert ggf. das Anwendungsgebiet der Keramik [64]. Wie bei der biaxialen Biegefestigkeit würde es sich demnach anbieten, weitere Studien mit einer Korngrößen-Analyse durchzuführen, um herauszufinden, ob der  $\text{Y}_2\text{O}_3$ -Gehalt, die Korngröße oder beide Faktoren in Kombination Einfluss auf die Härte haben. Durch die Bearbeitung der Zirkoniumdioxidkeramik kann es zu einer Phasenumwandlung mit dem Resultat eines erhöhten monoklinen Anteils kommen [153]. Die Werte der hier durchgeführten Studie sind immer vor dem Hintergrund einer möglichen, jedoch nicht bekannten Phasenumwandlung zu betrachten

Die Hypothese  $H_{03}$  nimmt an, dass der Einfluss der künstlichen Alterung keinen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften der Multilayer-Zirkoniumdioxidkeramiken hat.  $H_{03}$  kann für keine der drei getesteten Keramiken widerlegt werden. Wie in der Methodendiskussion erwähnt, könnte diese Feststellung an der künstlichen Alterungsdauer und – methode liegen. In zukünftigen Studien wäre eine längere thermische Wechselbelastung der Proben interessant sowie eine simulierte Alterung im Autoklav. Diese Alterungsmethode wurde z.B. in einer Studie von Mota et al. [154] verwendet. Geprüft wurde die Phasenumwandlung, sowie die mechanische Beständigkeit von zwei Zirkoniumdioxidkeramiken. Um die Alterung zu simulieren wurde, neben der

## Diskussion

mechanischen Belastung, auch der Autoklav verwendet. Die Proben waren für 24 Stunden bei 143°C und 2 bar im Autoklav. Ein Ergebnis dieser Untersuchung war, dass die Alterung im Autoklav die Biegefestigkeit erhöhte [154]. Auch in einer Studie von Fathy et al. [155] wurde dieser Temperatur- und Druckwert verwendet. Die Verweildauer der Proben im Autoklav lag jedoch bei 15 Stunden.

Außerdem wäre es aufschlussreich in weiteren Studien die Simulation der Kauaktivität zu prüfen. Zudem könnten in-vivo Studien durchgeführt werden. Nichtsdestotrotz hat sich ein, wenn auch nicht signifikanter, Einfluss des thermischen Cyclings gezeigt. Ursächlich hierfür könnte das sog. LTD sein, das bei Zirkoniumdioxidkeramiken im feuchten Milieu auftreten kann.

Hierdurch wird eine Umwandlung der tetragonalen in die monokline Phase bewirkt. Aufgrund der Volumenzunahme können Materialrisse und somit verringerte mechanische Eigenschaften resultieren [136, 137].

In diesen Untersuchungen wurden jedoch keine Multilayer-Zirkoniumdioxidkeramiken sondern 3Y-TZP [136, 137] und mit Aluminium und Cerium verstärkte Zirkoniumdioxidkeramik [136] geprüft.

### 5 Schlussfolgerung

Obwohl die in dieser Studie verwendeten Multilayer-Zirkoniumdioxidkeramiken dieselbe Indikation haben, wiesen sie deutliche Unterschiede in ihren mechanischen Festigkeiten auf. So konnte bei IPS e.max ZirCAD Prime ein deutlicher Verlauf der Biegefestigkeit über die Schichten hinweg festgestellt werden, bei Optimill Multilayer 3D und zolid fx multilayer jedoch nicht. Für die Dichte zeigte sich bei allen drei Materialien eine leicht ansteigende Tendenz von der inzisalen zur zervikalen Schicht. Mit der durchgeführten Härteprüfung konnte kein eindeutiger Zusammenhang zwischen den Schichten und der Härte gefunden werden.

Aufgrund der unterschiedlichen Biegefestigkeit ist es wichtig, sowohl Herstellerangaben als auch Patientenbedingungen genauestens zu beachten. Diese Herstellerangaben sind für jedes Material individuell. Bei Bruxern könnten zudem erhöhte Kaukräfte auftreten. In einem solchen Fall muss anhand der Indikation, des Patientenwunsches und Risikofaktoren für das Versagen der Restauration abgewogen werden, ob ein bestimmtes Material geeignet ist. Da sich die einzelnen Schichten der geprüften Materialien in ihrer Farbe und den mechanischen Eigenschaften unterscheiden, können die Restaurationen durch das sog. „Nesting“ an die Situation angepasst werden. Für Frontzähne kann der zu fräsende Zahnersatz im Blank z.B. eher in die inzisalen Bereiche positioniert werden. Diese Methode erscheint aber nur zielführend, wenn auch die Biegefestigkeiten entsprechend der Positionierung der Restauration im Rohling variieren. Ist die Biegefestigkeit im kompletten Rohling auf dem niedrigen Niveau, welches im inzisalen Bereich ausreichend erscheint, so ist die unterschiedliche Positionierung innerhalb des Rohlings nicht sinnvoll und ausgedehnte Restaurationen sollten aus diesem Material nicht gefertigt werden.

Testungen zur Beständigkeit des Farbverlaufs, des Langzeiterfolgs und zum Haftverbund sollten in Zukunft folgen, damit die Zirkoniumdioxidkeramik mit integriertem Farbverlauf häufiger und sicherer angewendet werden kann. Auch klinische Studien wären besonders wünschenswert für möglichst zuverlässige Ergebnisse. Darüber hinaus können Studien für besondere Situationen folgen. Hier wäre im Hinblick auf die Biegefestigkeit zum Beispiel interessant, wie die Multilayer-Zirkonoxidkeramiken bei Bruxern anzuwenden sind. Im Hinblick auf die Transluzenz wäre es interessant, wie sich

## Schlussfolgerung

das Rauchen oder regelmäßiger Kaffee- oder Rotweingenuss auf die Farbwiedergabe auswirken.

Bei den Dentona- und den Ceramill-Proben lag die Biegefestigkeit im gesamten Zylinder fast konstant zwischen 600 und 700 MPa. Es zeigte sich keine Steigerung von inzisal nach zervikal. Ein solcher Anstieg ließ sich hingegen bei dem Material IPS e.max ZirCAD Prime feststellen. Die Biegefestigkeit steigt von ca. 480 MPa auf Werte von bis zu über 900 MPa an. Vor allem die cervikalen Schichten von IPS e.max ZirCAD Prime bieten sich aufgrund ihrer hohen Biegefestigkeit gut für posteriore Versorgungen an.

Solange noch keine Langzeitstudien vorliegen, empfiehlt sich die Verwendung der Multilayer-Zirkonoxidkeramiken nur für die vom Hersteller angegebene Indikation. Hierbei sollte vor allem beachtet werden, ob die angegebenen Festigkeitswerte der Schichten für die geplante Restauration ausreichend sind. Diese vom Hersteller angegebene Indikationen orientieren sich an einer internationalen Normung. In der Norm ISO 6872 (Zahnheilkunde/Keramische Werkstoffe) sind die Anforderungen an keramische Zahnersatzrestaurationen festgehalten. Diese Anforderungen resultieren aus empirischen Erfahrungen. Für die Biegefestigkeit fordert die ISO 6872 z.B. für Gerüste von vier- oder mehrgliedrigen Brücken mittlere Bruchfestigkeiten von 800 MPa. Da unterschiedliche Prüfmethode zugelassen sind, können die Bruchwerte stark variieren. Somit müssen trotz der Normung individuelle Faktoren berücksichtigt werden. Für ästhetische Keramik für konventionell zementierte Kronen im Front- oder Seitenzahnbereich ist eine mittlere Bruchfestigkeit von mindestens 300 MPa empfohlen [41]. Die Werte der Bruchfestigkeit in der hier vorliegenden Studie übersteigen diesen Wert deutlich. Im posterioren Bereich sollten von dem Material IPS e.max ZirCAD Prime eher die biegefesteren, cervikalen Schichten verwendet werden. Optimill Multilayer 3D und Zolid fx multilayer können in den posterioren Bereichen unabhängiger von den Schichten angewendet werden. Besonders im anterioren Bereich können die Multilayer-Zirkonoxidkeramiken als neue Art der keramischen Restauration Ästhetik und Stabilität vereinen.

## 6 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit hat den Zusammenhang zwischen der Schichtung und den mechanischen Eigenschaften von Multilayer-Zirkoniumdioxidkeramiken untersucht. Getestet wurden die drei Materialien IPS e.max ZirCAD Prime, Dentona Optimill Multilayer 3D und Ceramill zolid fx multilayer. Aus gefrästen Zylindern dieser drei Multilayer-Keramiken wurden jeweils vier Schichten in definierten Höhen herausgetrennt. An je 30 Proben mit und ohne Alterung eines jeden Materials wurden die Dichte, die biaxiale Biegefestigkeit und die Vickers-Härte getestet. Zudem wurde an je einem kompletten Zylinder der Materialien eine EDX-Analyse durchgeführt, um einen genauen Aufschluss über die Elementzusammensetzung zu erhalten. Betrachtet wurde, ob und inwiefern sich die mechanischen Eigenschaften über die verschiedenen Schichten der Multilayer-Zirkoniumdioxidkeramiken ändern. Die Hälfte der Proben wurden im Thermocycler einer künstlichen Alterung unterzogen (5/55 °C, 10 000 Zyklen). So wurde zudem getestet, welchen Einfluss Bedingungen, welche dem Mundmilieu ähneln, auf die untersuchten mechanischen Eigenschaften haben.

Bei den IPS-Proben zeigte sich ein Zusammenhang zwischen der biaxiale Biegefestigkeit und der Schichtung. Die Härte dieses Materials gab keine eindeutigen Rückschlüsse auf einen Zusammenhang mit der Transluzenz.

Sowohl das Dentona-, als auch Ceramill-Proben zeigten keine an- oder absteigende Tendenz der biaxialen Biegefestigkeit über die Schichten hinweg an. Die Entscheidung welche Schicht gewählt wird kann bei den Dentona- und Ceramill-Proben somit primär aus ästhetischen Gründen getroffen werden. Im angegebenen Indikationsspektrum hat die Beanspruchung der geplanten Restauration keinen Einfluss darauf, in welcher Schicht man diese positionieren sollte.

Wie auch bei den IPS-Proben zeigten die Dichte und Härte keine klare Korrelation zwischen der Transluzenz und der Härte. Was allen drei Keramiken gemein haben, ist die leichte Veränderung der Dichte zwischen den unterschiedlichen Schichten.

Die Vermutung, dass die transluzenteste Schicht immer die schwächste ist, kann nicht bestätigt werden. Die biaxiale Biegefestigkeit muss für jedes Material separat betrachtet werden. Trotz der Tatsache, dass die inzisale Schicht bei zwei von den drei getesteten Materialien in der Biegeprüfung nicht bedeutend weniger belastbar ist, als die anderen

## Zusammenfassung

Schichten, sollten die Multilayer-Zirkoniumdioxidkeramiken mit Bedacht eingesetzt werden, da das mechanische Verhalten der unterschiedlichen Schichten bei unterschiedlichen Herstellern durchaus differieren kann. Bei den IPS-Proben ließ sich z.B. ein Unterschied der mechanischen Eigenschaften zwischen den Schichten erkennen. Das sog. „Nesting“ im Blank hat somit bei diesem Material einen Einfluss auf die mechanischen Kennwerte und sollte bei der Planung berücksichtigt werden. Aufgrund der nicht durchgehend konstanten mechanischen Eigenschaften über die Materialien hinweg empfiehlt sich ein Einsatz in Bereichen, in denen vor allem die Ästhetik eine Rolle spielt. In diesen, vor allem anterioren Bereichen, sind die neuen Multilayer-Zirkoniumdioxidkeramiken fähig, eine monolithische Fertigung mit guten lichtoptischen Eigenschaften zu verbinden.

## 7 Literaturverzeichnis

- [1.] Hajtó, J. *Vollkeramik: Navigation für Materialien und Indikationen*. Zahntechnik Magazin 2013. Available from: [https://www.ztm-aktuell.de/technik/werkstoffe/story/vollkeramik-navigation-fuer-materialien-und-indikationen\\_\\_2225.html](https://www.ztm-aktuell.de/technik/werkstoffe/story/vollkeramik-navigation-fuer-materialien-und-indikationen__2225.html). Accessed: 20.11.2020.
- [2.] Arnold, B., *Zirkoniumoxid in der Zahnmedizin*, in *Zirkon, Zirkonium, Zirkonia-ähnliche Namen, verschiedene Materialien*. 2019, Springer Spektrum. p. 126-127.
- [3.] Ivoclar Vivadent, *IPS e.max ZirCAD Prime Zirkoniumoxid neu definiert*. 2019. [Online]. Available: [https://www.ivoclarvivadent.de/medias/sys\\_master/celum-connect2-assets/celum-connect2-assets/h6c/h47/10213171167262/IPS-e-max-ZirCAD-Prime.pdf](https://www.ivoclarvivadent.de/medias/sys_master/celum-connect2-assets/celum-connect2-assets/h6c/h47/10213171167262/IPS-e-max-ZirCAD-Prime.pdf). Accessed: 03.09.2020.
- [4.] Ueda, K., et al., *Light transmittance by a multi-coloured zirconia material*. Dent Mater J, 2015. 34(3): p. 310-4.
- [5.] Alsarani, M., et al., *Influence of crown design and material on chipping-resistance of all-ceramic molar crowns: An in vitro study*. Dent Med Probl, 2018. 55(1): p. 35-42.
- [6.] Rosentritt, M., et al., *Fatigue and wear behaviour of zirconia materials*. J Mech Behav Biomed Mater, 2020. 110: p. 103970.
- [7.] Dentona, *Optimill Multilayer 3D Zirkoniumoxidblock Gebrauchsanweisung*. 2016.
- [8.] Stawarczyk, B., A. Kieschnick, and M. Rosentritt, *25 Jahre Zirkonoxid - sind wir am Ziel angekommen?* Dental Digital Magazin, 2020. p. 56-61. [Online]. Available: [https://dentaletexte.de/wp-content/uploads/2016/06/dedig1\\_20\\_LMU\\_Zirkonoxid.pdf](https://dentaletexte.de/wp-content/uploads/2016/06/dedig1_20_LMU_Zirkonoxid.pdf). Accessed: 07.08.2021
- [9.] Piconi, C. and G. Maccauro, *Zirconia as a ceramic biomaterial*. Biomaterials, 1999. 20(1): p. 1-25.
- [10.] Sailer, I., et al., *All-ceramic or metal-ceramic tooth-supported fixed dental prostheses (FDPs)? A systematic review of the survival and complication rates. Part I: Single crowns (SCs)*. Dent Mater, 2015. 31(6): p. 603-23.
- [11.] Balmer, M., et al., *Zirconia implants restored with single crowns or fixed dental prostheses: 5-year results of a prospective cohort investigation*. Clin Oral Implants Res, 2020. 31(5): p. 452-462.

## Literaturverzeichnis

- [12.] DGPro, DGZMK., *Patientenleitlinie - Vollkeramische Kronen und Brücken*. 2016.
- [13.] Burkhardt, F., et al., *Einteilige keramische Implantate - digital geplant und hülsenlos geführt inseriert*. ZWR - Das Deutsche Zahnärzteblatt, 2020. 129(05): p. 218-224.
- [14.] Conrad, H.J., W.J. Seong, and I.J. Pesun, *Current ceramic materials and systems with clinical recommendations: a systematic review*. J Prosthet Dent, 2007. 98(5): p. 389-404.
- [15.] Rinke, S., *Vollkeramik - Ein Praxiskonzept*. 2012: Quintessenz Verlag. 8-13.
- [16.] Hohmann, A.H., *Lehrbuch der Zahntechnik*. Vol. 3. 2005: Quintessenz Verlag GmbH.
- [17.] Gracis, S., et al., *A new classification system for all-ceramic and ceramic-like restorative materials*. Int J Prosthodont, 2015. 28(3): p. 227-35.
- [18.] Lohbauer, U., R. Belli, and M. Wendler, *Keramische Werkstoffe*, in *Werkstoffkunde in der Zahnmedizin*. 2018, Thieme. p. 239-300.
- [19.] Zscherlich, D., E. Mitzner, and W.-D. Müller, *Werkstoffkundliche Betrachtung eines neuen keramischen Reparaturmaterials*. Quintessenz Zahntechnik, 2009. 35(3): p. 302-310. [Online]. Available: [http://dev.denseo.de/files/presse/national/Quintessenz\\_Zahntechnik\\_\(03-2009\).pdf](http://dev.denseo.de/files/presse/national/Quintessenz_Zahntechnik_(03-2009).pdf). Accessed: 22.05.2021
- [20.] Strub, J.R., et al., *Curriculum Prothetik - Band II (4. Auflage)* 2011: Quintessenz Verlag. 485-490.
- [21.] Zhang, Y. and J.R. Kelly, *Dental Ceramics for Restoration and Metal Veneering*. Dent Clin North Am, 2017. 61(4): p. 797-819.
- [22.] Ivoclar Vivadent, *IPS e.max CAD*. Available from: [https://www.ivoclarvivadent.com/de\\_AT/Products/Digital-Processes/IPS-e.max-CAD](https://www.ivoclarvivadent.com/de_AT/Products/Digital-Processes/IPS-e.max-CAD). Accessed: 13.03.2021
- [23.] Kern, M., et al., *Vollkeramik auf einen Blick*. 2012: Eigenverlag der Arbeitsgemeinschaft für Keramik in der Zahnheilkunde e.V.
- [24.] Kieschnick, A. *Dentale Vollkeramik - Einteilung und Indikation*. 2019. Available from: <https://henryschein-mag.de/vollkeramik/>. Accessed 20.11.2020
- [25.] Manhart, J. and H. Schenk, *Vollkeramik: Was, wann, wie?* ZWP Special, 2010. 1+2: p. 4-10.

- [26.] Rödinger, M. *Dentale Technologien - Keramische Systeme*. Available from: [http://buntgefaerbt.de/safe/downloads/Dentale\\_Technologie\\_Keramik.pdf](http://buntgefaerbt.de/safe/downloads/Dentale_Technologie_Keramik.pdf). Accessed: 13.05.2021
- [27.] Renk, A., *Werkstoffkunde II - Anwendung und Verfahrenstechniken*. 2013.
- [28.] Schmitter, M., *Metallfreie Restaurationen bei herausnehmbarem Zahnersatz*. *Der Freie Zahnarzt*, 2019. 63(7): p. 72-81.
- [29.] Rinke, S., *Implantatgestützte vollkeramische Einzelkronen*. *Der Freie Zahnarzt*, 2011. 55(7): p. 60-68.
- [30.] Glauser, R., et al., *Experimental zirconia abutments for implant-supported single-tooth restorations in esthetically demanding regions: 4-year results of a prospective clinical study*. *Int J Prosthodont*, 2004. 17(3): p. 285-90.
- [31.] Canullo, L., *Clinical outcome study of customized zirconia abutments for single-implant restorations*. *Int J Prosthodont*, 2007. 20(5): p. 489-93.
- [32.] Strub, J.R., et al., *Curriculum Prothetik - Band II (4. Auflage)* 2011: Quintessenz Verlag. 490-493.
- [33.] Arnold, B., *Zirkoniumoxid in der Technik in Zirkon, Zirkonium, Zirkonia-ähnliche Namen, verschiedene Materialien*. 2019. p. 105-109.
- [34.] Zhou, J., J. Zhang, and Z. Zhong, *Mechanical properties of yttria-stabilized zirconia: A study by ReaxFF molecular dynamics simulations*. *Mechanics of Materials*, 2020. 149: p. 103542.
- [35.] Arnold, B., *Zirkoniumoxid und die Lambdasonde, in Zirkon, Zirkonium, Zirkonia-ähnliche Namen, verschiedene Materialien*. 2019. p. 115-116.
- [36.] Stawarczyk, B., et al., *Three generations of zirconia: From veneered to monolithic. Part I*. *Quintessence Int*, 2017. 48(5): p. 369-380.
- [37.] Stawarczyk, B., et al., *Three generations of zirconia: From veneered to monolithic. Part II*. *Quintessence Int*, 2017. 48(6): p. 441-450.
- [38.] Kohorst, P. and M. Stiesch-Scholz. *Zirkoniumdioxid - Eine Keramik auf dem Weg zum Goldstandard*. *ZWP Online* 2011. Available from: <https://www.zwp-online.info/fachgebiete/zahntechnik/werkstoffe/zirkoniumdioxid-eine-keramik-auf-dem-weg-zum-goldstandard>. Accessed: 20.11.2020
- [39.] Sturzenegger, B., et al., *Klinische Studie von Zirkonoxid- brücken im Seitenzahnggebiet hergestellt mit dem DCM-System*. *Acta Medicinae Deniunt Helvetica*, 2000. 5: p. 131-139.

## Literaturverzeichnis

- [40.] Luthy, H., et al., *Strength and reliability of four-unit all-ceramic posterior bridges*. Dent Mater, 2005. 21(10): p. 930-7.
- [41.] Stephan, M., *Werkstoff Zirkoniumdioxid*. Das Dental-Labor, 2015. LXIII(2):2.
- [42.] Chevalier, J. and L. Gremillard, *Ceramic - Inert Ceramics*, in *Comprehensive Biomaterials II*. 2017, Elsevier. p. 124-138.
- [43.] Rimondini, L., et al., *Bacterial colonization of zirconia ceramic surfaces: an in vitro and in vivo study*. Int J Oral Maxillofac Implants, 2002. 17(6): p. 793-8.
- [44.] Christensen, G.J., *Is the rush to all-ceramic crowns justified?* J Am Dent Assoc, 2014. 145(2): p. 192-4.
- [45.] Chen, Y.W., et al., *Zirconia in biomedical applications*. Expert Rev Med Devices, 2016. 13(10): p. 945-963.
- [46.] Gängler, P., et al., *Konservierende Zahnheilkunde und Parodontologie*. Vol. 3. Thieme Verlag.
- [47.] Arnold, B., *Zirkoniumoxid-Werkstoffe*, in *Zirkon, Zirkonium, Zirkonia-ähnliche Namen, verschiedene Materialien*. 2019, Springer Spektrum. p. 78-82.
- [48.] Arnold, B., *Zirkoniumoxid versus Aluminiumoxid*, in *Zirkon, Zirkonium, Zirkonia-ähnliche Namen, verschiedene Materialien*. 2019, Springer Spektrum. p. 90.
- [49.] Lindigkeit, J.r. *Die Anwendung von Titan für implantatgetragene Suprastrukturen Teil 1: Allgemeine Aspekte*. <https://www.dentaurum.de/files/Titan-1.pdf>. Accessed: 13.08.2020
- [50.] Arnold, B., *Keramische Werkstoffe und Glas*, in *Werkstofftechnik für Wirtschaftsingenieure*. 2017, Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg. p. 275-292.
- [51.] Kunzelmann, K.-H., P. Pospiech, and M. Kern, *Hat sich Vollkeramik bewährt. Eine Positionspfeilung in der Kons und Prothetik*. dentalfresh, 2007. 2: p. 16-19.
- [52.] Christel, P., et al., *Mechanical properties and short-term in-vivo evaluation of yttrium-oxide-partially-stabilized zirconia*. J Biomed Mater Res, 1989. 23(1): p. 45-61.
- [53.] Arnold, B., *Die Kristallwelt des Zirkoniumoxids*, in *Zirkon, Zirkonium, Zirkonia-ähnliche Namen, verschiedene Materialien*. 2019, Springer Spektrum. p. 70-73.
- [54.] Roos, E. and K. Maile, *Keramische Werkstoffe*. In: *Werkstoffkunde für Ingenieure*, in *Werkstoffkunde für Ingenieure*. 2008, Springer-Verlag. p. 295-311.

## Literaturverzeichnis

- [55.] Jansen, J.U., N. Lümke, and B. Stawarczyk *Bringt uns das Angebot an Zirkonoxid noch um?* ZMK - Zahnheilkunde, Management, Kultur, 2017.
- [56.] Reich, S., *Vom Gerüstwerkstoff zur ästhetischen Universallösung.* BZB Online (Bayrisches Zahnärzteblatt), 2018: p. 61-67.
- [57.] Pospiech, P., *Keramik - Vollkeramik.* 2006, 3M ESPE.
- [58.] Moqbel, N.M., et al., *Influence of Aging on Biaxial Flexural Strength and Hardness of Translucent 3Y-TZP.* Materials (Basel), 2019. 13(1).
- [59.] Candido, L.M., et al., *Mechanical and Surface Properties of Monolithic Zirconia.* Oper Dent, 2018. 43(3): p. E119-E128.
- [60.] Gebhardt, A. and J.-C. Todd, *IPS e.max ZirCAD Wissenschaftliche Dokumentation.* 2017.
- [61.] Greitens, U., *Wie transluzent hätten Sie es denn gerne?* Quintessenz Zahntechnik, 2016. 42(8): p. 1128-1138.
- [62.] Nistor, L., et al., *Zirconia Use in Dentistry - Manufacturing and Properties.* Current Health Sciences Journal, 2019. 45(1): p. 28-35.
- [63.] Schmitter, M., *Chipping bei Zirkoniumdioxid-gestütztem Zahnersatz.* Wissen kompakt, 2010. 4: p. 25-34.
- [64.] Camposilvan, E., et al., *Aging resistance, mechanical properties and translucency of different yttria-stabilized zirconia ceramics for monolithic dental crown applications.* Dent Mater, 2018. 34(6): p. 879-890.
- [65.] *DIN EN ISO 6872.* 2015.
- [66.] Koenig, V., et al., *Clinical behavior of second-generation zirconia monolithic posterior restorations: Two-year results of a prospective study with Ex vivo analyses including patients with clinical signs of bruxism.* J Dent, 2019. 91: p. 103229.
- [67.] Savic, D., *Der Allrounder unter den Zirkonoxiden der 4. Generation.* Digital Dental Magazin, 2019. issue 4: p. 62-66. <https://digital-dental-magazin.de/wp-content/uploads/2019/11/Der-Allrounder-unter-den-Zirkonoxiden-der-4.-Generation.pdf>. Accessed: 11.04.2021
- [68.] Zhang, Y., *Making yttria-stabilized tetragonal zirconia translucent.* Dent Mater, 2014. 30(10): p. 1195-203.
- [69.] Nordahl, N., P. Vult von Steyern, and C. Larsson, *Fracture strength of ceramic monolithic crown systems of different thickness.* J Oral Sci, 2015. 57(3): p. 255-61.

## Literaturverzeichnis

- [70.] Stawarczyk, B., *Keramische Werkstoffe in der Festsitzenden Prothetik*. Quintessence Int, 2017. 1(1).
- [71.] Kieschnick, A., M. Rosentritt, and B. Stawarczyk. *Zirkonoxide*. zm online 2019. Available from: <https://www.zm-online.de/archiv/2019/05/zahnmedizin/zirkonoxide/>. Accessed: 01.07.2021
- [72.] Jansen, J.U., et al., *Comparison of fracture toughness measurements for zirconia materials using two test methods*. Dent Mater J, 2019. 38(5): p. 806-812.
- [73.] Schmidseher, J. and T. Munz, *Farbatlant der Zahnmedizin - Ästhetische Zahnmedizin*. 2009: Georg Thieme Verlag KG.
- [74.] Noetzel, J. and A.M. Kielbassa, *Frontzahnästhetik mit Kompositen*. Cosmetic Dentistry, 2007. 2: p. 20-26.
- [75.] Deany, I.L., *Recent advances in ceramics for dentistry*. Crit Rev Oral Biol Med, 1996. 7(2): p. 134-43.
- [76.] Elsaka, S.E., *Optical and Mechanical Properties of Newly Developed Monolithic Multilayer Zirconia*. Journal of Prosthodontics, 2019. 28(1): p. e279-e284.
- [77.] Ivoclar Vivadent, *IPS e.max ZirCAD Labside Gebrauchsinformation*. 2019.
- [78.] Amann Girrbaach, *zolid fx multilayer*, A. Girrbaach, Editor. 2018. [Online]. Available: [https://www.amanngirrbach.com/fileadmin/\\_agweb\\_2013/media/mediathek/Print/Catalogues\\_Brochures/Brochures/DE/Zolid\\_FX\\_Multilayer\\_Bloecke\\_DE.pdf](https://www.amanngirrbach.com/fileadmin/_agweb_2013/media/mediathek/Print/Catalogues_Brochures/Brochures/DE/Zolid_FX_Multilayer_Bloecke_DE.pdf). Accessed: 19.11.2020
- [79.] Kim, J.D. and S.B. Park, *Method of Manufacturing Multilayer Zirconia Block for Artificial Teeth in Patent Application Publication*. 2016: United States.
- [80.] Sulaiman, T.A., *Materials in digital dentistry-A review*. J Esthet Restor Dent, 2020. 32(2): p. 171-181.
- [81.] Tinschert, J., et al., *Status of Current CAD/CAM Technology in Dental Medicine Stand der aktuellen CAD/CAM-Technik in der Zahnmedizin*. Int. J. Comput. Dent, 2004. 7(1): p. 25-45.
- [82.] Burgard, I. *Zirkoniumdioxid*. ZWP Online 2011. Available from: <https://www.zwp-online.info/fachgebiete/zahntechnik/werkstoffe/zirkoniumdioxid>. Accessed: 20.11.2020

## Literaturverzeichnis

- [83.] Luthardt, R., et al. *Aktuelle CAD/CAM-Systeme zur Herstellung von keramischem Zahnersatz*. 2001. Available from: <https://docplayer.org/1853897-Aktuelle-cad-cam-systeme-zur-herstellung-von-keramischem-zahnersatz-einleitung-von-r-luthardt-h-rudolph-o-sandkuhl-und-m.html>. Accessed: 20.11.2020
- [84.] Hülsenberg, D., *Keramik - Wie ein alter Werkstoff hochmodern wird*. 2014: Springer Verlag 54.
- [85.] Lucas, T.J., et al., *Effect of grain size on the monoclinic transformation, hardness, roughness, and modulus of aged partially stabilized zirconia*. Dent Mater, 2015. 31(12): p. 1487-92.
- [86.] Lehrstuhl für Nichtmetallische Werkstoffe, *Sintern*. p. 2-4.
- [87.] Rüssel, C., *Silicat- und Oxidkeramiken - Skript zur Vorlesung*. 2008.
- [88.] Kuraray Noritake Dental Inc., *Technische Informationen Katana Zirconia Multi-layered Serie*. 2017. [Online]. Available: [https://www.kuraraynoritake.eu/pub/media/pdfs/260617\\_SF\\_KATANA\\_TechGuide\\_DRUCK1\\_5.pdf](https://www.kuraraynoritake.eu/pub/media/pdfs/260617_SF_KATANA_TechGuide_DRUCK1_5.pdf). Accessed: 22.05.2021
- [89.] Amann Gurrbach, *Verarbeitungstechnik zolid DNA Generation*. 2020. p. 23. [Online]. Available: [https://www.amanngurrbach.com/fileadmin/\\_agweb\\_2013/media/mediathek/Print/Catalogues\\_Brochures/Brochures/DE/Indikationsleitfaden\\_Zirkon\\_DE.pdf](https://www.amanngurrbach.com/fileadmin/_agweb_2013/media/mediathek/Print/Catalogues_Brochures/Brochures/DE/Indikationsleitfaden_Zirkon_DE.pdf). Accessed: 22.05.2021
- [90.] Digital Direkt GmbH, *Erfolgsfaktor Sinterofen*. Dental Digital Magazin, 2016(3): p. 68-71.
- [91.] Jiang, L., et al., *Effects of sintering temperature and particle size on the translucency of zirconium dioxide dental ceramic*. J Mater Sci Mater Med, 2011. 22(11): p. 2429-35.
- [92.] Mondal, P., et al., *Enhanced specific grain boundary conductivity in nanocrystalline Y2O3-stabilized zirconia*. Solid State Ionics, 1999. 118(3-4): p. 331-339.
- [93.] Inokoshi, M., et al., *Influence of sintering conditions on low-temperature degradation of dental zirconia*. Dental Materials, 2014. 30(6): p. 669-678.
- [94.] Arnold, B., *Künstliches Zirkoniumoxid*, in *Zirkon, Zirkonium, Zirkonia-ähnliche Namen, verschiedene Materialien*. 2019, Springer Spektrum. p. 63.
- [95.] Carl von Ossietzky Universität Oldenburg. (2018/2019), *Einführung in die Fehlerrechnung*. 2018/2019: Physik-Praktikum für Studierende des Studiengangs Bachelor-Chemie.

## Literaturverzeichnis

- [96.] Anusavice, K.J., K. Kakar, and N. Ferree, *Which mechanical and physical testing methods are relevant for predicting the clinical performance of ceramic-based dental prostheses?* Clin Oral Implants Res, 2007. 18 Suppl 3: p. 218-31.
- [97.] Fischer, J., *Mechanische Eigenschaften metallischer und keramischer Werkstoffe*. Quintessenz Zahntechnik 2009. 35(12): p. 1540-1549.
- [98.] Fischer, J., B. Stawarczyk, and C.H.F. Hämmerle, *Biegefestigkeit von Verblendkeramiken für Zirkoniumdioxid : hat die Prüfmethode einen Einfluss auf die Werte?* Quintessenz Zahntechnik, 2008. 34(9): p. 1138-1145.
- [99.] Jin, J., H. Takahashi, and N. Iwasaki, *Effect of test method on flexural strength of recent dental ceramics*. Dent Mater J, 2004. 23(4): p. 490-6.
- [100.] Gernet, W., et al., *Zahnärztliche Prothetik*. 2011: Thieme Verlag. 73-76.
- [101.] Brevier Technische Keramik, *Weibull-Modul*. Available from: [http://www.keramverband.de/brevier\\_dt/5/3/3/5\\_3\\_3\\_4.htm](http://www.keramverband.de/brevier_dt/5/3/3/5_3_3_4.htm). Accessed: 03.10.2020
- [102.] Khalili, A. and K. Kromp, *Statistical properties of Weibull estimators*. Journal of materials science, 1991. 26(24): p. 6741-6752.
- [103.] Tinschert, J.N. and G. Natt, *Oxidkeramiken und CAD/CAM-Technologien: Atlas für Klinik, Labortechnik und Werkstoffkunde*. 2007: Deutscher Ärzteverlag.
- [104.] Çetinel, A.F., *Oberflächendefektausheilung und Festigkeitssteigerung von niederdruckspritzgegossenen Mikrobiegebalken aus Zirkoniumdioxid*. 2013: KIT Scientific Publishing.
- [105.] *DIN EN ISO 843-4*. 2005.
- [106.] Mansour, R.M. and R.J. Reynik, *In vivo occlusal forces and moments: I. Forces measured in terminal hinge position and associated moments*. J Dent Res, 1975. 54(1): p. 114-20.
- [107.] Reicherter, G., *Die Härteprüfungen nach Brinell, Rockwell, Vickers*. 2013: Springer Verlag.
- [108.] Yener, E.S., M. Özcan, and E. Kazazoğlu, *A comparative study of biaxial flexural strength and Vickers microhardness of different zirconia materials: Effect of glazing and thermal cycling*. Brazilian dental science, 2015. 18: p. 19-30.
- [109.] Struers GmbH, *Härteprüfung nach Rockwell*. Available from: <https://www.struers.com/de-DE/Knowledge/Hardness-testing/Rockwell#application>. Accessed: 19.11.2020

- [110.] Bauch, J. and R. Rosenkranz, *Physikalische Werkstoffdiagnostik*. 2017: Springer-Verlag.
- [111.] Ecke, G. *Mikro- und Nanoanalytik*. Available from: <https://docplayer.org/9518098-Mikro-und-nanoanalytik.html>. Accessed: 23.09.2020
- [112.] Ternes, W., *Biochemie der Elemente - Die Elemente der 4. Hauptgruppe: die Titangruppe*. 2013: Springer Verlag.
- [113.] [www.periodensystem.info](http://www.periodensystem.info). *Titangruppe*. Available from: <http://www.periodensystem.info/elemente/gruppe/titangruppe>. Accessed: 11.11.2020
- [114.] Joel USA, I. *JEOL EDS Periodic Table*. 2019. Available from: <https://www.jeolusa.com/RESOURCES/JEOL-Posters-Calendar/lc/47251/lcv/s/jeol-eds-periodic-table>. Accessed: 11.11.2020
- [115.] Arnold, B., *Hafnium - Zwillingsbruder vom Zirkonium*, in *Zirkon, Zirkonium, Zirkonia-ähnliche Namen, verschiedene Materialien*. 2019, Springer Spektrum. p. 37-40.
- [116.] Hülsenberg, D., *Keramik - Wie ein alter Werkstoff hochmodern wird*. 2014. 128.
- [117.] Arnold, B., *Zirkon - ein echter Edelstein*, in *Zirkon, Zirkonium, Zirkonia-ähnliche Namen, verschiedene Materialien*. 2019, Springer Spektrum. p. 12.
- [118.] Ivoclar Vivadent, *IPS e.max ZirCAD Prime - Vollkeramik neu definiert*. 2019.
- [119.] Amann Girrbach, *zolid fx multilayer*. Available from: <https://www.amanngirrbach.com/de/produkte/cadcam-materialien/keramik/zolid-zirconia/zolid-fx-multilayer/>. Accessed: 02.11.2020
- [120.] Rayar, S., et al., *Effect of 2% Chlorhexidine on Resin Bond Strength and Mode of Failure Using Two Different Adhesives on Dentin: An In Vitro Study*. J Pharm Bioallied Sci, 2019. 11(Suppl 2): p. S325-S330.
- [121] Povh, B., *Flüssigkeit und Gas*, in *Anschauliche Physik: für Naturwissenschaftler*. 2011, Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg. p. 75-89.
- [122.] Poole, S.F., et al., *Physical properties of conventional and monolithic yttria-zirconia materials after low-temperature degradation*. Ceramics International, 2019. 45.
- [123.] Ivoclar Vivadent, *IPS e.max ZirCAD Prime Translucency Imm*. 2019: ZirCAD Labside Gebrauchsinformation.

- [124.] Rosentritt, M., et al., *Multilayer zirconia: Influence of positioning within blank and sintering conditions on the in vitro performance of 3-unit fixed partial dentures*. J Prosthet Dent, 2020.
- [125.] Shen, J., et al., *Evaluation of the effect of low-temperature degradation on the translucency and mechanical properties of ultra-transparent 5Y-TZP ceramics*. Ceramics International, 2020. 46(1): p. 553-559.
- [126.] Dehestani, M. and E. Adolfsson, *Phase Stability and Mechanical Properties of Zirconia and Zirconia Composites*. International Journal of Applied Ceramic Technology, 2013. 10(1): p. 129-141.
- [127.] Jerman, E., et al., *Evaluation of translucency, Marten's hardness, biaxial flexural strength and fracture toughness of 3Y-TZP, 4Y-TZP and 5Y-TZP materials*. Dental Materials, 2021. 37(2): p. 212-222.
- [128.] Gale, M.S. and B.W. Darvell, *Thermal cycling procedure for laboratory testing of dental restorations*. Journal of Dentistry 1999. 27(2): p. 89-99.
- [129.] Kontonasaki, E., et al., *Monolithic Zirconia: An Update to Current Knowledge. Optical Properties, Wear, and Clinical Performance*. Dent J (Basel), 2019. 7(3).
- [130.] Jansen van Vuuren, L., et al., *Maximum voluntary bite force, occlusal contact points and associated stresses on posterior teeth*. Journal Royal Society of New Zealand, 2019. 50(1): p. 132-143.
- [131.] *Zirkoniumoxid*. Material Magazin. Available from: <https://www.materialmagazin.com/index.php/keramik/zirkoniumoxid>. Accessed: 06.12.2020
- [132.] Shah, K., J.A. Holloway, and I.L. Denry, *Effect of coloring with various metal oxides on the microstructure, color, and flexural strength of 3Y-TZP*. Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials, 2008. 87B(2): p. 329-337.
- [133.] Bühler-Zemp, P., T. Völkel, and K. Fischer, *IPS e.max® Press - Wissenschaftliche Dokumentation*. 2011, Ivoclar Vivadent.
- [134.] lenntech.de. *Yttrium*. Available from: <https://www.lenntech.de/pse/elemente/y.htm>. Accessed: 27.12.2020
- [135.] Kolakarnprasert, N., et al., *New multi-layered zirconias: Composition, microstructure and translucency*. Dent Mater, 2019. 35(5): p. 797-806.
- [136.] Kohorst, P., et al., *Low-temperature degradation of different zirconia ceramics for dental applications*. Acta Biomater, 2012. 8(3): p. 1213-20.

- [137] Borchers, L., et al., *Influence of hydrothermal and mechanical conditions on the strength of zirconia*. Acta Biomater, 2010. 6(12): p. 4547-52.
- [138.] Chevalier, J., et al., *The Tetragonal-Monoclinic Transformation in Zirconia: Lessons Learned and Future Trends*. Journal of the American Ceramic Society 2009. 92(9): p. 1901-1920.
- [139.] Holman, C.D., et al., *Assessing Flexural Strength Degradation of New Cubic Containing Zirconia Materials*. J Contemp Dent Pract, 2020. 21(2): p. 114-118.
- [140.] Carrabba, M., et al., *Translucent zirconia in the ceramic scenario for monolithic restorations: A flexural strength and translucency comparison test*. J Dent, 2017. 60: p. 70-76.
- [141.] Kwon, S.J., et al., *Comparison of the mechanical properties of translucent zirconia and lithium disilicate*. J Prosthet Dent, 2018. 120(1): p. 132-137.
- [142.] Sulaiman, T.A., et al., *Effect of different treatments on the flexural strength of fully versus partially stabilized monolithic zirconia*. J Prosthet Dent, 2017. 118(2): p. 216-220.
- [143.] Witz, G., et al., *Phase Evolution in Ytria-Stabilized Zirconia Thermal Barrier Coatings Studied by Rietveld Refinement of X-Ray Powder Diffraction Patterns*. Journal of the American Ceramic Society, 2007. 90(9): p. 2935-2940.
- [144.] Sulaiman, T.A., et al., *The effect of staining and vacuum sintering on optical and mechanical properties of partially and fully stabilized monolithic zirconia*. Dent Mater J, 2015. 34(5): p. 605-10.
- [145.] Maruo, Y., et al., *Flexural properties, bond ability, and crystallographic phase of highly translucent multi-layered zirconia*. Journal of Applied Biomaterials and Functional materials, 2020. 18: p. 2280800020942717.
- [146.] Trunec, M., *Effect of grain size on mechanical properties of 3Y-TZP ceramics*. Ceramics - Silikaty, 2008. 52(3): p. 165-171.
- [147.] Zhang, F., et al., *Strength, toughness and aging stability of highly-translucent Y-TZP ceramics for dental restorations*. Dent Mater, 2016. 32(12): p. e327-e337.
- [148.] Nogiwa-Valdez, A.A., et al., *Deceleration of hydrothermal degradation of 3Y-TZP by alumina and lanthana co-doping*. Acta Biomater, 2013. 9(4): p. 6226-35.
- [149.] Nakamura, K., et al., *Effect of low-temperature degradation on the mechanical and microstructural properties of tooth-colored 3Y-TZP ceramics*. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2016. 53: p. 301-311.

## Literaturverzeichnis

- [150.] Marro, F.G., A. Mestra, and M. Anglada, *Weibull strength statistics of hydrothermally aged 3 mol% yttria-stabilised tetragonal zirconia*. *Ceramics International*, 2014. 40(8): p. 12777-12782.
- [151.] Arnold, B., *Zirkoniumoxid - ein vielseitiges Material*, in *Zirkon, Zirkonium, Zirkonia-ähnliche Namen, verschiedene Materialien*. 2019, Springer Spektrum. p. 55.
- [152.] Majic Renjo, M., et al., *Indentation size effect of Y-TZP dental ceramics*. *Dent Mater*, 2014. 30(12): p. e371-6.
- [153.] Rosentritt, M. and V. Preis. *Wie behandle ich Zirkonoxid?* *Zahntechnik Magazin* 2012. Available from: [https://www.ztm-aktuell.de/technik/werkstoffe/story/wie-behandle-ich-zirkonoxid\\_\\_2038.html](https://www.ztm-aktuell.de/technik/werkstoffe/story/wie-behandle-ich-zirkonoxid__2038.html). Accessed: 07.03.2021
- [154.] Mota, Y.A., et al., *Monoclinic phase transformation and mechanical durability of zirconia ceramic after fatigue and autoclave aging*. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, 2017. 105(7): p. 1972-1977.
- [155.] Fathy, S.M., et al., *Translucency of monolithic and core zirconia after hydrothermal aging*. *Acta Biomater Odontol Scand*, 2015. 1(2-4): p. 86-92.

## Abkürzungsverzeichnis

### I Abkürzungsverzeichnis

CaO	Calciumoxid
EDX	Elektrodispersive Röntgenspektroskopie
FeCl <sub>3</sub>	Eisen(III)-Chlorid
FSZ	fully stabilized Zirconia
g/cm <sup>3</sup>	Gramm pro Kubikzentimeter (Einheit für die Dichte)
Gew-%	Gewichtsprozent
HV	Vickershärte
kg	Kilogramm (Einheit für das Gewicht)
LTD	Low Temperature Degradation
m	monoklin
m.A.	mit Alterung
MgO	Magnesiumoxid
mm	Millimeter (Einheit für die Länge)
mm/s	Millimeter pro Sekunde (Einheit für die Geschwindigkeit)
Mol-%	Molprozent
MPa	Megapascal (Einheit für den Druck/die mechanische Spannung)
MW	Mittelwert
nm	Nanometer (Einheit für die Länge)
N	Newton (Einheit für die Kraft)
o.A.	ohne Alterung
PSZ	partially stabilized Zirconia
s	Sekunde (Einheit für die Zeit)
SD	Standardabweichung
t	tetragonal
TZP	eine in der tetragonalen Phase stabilisierte polykristalline Zirkoniumdioxidkeramik
Vol-%	Volumenprozent
Y-TZP	eine mit Yttriumoxid stabilisierte, tetragonale, polykristalline Zirkoniumdioxidkeramik
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Yttriumoxid

## II Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Einteilung der Dentalkeramiken .....	2
Abbildung 2: Phasenumwandlung .....	7
Abbildung 3: Schema der Transformationsverfestigung .....	9
Abbildung 4: Entwicklung der Zirkoniumdioxidkeramiken.....	11
Abbildung 5: Skizze vom 3-Punkt-Biegeversuch (links) und 4-Punkt-Biegeversuch (rechts).....	23
Abbildung 6: Skizze der biaxialen Biegeprüfung .....	23
Abbildung 7: Multilayer-Disk nach dem Fräsen.....	30
Abbildung 8: gefräster Zylinder im Weißlingzustand.....	31
Abbildung 9: Proben auf dem Träger vor dem Sintern.....	33
Abbildung 10: biaxiales Biegeplättchen nach Sinterung .....	33
Abbildung 11: Vergleich Multilayer-Zylinder vor und nach dem Sintern.....	34
Abbildung 12: Größenvergleich und Farbverlauf .....	34
Abbildung 13: Schematischer Ablauf der Versuche .....	36
Abbildung 14: Satorius Dichtebestimmungsgerät .....	38
Abbildung 15: Skizze des Probenkörpers auf den 3 Stahlkugeln .....	39
Abbildung 16: Prüfvorrichtung für die biaxiale Biegefestigkeit.....	40
Abbildung 17: Härteprüfmaschine Fisherscope HM 2000 LT.....	41
Abbildung 18: Schema der Härteprüfung nach Vickers .....	42
Abbildung 19: Schema EDX.....	43
Abbildung 20: Vergleich der Dichte (und Darstellung des Medians) der IPS e.max ZirCAD Prime Schichten (o.A. und m.A.).....	47
Abbildung 21: gebrochene ZirCAD-Proben .....	49
Abbildung 22: Vergleich der biaxialen Biegefestigkeit der IPS e.max ZirCAD Prime Schichten (o.A. und m.A.) .....	49
Abbildung 23: Streuung der ZirCAD-Festigkeitswerte (Schicht I; links: o.A., rechts: m.A.) .....	50
Abbildung 24: Streuung der ZirCAD-Festigkeitswerte (Schicht II; links: o.A., rechts: m.A.) .....	50

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 25: Streuung der ZirCAD-Festigkeitswerte (Schicht III; links: o.A., rechts: m.A.) .....	51
Abbildung 26: Streuung der ZirCAD-Festigkeitswerte (Schicht VI; links: o.A., rechts: m.A.) .....	51
Abbildung 27: Vergleich der Härte der IPS e.max ZirCAD Prime Schichten (o.A. und m.A.) .....	53
Abbildung 28: Trendlinien der Gewichtsverteilung der einzelnen Bestandteile im IPS e.max ZirCAD Prime <i>(mit freundlicher Genehmigung von Jürgen Dettinger (Dipl. Ökonom, M.A.; Ivoclar Vivadent GmbH)</i> .....	55
Abbildung 29: Vergleich der Dichte (und Darstellung des Medians) der Dentona Optimill Multilayer 3D Schichten (o.A. und m.A) .....	57
Abbildung 30: Vergleich der biaxialen Biegefestigkeit der Dentona Optimill Multilayer 3D Schichten (o.A. und m.A).....	59
Abbildung 31: Streuung der Dentona-Festigkeitswerte (Schicht I; links: o.A., rechts: m.A.) .....	60
Abbildung 32: Streuung der Dentona-Festigkeitswerte (Schicht II; links: o.A., rechts: m.A.) .....	60
Abbildung 33: Streuung der Dentona-Festigkeitswerte (Schicht III; links: o.A., rechts: m.A.) .....	61
Abbildung 34: Streuung der Dentona-Festigkeitswerte (Schicht VI; links: o.A., rechts: m.A.) .....	61
Abbildung 35: Vergleich der Härte der Dentona Optimill Multilayer 3D Schichten (o.A. und m.A) .....	63
Abbildung 36: Trendlinien der Gewichtsverteilung der einzelnen Bestandteile im Dentona Optimill Multilayer 3D <i>(mit freundlicher Genehmigung von Jürgen Dettinger (Dipl. Ökonom, M.A.; Ivoclar Vivadent GmbH)</i> .....	64
Abbildung 37: Vergleich der Dichte (und Darstellung des Medians) der Ceramill Zolid fx multilayer Schichten (o.A. und m.A.).....	66
Abbildung 38: Vergleich der biaxialen Biegefestigkeit Ceramill Zolid fx multilayer Schichten (o.A. und m.A.) .....	68
Abbildung 39: Streuung der Ceramill-Festigkeitswerte (Schicht I; links: o.A., rechts: m.A.) .....	69

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 40: Streuung der Ceramill-Festigkeitswerte (Schicht II; links: o.A., rechts: m.A.) .....	69
Abbildung 41: Streuung der Ceramill-Festigkeitswerte (Schicht III; links: o.A., rechts: m.A.) .....	70
Abbildung 42: Streuung der Ceramill-Festigkeitswerte (Schicht VI; links: o.A., rechts: m.A.) .....	70
Abbildung 43: Vergleich der Härte der Ceramill zolid fx multilayer Schichten (o.A. und m.A.) .....	72
Abbildung 44: Trendlinien der Gewichtsverteilung der einzelnen Bestandteile im Ceramill zolid fx multilayer <i>(mit freundlicher Genehmigung von Jürgen Dettinger (Dipl. Ökonom, M.A.; Ivoclar Vivadent GmbH)</i> .....	73
Abbildung 45: Vergleich der Dichte o.A. ....	74
Abbildung 46: Vergleich der Dichte m.A. ....	75
Abbildung 47: Vergleich der biaxialen Biegefestigkeit o.A. ....	76
Abbildung 48: Vergleich der biaxialen Biegefestigkeit m.A. ....	76
Abbildung 49: Vergleich der Härte o.A. ....	77
Abbildung 50: Vergleich der Härte m.A. ....	77
<u>Im Anhang:</u>	
Abbildung 51: Geräteliste .....	6
Abbildung 52: Materialliste .....	6
Abbildung 53: Edx-Analyse IPS e.max ZirCAD Prime .....	8
Abbildung 54: Edx-Analyse Dentona Optimill Multilayer 3D .....	8
Abbildung 55: Edx-Analyse Ceramill zolid fx multilayer .....	9

### III Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Generationen der Zirkoniumdioxidkeramiken im Überblick.....	14
Tabelle 2: Übersicht Prüfkörper.....	29
Tabelle 3: Sinterparameter gemäß Herstellerangaben .....	32
Tabelle 4: Dichtewerte IPS e.max ZirCAD Prime.....	47
Tabelle 5: Dichtewerte Dentona Optimill Multilayer 3D .....	57
Tabelle 6: Dichtewerte Ceramill zolid fx multilayer .....	66
<u>Im Anhang:</u>	
Tabelle 7: Durchmesser der Keramik-Scheiben.....	7
Tabelle 8: Dichtewert von H <sub>2</sub> O bei Temp. ....	7
Tabelle 9: Ergebnisse Dichte IPS e.max ZirCAD Prime (ohne Alterung).....	9
Tabelle 10: Ergebnisse Dichte IPS e.max ZirCAD Prime (mit Alterung).....	12
Tabelle 11: Ergebnisse Dichte Dentona Optimill Multilayer 3D (ohne Alterung).....	15
Tabelle 12: Ergebnisse Dichte Dentona Optimill Multilayer 3D (mit Alterung) .....	18
Tabelle 13: Ergebnisse Dichte Ceramill zolid fx multilayer (ohne Alterung) .....	21
Tabelle 14: Ergebnisse Dichte Ceramill zolid fx multilayer (mit Alterung).....	24
Tabelle 15: Ergebnisse biaxiale Biegefestigkeit IPS e.max ZirCAD Prime (ohne Alterung) .....	27
Tabelle 16: Ergebnisse biaxiale Biegefestigkeit IPS e.max ZirCAD Prime (mit Alterung) .....	30
Tabelle 17: Ergebnisse biaxiale Biegefestigkeit Dentona Optimill Multilayer 3D (ohne Alterung) .....	33
Tabelle 18: Ergebnisse biaxiale Biegefestigkeit Dentona Optimill Multilayer 3D (mit Alterung) .....	36
Tabelle 19: Ergebnisse biaxiale Biegefestigkeit Ceramill zolid fx multilayer (ohne Alterung) .....	39
Tabelle 20: Ergebnisse biaxiale Biegefestigkeit Ceramill zolid fx multilayer (mit Alterung) .....	43
Tabelle 21: Ergebnisse Härte IPS e.max ZirCAD Prime .....	47
Tabelle 22: Ergebnisse Dentona Optimill Multilayer 3D .....	49
Tabelle 23: Ergebnisse Härte Ceramill zolid fx Multilayer .....	51

## Anhang

### Anhang

<b>Geräteliste</b>		
<b>Probenherstellung</b>	Handstück (KaVo Typ 4941) Sirona InLab MC X5 Modellsäge (S-G 350) Sinterofen Programat S1 1600	KaVo Dental GmbH; Biberach, Deutschland Dentsply Sirona Deutschland GmbH; Bensheim, Deutschland Harnisch+Rieth; Winterbach, Deutschland Ivoclar Vivadent AG; Schaan, Liechtenstein
<b>Prüfungen</b>		
Dichte	Sartorius Dichtebestimmungsset	Sartorius AG; Göttingen, Deutschland
biaxiale Biegefestigkeit	Universalmaschine 2,5 kN zwicki	Zwick/Roell; Ulm, Deutschland
Härte	Poliergerät MetaServ 3000 Stereomikroskop Leica EZ4W Fisherscope 340	Buchler; Essingen am Neckar, Deutschland Leica Microsystems GmbH, 35578 Wetzlar Helmut Fischer GmbH; Sindelfingen, Deutschland
EDX-Analyse	REM Zeiss Crossbeam	Carl Zeiss Microscopy Deutschland GmbH; Oberkochen, Deutschland

**Abbildung 51: Geräteliste**

<b>Materialiste</b>		
<b>Keramiken</b>	<u>IPS e.max ZirCAD Prime</u> Lot Y24827 Lot Y20694 Lot Y31035 Lot Y38334 Lot Y38334 Lot Y38334	Ivoclar Vivadent AG; Schaan, Liechtenstein
	<u>Dentona Optimill Multilayer 3D</u> LOT W181023ATA3M-09-3D LOT W181023ATA3M-09-3D LOT W190317ATA3M-09-3D LOT W190317ATA3M-011-3D LOT W190317ATA3M-01-3D	Dentona; Dortmund, Deutschland
	<u>Ceramill zolid fx multilayer</u> Lot 190900 (-43) Lot 190866 (-25) Lot 190800 (-22) Lot 190900 (-86) Lot 191100 (-07)	Amann Girrback; Koblach, Österreich
<b>Probenherstellung</b>	Fräse Steinchen SiC-Nassschleifpapier Grafitfreier Stift Permanenter Marker Digitale Schieblehre SolidWorks 2018	Hermes Schleifmittel GmbH; 22547 Hamburg, Deutschland  Gustav Stursberg GmbH; 42899 Remscheid, Deutschland Dessault Systèmes SolidWorks Corporation; Waltham, USA
<b>Prüfungen</b>		
Dichte	Thermometer Destilliertes Wasser	
Biaxiale Biegefestigkeit	Stahlkugeln Stempel Digitale Schieblehre Polypropylenfolie Pinzette	Gustav Stursberg GmbH; 42899 Remscheid, Deutschland Falken GmbH; Peitz, Deutschland
Härte	Software TestXpert II V63.2 Silikonformer Technovit 4071 SiC-Nassschleifpapier Probenträger Ivoren-Kunststoff Software WIN-HCU	Zwick/Roell; Ulm, Germany  Kulzer GmbH; 63450 Hanau, Deutschland Hermes Schleifmittel GmbH; 22547 Hamburg, Deutschland  Ivoclar Vivadent AG; Schaan, Liechtenstein Helmut Fischer GmbH; Sindelfingen, Deutschland
EDX-Analyse	Sputter coater K550	EMITECH Group; Montigny-le-Bretonneux, Frankreich

**Abbildung 52: Materialliste**

## Anhang

**Tabelle 7: Durchmesser der Keramik-Scheiben**

Material	Durchmesser der Scheibe
IPS e.max ZirCAD Prime	98,5mm
Optimill Multilayer 3D (Dentona)	98,3mm
Zolid fx multilayer (Amann Girrbach)	98mm

**Tabelle 8: Dichtewert von H<sub>2</sub>O bei Temp.**

### Dichtewerte von H<sub>2</sub>O bei Temperatur T (in °C)

T/°C	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
10.	0,99973	0,99972	0,99971	0,99970	0,99969	0,99968	0,99967	0,99966	0,99965	0,99964
11.	0,99963	0,99962	0,99961	0,99960	0,99959	0,99958	0,99957	0,99956	0,99955	0,99954
12.	0,99953	0,99951	0,99950	0,99949	0,99948	0,99947	0,99946	0,99944	0,99943	0,99942
13.	0,99941	0,99939	0,99938	0,99937	0,99935	0,99934	0,99933	0,99931	0,99930	0,99929
14.	0,99927	0,99926	0,99924	0,99923	0,99922	0,99920	0,99919	0,99917	0,99916	0,99914
15.	0,99913	0,99911	0,99910	0,99908	0,99907	0,99905	0,99904	0,99902	0,99900	0,99899
16.	0,99897	0,99896	0,99894	0,99892	0,99891	0,99889	0,99887	0,99885	0,99884	0,99882
17.	0,99880	0,99879	0,99877	0,99875	0,99873	0,99871	0,99870	0,99868	0,99866	0,99864
18.	0,99862	0,99860	0,99859	0,99857	0,99855	0,99853	0,99851	0,99849	0,99847	0,99845
19.	0,99843	0,99841	0,99839	0,99837	0,99835	0,99833	0,99831	0,99829	0,99827	0,99825
20.	0,99823	0,99821	0,99819	0,99817	0,99815	0,99813	0,99811	0,99808	0,99806	0,99804
21.	0,99802	0,99800	0,99798	0,99795	0,99793	0,99791	0,99789	0,99786	0,99784	0,99782
22.	0,99780	0,99777	0,99775	0,99773	0,99771	0,99768	0,99766	0,99764	0,99761	0,99759
23.	0,99756	0,99754	0,99752	0,99749	0,99747	0,99744	0,99742	0,99740	0,99737	0,99735
24.	0,99732	0,99730	0,99727	0,99725	0,99722	0,99720	0,99717	0,99715	0,99712	0,99710
25.	0,99707	0,99704	0,99702	0,99699	0,99697	0,99694	0,99691	0,99689	0,99686	0,99684
26.	0,99681	0,99678	0,99676	0,99673	0,99670	0,99668	0,99665	0,99662	0,99659	0,99657
27.	0,99654	0,99651	0,99648	0,99646	0,99643	0,99640	0,99637	0,99634	0,99632	0,99629
28.	0,99626	0,99623	0,99620	0,99617	0,99614	0,99612	0,99609	0,99606	0,99603	0,99600
29.	0,99597	0,99594	0,99591	0,99588	0,99585	0,99582	0,99579	0,99576	0,99573	0,99570
30.	0,99567	0,99564	0,99561	0,99558	0,99555	0,99552	0,99549	0,99546	0,99543	0,99540

# Anhang

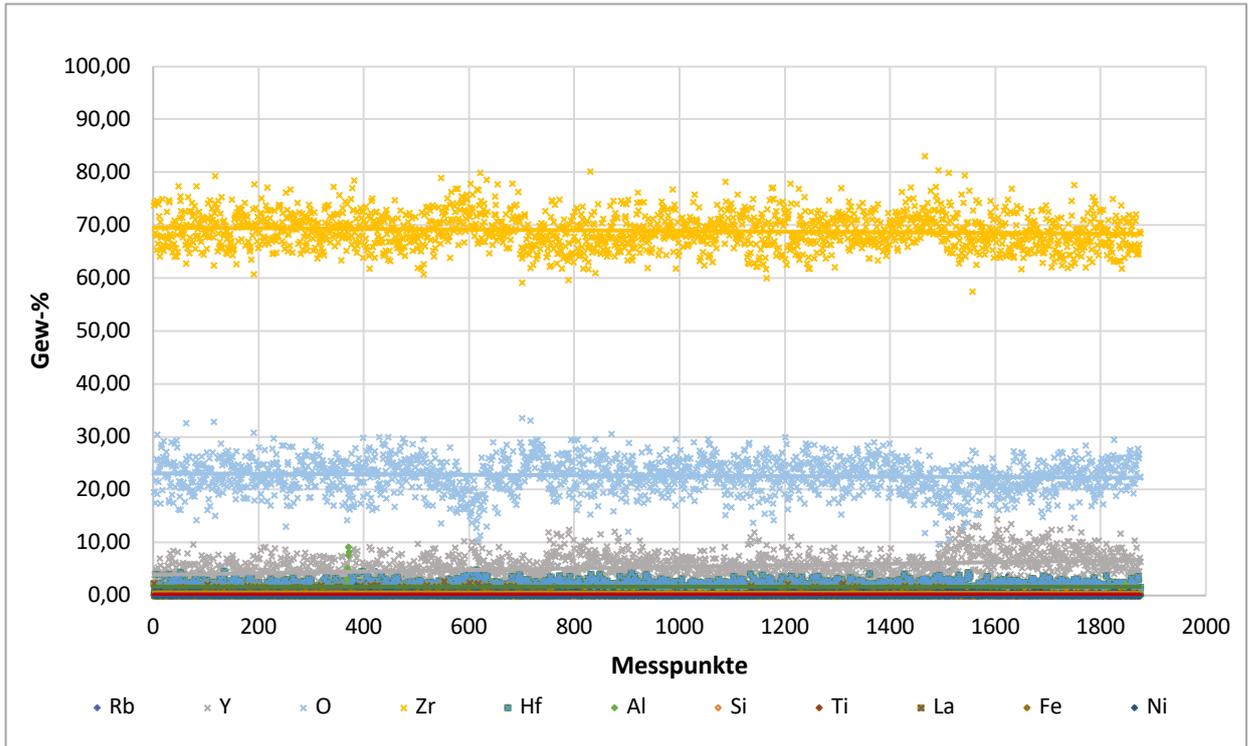


Abbildung 53: Edx-Analyse IPS e.max ZirCAD Prime

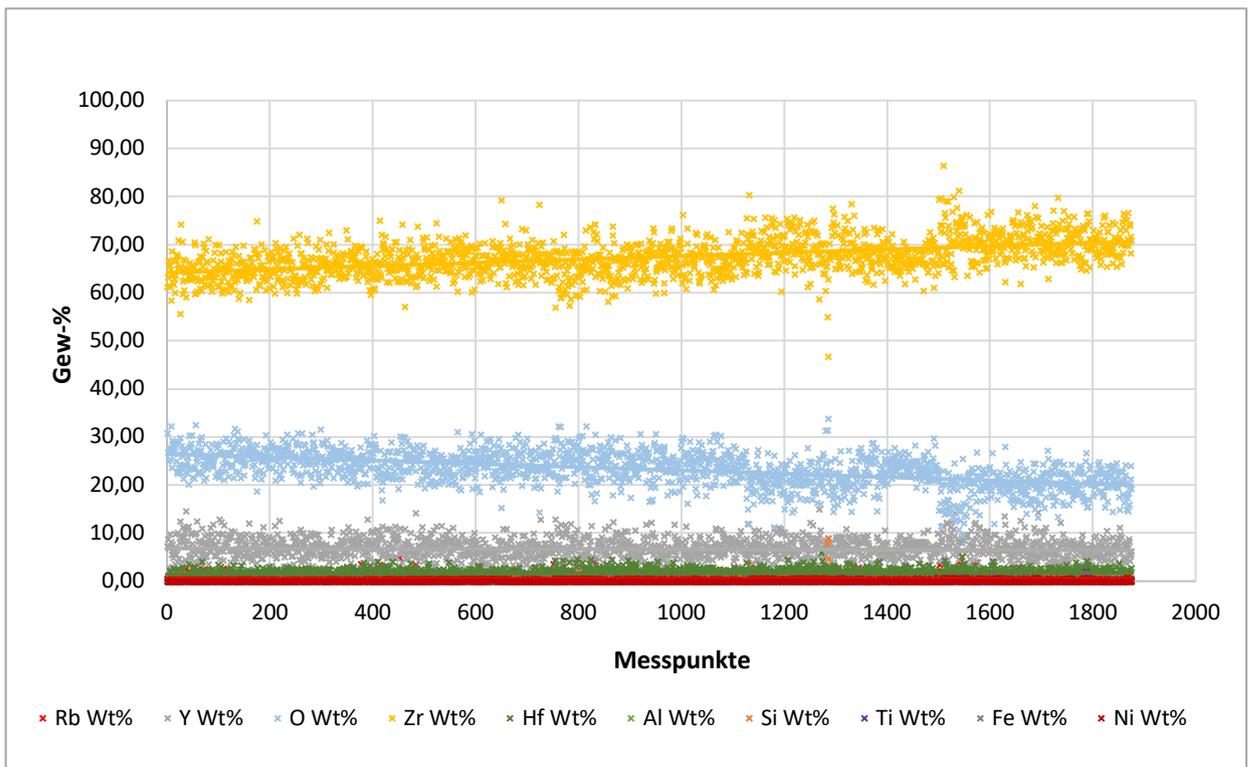


Abbildung 54: Edx-Analyse Dentona Optimill Multilayer 3D

## Anhang

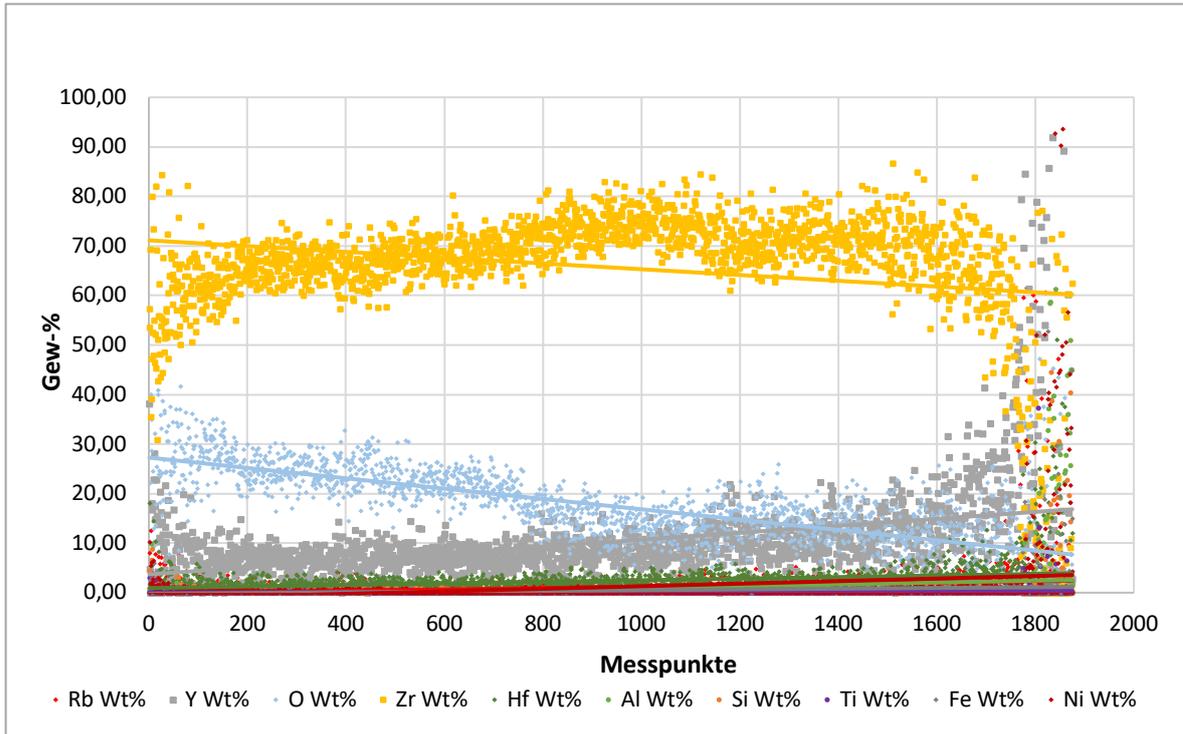


Abbildung 55: Edx-Analyse Ceramill zolid fx multilayer

Tabelle 9: Ergebnisse Dichte IPS e.max ZirCAD Prime (ohne Alterung)

ohne Alterung						
Material	Schicht	Probennr	W (a)	W (fl)	Temp	Dichte
PS e.max ZirCAD Prime	1	1	0,99433	0,82748	21,7	5,940720155
	1	2	1,02499	0,85436	21,7	5,988227682
	1	3	1,00484	0,83824	21,7	6,012507529
	1	4	0,99286	0,82709	21,7	5,970578341
	1	5	1,00738	0,83938	21,7	5,97748185
	1	6	0,98684	0,82171	22	5,957021135
	1	7	0,96519	0,80408	22	5,971706821
	1	8	0,93426	0,77832	22	5,971980531
	1	9	1,01921	0,84942	22	5,983558714
	1	10	0,97853	0,81545	22	5,981105556
	1	11	0,955	0,79599	22	5,986691479
	1	12	0,93732	0,78204	20,1	6,019472883
	1	13	0,97864	0,81413	20,1	5,932230736
	1	14	0,96633	0,80519	20,3	5,97986464
	1	15	0,9582	0,7982	20,3	5,971804088
	1	16	0,98059	0,8187	24,3	6,034411869
	1	17	0,97871	0,81585	24,3	5,986979783
	1	18	0,93894	0,78369	24,3	6,025233411

## Anhang

1	19	0,9581	0,79923	24,3	6,008095606
1	20	0,96616	0,80636	24,3	6,023375645
1	21	0,91727	0,76409	24,3	5,96573051
1	22	0,96659	0,80509	24,3	5,962636344
1	23	0,9234	0,76916	24,3	5,964326102
1	24	0,94691	0,78944	24,3	5,990719943
1	25	0,91212	0,76	24,4	5,979087697
1	26	0,84899	0,7079	24,4	6,000332187
1	27	0,92334	0,76944	24,4	5,982631318
1	28	0,95286	0,79435	23,5	5,989953053
1	29	0,93505	0,77898	23,5	5,969894893
1	30	0,88368	0,7359	23,5	5,958415883
2	1	1,03222	0,8607	21,9	5,998932605
2	2	1,03154	0,86118	21,9	6,035793771
2	3	1,02892	0,859	21,9	6,036053169
2	4	1,03323	0,8603	21,9	5,955850336
2	5	0,99005	0,82567	21,9	6,003777144
2	6	1,01863	0,85024	21,9	6,029984551
2	7	0,9722	0,81135	22	6,024790426
2	8	0,93955	0,78422	22	6,029369253
2	9	0,96842	0,80737	22	5,993918857
2	10	0,97519	0,81395	22	6,028701575
2	11	0,98609	0,82238	22	6,004115485
2	12	1,0055	0,83717	20,2	5,956605721
2	13	0,93417	0,77977	20,2	6,033312359
2	14	0,97441	0,81334	20,4	6,032354464
2	15	1,01192	0,84448	20,4	6,026245652
2	16	0,97143	0,811	24,4	6,032264692
2	17	0,96434	0,80453	24,4	6,011474243
2	18	0,99611	0,83005	24,4	5,975820512
2	19	0,94121	0,78569	24,4	6,029131997
2	20	0,98595	0,82315	24,4	6,03330024
2	21	0,92877	0,77527	24,4	6,027737429
2	22	0,93299	0,77873	24,4	6,025293737
2	23	0,9559	0,7981	24,4	6,034758416
2	24	0,94188	0,78613	24,4	6,024515041
2	25	0,9657	0,80595	24,4	6,022211042
2	26	0,96456	0,80518	24,5	6,028943506
2	27	0,86984	0,72639	24,5	6,040660718
2	28	0,89682	0,74952	25,4	6,063837145
2	29	0,93188	0,77719	25,4	5,999895117

## Anhang

2	30	0,91982	0,76711	25,4	5,99903355
3	1	0,99221	0,8281	21,9	6,026770229
3	2	0,97347	0,8113	21,9	5,983685487
3	3	1,01817	0,84979	21,9	6,027619916
3	4	0,96783	0,80695	21,9	5,996716749
3	5	0,98603	0,82224	21,9	6,000938803
3	6	1,00055	0,83353	21,9	5,9715517
3	7	0,97003	0,80903	22	6,00574595
3	8	0,93185	0,77755	22	6,019876021
3	9	0,95818	0,79992	22	6,035082143
3	10	0,9689	0,80822	22	6,010695519
3	11	0,93595	0,782	22	6,060100747
3	12	0,9393	0,7832	20,2	6,000384542
3	13	1,019	0,85068	20,2	6,036922493
3	14	0,937	0,7823	20,4	6,039610795
3	15	0,84988	0,70962	20,4	6,042037488
3	16	0,79534	0,66415	24,6	6,03927287
3	17	0,95081	0,79415	24,6	6,045999155
3	18	0,85636	0,71508	24,6	6,038210682
3	19	0,90291	0,75414	24,6	6,045908427
3	20	0,90805	0,75843	24,6	6,045783334
3	21	0,95283	0,796	24,5	6,052457285
3	22	0,95876	0,80097	24,5	6,053072489
3	23	0,91519	0,7643	24,5	6,042218225
3	24	0,93288	0,77893	24,5	6,036591231
3	25	0,97578	0,81482	24,5	6,039202485
3	26	0,92674	0,77395	24,5	6,042387512
3	27	0,94664	0,79051	24,5	6,040099891
3	28	0,88242	0,73633	25,4	6,015898908
3	29	0,95289	0,79643	24,6	6,066966671
3	30	0,9529	0,79691	24,6	6,085306757
4	1	1,04752	0,87447	21,9	6,034019315
4	2	1,00653	0,84035	21,9	6,037593842
4	3	1,00963	0,84246	21,9	6,02032694
4	4	1,00989	0,84251	21,9	6,014323263
4	5	0,9871	0,82421	21,9	6,040635214
4	6	1,01138	0,84471	22	6,048726897
4	7	1,02033	0,85174	22	6,032761053
4	8	1,0137	0,84602	22	6,026089194
4	9	0,99203	0,82791	22	6,025189142
4	10	1,02164	0,85288	22	6,034421285

## Anhang

4	11	1,0024	0,83667	20,3	6,031265335
4	12	0,99389	0,82976	20,3	6,038356603
4	13	1,009	0,84236	20,4	6,03770114
4	14	0,87157	0,728	20,4	6,053381594
4	15	0,98281	0,82084	20,4	6,050545123
4	16	0,93581	0,7817	24,7	6,048957897
4	17	0,96666	0,80601	24,7	5,994010626
4	18	0,99271	0,82901	24,7	6,040842789
4	19	0,96789	0,80821	24,7	6,038086557
4	20	0,99694	0,83262	24,7	6,043692655
4	21	0,92302	0,77505	24,9	6,088753004
4	22	0,92783	0,77465	24,9	5,912345691
4	23	0,91056	0,76056	24,9	5,92530336
4	24	1,00599	0,84019	23,3	6,046180562
4	25	0,98605	0,82336	23,3	6,039627405
4	26	0,94474	0,78985	24,9	5,953629247
4	27	0,91504	0,76536	24,9	5,967177659
4	28	0,89176	0,74431	24,9	5,903326714
4	29	0,90289	0,75529	24,9	5,970917825
4	30	0,90909	0,75951	24,9	5,932346751

**Tabelle 10: Ergebnisse Dichte IPS e.max ZirCAD Prime (mit Alterung)**

mit Alterung						
Material	Schicht	Probennr	W (a)	W (fl)	Temp	Dichte
PS e.max ZirCAD Prime	1	1	1,00201	0,83491	20,3	5,979499879
	1	2	1,15471	0,96219	20,3	5,980896804
	1	3	0,98728	0,8226	20,3	5,978176813
	1	4	1,00596	0,8383	20,3	5,98302
	1	5	0,99954	0,83517	20,3	6,063811144
	1	6	1,01793	0,84792	20,3	5,970529287
	1	7	1,00086	0,83436	21,5	5,992594418
	1	8	0,9797	0,81659	21,5	5,987815088
	1	9	1,01178	0,84315	21,5	5,98146
	1	10	0,94765	0,79004	21,5	5,994044563
	1	11	0,99847	0,83228	21,5	5,989436559
	1	12	1,0202	0,84979	21,5	5,9682415
	1	13	0,99046	0,82512	21,8	5,971516042
	1	14	1,01184	0,84335	21,8	5,986363616
	1	15	0,97008	0,8085	21,8	5,984740854
	1	16	0,98204	0,81869	26,2	5,986383608

## Anhang

1	17	0,98515	0,82083	26,2	5,969894827
1	18	0,91562	0,76275	26,2	5,964140061
1	19	0,9485	0,79077	26,1	5,988061282
1	20	0,94444	0,78721	26,1	5,981391918
1	21	0,86192	0,7188	26,1	5,996940034
1	22	0,96659	0,8078	26,1	6,061516596
1	23	0,95761	0,79866	26,1	5,999170203
1	24	0,91202	0,75988	26,1	5,96931405
1	25	0,91471	0,76244	26,1	5,981806697
1	26	0,86651	0,72193	26,1	5,968000566
1	27	0,92129	0,76755	26,1	5,967232901
1	28	0,93524	0,77971	26,1	5,98786649
1	29	0,94061	0,78404	26,1	5,98224684
1	30	0,92211	0,76824	26,1	5,967498004
2	1	1,02964	0,85935	21,1	6,028242997
2	2	1,02762	0,85703	21,1	6,00584046
2	3	1,00432	0,83802	21,1	6,021080794
2	4	1,00544	0,83899	21,1	6,022363064
2	5	1,0088	0,842	21,1	6,029808153
2	6	1,02835	0,85677	21,1	5,975435226
2	7	1,02942	0,85894	21,1	6,020239512
2	8	0,96108	0,8017	21,6	6,011357016
2	9	0,97558	0,81438	21,6	6,033153041
2	10	0,98851	0,82509	21,6	6,030070591
2	11	0,96568	0,80616	21,6	6,034823365
2	12	0,90837	0,75786	21,6	6,016503271
2	13	0,98976	0,82578	21,8	6,016777548
2	14	1,00688	0,84066	21,8	6,03836089
2	15	1,02022	0,8514	21,8	6,024136031
2	16	0,98886	0,8253	26	6,02051343
2	17	0,89183	0,7442	26	6,015660925
2	18	0,88062	0,73521	26	6,030730831
2	19	0,92656	0,77359	26	6,031744562
2	20	0,95509	0,7977	26	6,042861827
2	21	1,00341	0,8369	26	6,00086987
2	22	0,89824	0,75087	26	6,069577054
2	23	0,91138	0,7606	25,8	6,019402751
2	24	0,9831	0,82053	25,8	6,022196162
2	25	0,92785	0,77464	25,8	6,030983506
2	26	0,92106	0,76791	25,8	5,989202609
2	27	0,90342	0,75399	25,8	6,020735282

## Anhang

2	28	0,92638	0,77341	25,7	6,031057503
2	29	0,99434	0,82948	25,7	6,006625177
2	30	0,86543	0,72408	25,7	6,097415046
3	1	0,93828	0,78342	21,2	6,04058227
3	2	0,9919	0,82789	21,2	6,029528041
3	3	1,00666	0,84074	21,2	6,048804597
3	4	0,95372	0,79593	21,2	6,02597357
3	5	0,99397	0,82999	21,2	6,043213761
3	6	0,95472	0,79661	21,2	6,020084331
3	7	0,98626	0,82367	21,7	6,046872499
3	8	0,95066	0,79359	21,7	6,033445468
3	9	0,97547	0,81427	21,7	6,032291378
3	10	0,93369	0,7794	21,7	6,032514248
3	11	0,8945	0,74684	21,7	6,038802397
3	12	0,97501	0,81412	21,7	6,041062431
3	13	1,0209	0,85159	21,8	6,010707861
3	14	0,98032	0,81856	21,8	6,041173571
3	15	0,94607	0,78923	21,8	6,013003142
3	16	0,93628	0,78161	25,7	6,02851385
3	17	0,91068	0,76001	25,7	6,019352049
3	18	0,91161	0,76103	25,7	6,029098532
3	19	1,0097	0,8432	25,6	6,039448571
3	20	0,94845	0,79176	25,6	6,028267136
3	21	0,97044	0,81007	25,6	6,026496579
3	22	0,94504	0,7887	25,6	6,020042129
3	23	0,91037	0,76006	25,6	6,031833442
3	24	0,97352	0,81262	25,6	6,025709628
3	25	0,97099	0,81063	25,7	6,030166283
3	26	0,9482	0,79136	25,7	6,020794861
3	27	0,94248	0,78718	25,7	6,043813723
3	28	0,99563	0,82745	25,7	5,89571085
3	29	0,98894	0,82576	25,7	6,035503644
3	30	0,8929	0,7455	25,7	6,032757673
4	1	1,00804	0,84152	21,5	6,036182688
4	2	0,98972	0,82612	21,5	6,032260878
4	3	1,03275	0,8624	21,5	6,045106413
4	4	1,03309	0,86261	21,5	6,042485862
4	5	0,99194	0,82833	21,5	6,04541945
4	6	1,02114	0,85268	21,5	6,044207837
4	7	1,01337	0,84617	21,8	6,041660986
4	8	1,0184	0,8504	21,8	6,042736762

## Anhang

4	9	1,01155	0,84436	21,8	6,031173037
4	10	0,98912	0,82563	21,8	6,030905528
4	11	1,00182	0,83606	21,8	6,0246911
4	12	0,99242	0,82882	21,8	6,046954699
4	13	1,00334	0,83807	21,8	6,05171599
4	14	0,95498	0,7975	21,8	6,044959634
4	15	0,98573	0,82333	21,8	6,050571596
4	16	0,96365	0,8039	25,7	6,007438926
4	17	0,9746	0,81128	25,7	5,942906307
4	18	0,99496	0,83083	25,7	6,037096682
4	19	0,99787	0,83303	25,7	6,028676221
4	20	1,00016	0,835	25,7	6,030803478
4	21	0,97976	0,81829	25,7	6,04280051
4	22	0,92607	0,77337	25,7	6,039697959
4	23	0,91419	0,76426	25,7	6,072365485
4	24	0,95583	0,79815	25,7	6,036907589
4	25	0,95036	0,79353	25,7	6,034892204
4	26	0,97465	0,81379	25,7	6,03408113
4	27	0,98796	0,82502	25,7	6,038403218
4	28	0,97208	0,81173	25,8	6,037128736
4	29	0,95594	0,79795	25,8	6,025576355
4	30	0,98406	0,8217	25,8	6,035870976

**Tabelle 11: Ergebnisse Dichte Dentona Optimill Multilayer 3D (ohne Alterung)**

ohne Alterung						
Material	Schicht	Probennr	W (a)	W (fl)	Temp	Dichte
	1	1	0,92478	0,77534	20,4	6,170628674
	1	2	0,84462	0,70506	20,4	6,034761973
	1	3	0,93116	0,77601	20	5,98505082
	1	4	0,92168	0,76812	20	5,985457687
	1	5	0,87143	0,72566	20	5,961561205
	1	6	0,94337	0,78444	20	5,91932868
	1	7	0,87503	0,72832	20	5,947837318
	1	8	0,93912	0,7823	19,9	5,972055733
	1	9	0,94103	0,78428	19,9	5,986871206
	1	10	0,93118	0,77601	19,9	5,984528085
	1	11	0,9295	0,77405	19,9	5,96297533
	1	12	0,927	0,77171	19,9	5,953066508
	1	13	0,8672	0,72198	19,9	5,955212946
	1	14	0,96045	0,80052	19,9	5,988923832
	1	15	0,95197	0,79349	21	5,988975968

## Anhang

1	16	0,83499	0,69608	25	5,86716855
1	17	0,90115	0,75199	25	5,896917689
1	18	0,8936	0,74516	25	5,875879547
1	19	0,86359	0,72069	25	5,898691766
1	20	0,87507	0,73038	25	5,903159782
1	21	0,93452	0,77902	25	5,865959051
1	22	0,92433	0,76924	25	5,817344929
1	23	0,91467	0,763	25	5,886338873
1	24	0,84436	0,70477	25	5,90409844
1	25	0,89133	0,74363	24,9	5,890495511
1	26	0,90695	0,75649	24,9	5,883776798
1	27	0,91307	0,76172	24,9	5,888646402
1	28	0,9064	0,75763	23,1	6,07152719
1	29	0,92297	0,76908	23,1	5,976844485
1	30	0,91975	0,76663	23,1	5,98594213
2	1	0,94508	0,78765	20,1	5,986426518
2	2	0,89023	0,74196	20,1	5,987361815
2	3	0,79483	0,66266	20,1	5,996913538
2	4	0,90013	0,75992	20,1	6,401874783
2	5	0,9321	0,77688	20	5,988390201
2	6	0,90592	0,7553	20	5,997822621
2	7	0,8989	0,74914	20	5,985523511
2	8	0,88217	0,73526	19,9	5,988318634
2	9	0,90778	0,75573	19,9	5,953860631
2	10	0,86875	0,72375	19,9	5,974904741
2	11	0,90245	0,75152	19,9	5,962823087
2	12	0,8724	0,7271	19,6	5,987977454
2	13	0,91895	0,76547	19,6	5,971321413
2	14	0,77761	0,64786	19,6	5,977020479
2	15	0,88999	0,74239	20,9	6,011888561
2	16	0,78218	0,65199	20,9	5,990203082
2	17	0,87704	0,732	25	5,902172317
2	18	0,88917	0,73928	25	5,790207458
2	19	0,82445	0,6958	25	6,255036156
2	20	0,9083	0,76186	25	6,054072992
2	21	0,86919	0,72528	25	5,895275779
2	22	0,90667	0,75725	25	5,922710192
2	23	0,91503	0,76355	25	5,896039755
2	24	0,87999	0,73434	25	5,897223627
2	25	0,89747	0,74888	24,9	5,895546679
2	26	0,91691	0,76534	24,9	5,904825183

## Anhang

2	27	0,90107	0,75179	24,9	5,891836475
2	28	0,90014	0,7507	23	6,002695519
2	29	0,92832	0,77416	23	6,001076201
2	30	0,90586	0,75589	23,4	6,018944497
3	1	0,98235	0,81969	19,9	6,022668508
3	2	0,92986	0,77515	19,9	5,993811421
3	3	0,98048	0,81787	19,9	6,013054031
3	4	0,97262	0,81144	20	6,017649427
3	5	0,83581	0,69715	20	6,011063294
3	6	0,91419	0,76229	20	6,001692796
3	7	0,91504	0,76305	20	6,003715502
3	8	0,96921	0,80823	19,6	6,004486018
3	9	0,90055	0,75412	19,6	6,133463952
3	10	0,89645	0,7467	19,6	5,97021008
3	11	0,8933	0,74407	19,6	5,969962065
3	12	0,9063	0,7554	19,4	5,990047217
3	13	0,88753	0,73951	19,4	5,980125412
3	14	0,94181	0,78535	19,4	6,003538243
3	15	0,92887	0,7738	20,9	5,9722761
3	16	0,95106	0,79314	20,9	6,004585578
3	17	0,89029	0,74285	24,9	5,893997145
3	18	0,93024	0,78	24,9	6,043673482
3	19	0,86536	0,72228	24,3	6,025395052
3	20	0,89312	0,74507	24,3	6,00992797
3	21	0,92424	0,77152	25	5,90702824
3	22	0,92999	0,77615	25	5,900506691
3	23	0,95087	0,794	25	5,916451526
3	24	0,92121	0,76886	25	5,901962735
3	25	0,90702	0,75699	25	5,900910774
3	26	0,89967	0,75068	25	5,893950942
3	27	0,94379	0,78728	23,1	6,0093511
3	28	0,92206	0,76945	23,1	6,021023474
3	29	0,90669	0,7563	23,1	6,008058931
3	30	0,92361	0,77051	23,1	6,011843941
4	1	0,9439	0,78587	19,9	5,956496431
4	2	0,88436	0,7374	19,9	6,001139698
4	3	0,94124	0,78441	19,9	5,985152955
4	4	0,93392	0,77845	19,9	5,990554448
4	5	0,929	0,77471	19,9	6,004566712
4	6	0,95477	0,79569	19,9	5,985317604
4	7	0,97246	0,8113	19,9	6,017526899

## Anhang

4	8	0,96447	0,8045	18,9	6,013688013
4	9	0,94496	0,78778	18,9	5,996627917
4	10	0,91822	0,76492	18,9	5,974421755
4	11	0,9806	0,81715	18,9	5,984089875
4	12	0,96655	0,80444	18,5	5,947590176
4	13	0,99537	0,82953	18,5	5,987164557
4	14	0,94707	0,78998	18,5	6,013939978
4	15	0,95422	0,79627	20,9	6,023388444
4	16	0,91411	0,76178	20,9	5,983090714
4	17	0,93946	0,784	24,2	6,020548528
4	18	0,94632	0,78965	24,2	6,017673878
4	19	0,93758	0,78218	24,3	6,010701667
4	20	0,94581	0,7891	25	5,890981154
4	21	0,95733	0,79878	23,1	6,017132969
4	22	0,94809	0,79139	23,1	6,029406705
4	23	0,93829	0,78303	23,1	6,022427996
4	24	0,93382	0,77921	23,2	6,018815564
4	25	0,94304	0,78705	23,2	6,02446824
4	26	0,92659	0,77348	23,2	6,030722231
4	27	0,94982	0,79216	23,2	6,003512967
4	28	0,95852	0,79985	23,2	6,019934773
4	29	0,95088	0,79296	23	6,000559149
4	30	0,96869	0,80797	23	6,006451172

**Tabelle 12: Ergebnisse Dichte Dentona Optimill Multilayer 3D (mit Alterung)**

mit Alterung						
Material	Schicht	Probennr	W (a)	W (fl)	Temp	Dichte
	1	1	0,89054	0,7428	26,1	6,002308794
	1	2	0,88082	0,7346	26,1	5,998510735
	1	3	0,87678	0,73146	26,1	6,007975615
	1	4	0,91537	0,76275	26,1	5,972396859
	1	5	0,87334	0,72786	26,1	5,977827971
	1	6	0,92109	0,76797	26,1	5,990089643
	1	7	0,87552	0,72979	26,1	5,98246811
	1	8	0,94767	0,79003	26	5,986417766
	1	9	0,87587	0,72932	26	5,951557767
	1	10	0,93116	0,77595	26	5,97421854
	1	11	0,87135	0,72644	26	5,987845321
	1	12	0,96519	0,80432	26	5,974674333
	1	13	0,95443	0,79527	26	5,971544636
	1	14	0,92554	0,77138	26	5,978605808

## Anhang

1	15	0,9224	0,76874	26	5,977710894
1	16	0,91146	0,75978	26	5,983918161
1	17	0,89423	0,74529	26	5,978803936
1	18	0,89156	0,74296	25,9	5,974771995
1	19	0,92666	0,7723	25,9	5,978265058
1	20	0,88544	0,73787	25,9	5,975174938
1	21	0,92428	0,77056	25,9	5,987734863
1	22	0,91257	0,7607	25,9	5,983890425
1	23	0,92969	0,77448	25,9	5,964968775
1	24	0,93163	0,77628	25,9	5,972027764
1	25	0,8782	0,73191	25,9	5,978170729
1	26	0,85402	0,71166	25,9	5,974060865
1	27	0,90906	0,75787	25,9	5,987683884
1	28	0,84771	0,70695	25,9	5,997320946
1	29	0,91061	0,75883	25,8	5,974700808
1	30	0,91237	0,76015	25,8	5,968946119
2	1	0,90506	0,75466	25,8	5,992769412
2	2	0,87148	0,72654	25,8	5,987799812
2	3	0,91007	0,76021	25,8	6,047645324
2	4	0,91636	0,7646	25,8	6,013212372
2	5	0,90028	0,75172	25,8	6,034942493
2	6	0,89973	0,75011	25,8	5,988535729
2	7	0,89664	0,74776	25,8	5,997630564
2	8	0,85428	0,71243	25,8	5,997480753
2	9	0,87473	0,72926	25,8	5,988232871
2	10	0,85054	0,70983	25,8	6,019597103
2	11	0,8599	0,71697	25,8	5,991321276
2	12	0,90572	0,75513	25,8	5,989573565
2	13	0,95492	0,79623	25,8	5,992602402
2	14	0,93485	0,77935	25,8	5,987005473
2	15	0,88941	0,74166	25,9	5,994649559
2	16	0,91792	0,76532	25,9	5,99017686
2	17	0,91334	0,76132	25,9	5,98303027
2	18	0,88947	0,74164	25,9	5,991810233
2	19	0,90214	0,75323	25,9	6,033076097
2	20	0,89958	0,75014	25,9	5,994627671
2	21	0,9183	0,76693	25,9	6,041341455
2	22	0,90471	0,75448	25,9	5,997109368
2	23	0,87643	0,73098	25,8	6,000693254
2	24	0,89391	0,73726	25,8	5,682849733
2	25	0,91548	0,76322	25,8	5,987715282

## Anhang

2	26	0,91966	0,76672	25,9	5,988190208
2	27	0,90451	0,75423	25,9	5,993789409
2	28	0,90048	0,7513	25,9	6,011080059
2	29	0,91148	0,7599	25,9	5,988176825
2	30	0,923	0,76915	25,9	5,97439285
3	1	0,90374	0,75313	25,9	5,975568857
3	2	0,94003	0,78407	25,9	6,002299443
3	3	0,94324	0,78692	25,9	6,008924371
3	4	0,83873	0,69917	26	5,984633472
3	5	0,91777	0,76523	26	5,991373002
3	6	0,9148	0,76318	26	6,008217729
3	7	0,91677	0,76532	26	6,027910992
3	8	0,91375	0,7615	26	5,976494828
3	9	0,88721	0,7401	26	6,005653457
3	10	0,9232	0,7699	26	5,99694137
3	11	0,87876	0,73308	26	6,006844176
3	12	0,95565	0,7974	26	6,013551953
3	13	0,91653	0,76458	26	6,006507228
3	14	0,90189	0,75199	26	5,991398151
3	15	0,93159	0,77734	26	6,014168038
3	16	0,9104	0,75942	26	6,004666313
3	17	0,88694	0,73981	26,1	6,002829343
3	18	0,89238	0,74603	26,1	6,07182303
3	19	0,90912	0,75824	26,1	6,000018197
3	20	0,88256	0,7359	26,1	5,99232972
3	21	0,90979	0,759	26,1	6,008022257
3	22	0,90114	0,75187	26,1	6,011496518
3	23	0,92189	0,77188	26,1	6,119560417
3	24	0,92922	0,7753	26,1	6,011548542
3	25	0,92011	0,76746	26,1	6,002137529
3	26	0,93474	0,77988	26,1	6,010553282
3	27	0,93061	0,77652	26,1	6,013898448
3	28	0,9413	0,78527	26,1	6,007349164
3	29	0,9434	0,78737	26,1	6,020748625
3	30	0,92133	0,76864	26,1	6,0085202
4	1	0,83352	0,69537	26,1	6,007974098
4	2	0,95515	0,79695	26,1	6,012124381
4	3	0,84898	0,71134	26,1	6,142056643
4	4	0,90383	0,75397	26,1	6,00570468
4	5	0,9013	0,75209	26,2	6,01486013
4	6	0,9223	0,76953	26,2	6,011574995

## Anhang

4	7	0,9306	0,77623	26,2	6,002807411
4	8	0,97933	0,81713	26,2	6,012185048
4	9	0,8967	0,74867	26,2	6,031860353
4	10	0,92857	0,77493	26,2	6,018169209
4	11	0,97228	0,811	26,2	6,002955188
4	12	0,9288	0,77468	26,2	6,000915339
4	13	0,96397	0,80449	26,2	6,018819596
4	14	0,95528	0,79544	26,2	5,951140921
4	15	0,92882	0,77673	26,2	6,081126617
4	16	0,92607	0,77254	26,2	6,006269037
4	17	0,92722	0,77329	26,2	5,998102119
4	18	0,9018	0,7524	26,2	6,010544096
4	19	0,89131	0,74362	26,2	6,00941033
4	20	0,91532	0,76306	26,2	5,986067852
4	21	0,94788	0,79763	26,2	6,28187496
4	22	0,93403	0,77821	26,2	5,968873641
4	23	0,95135	0,79308	26,3	5,985261828
4	24	0,94775	0,79072	26,3	6,009692374
4	25	0,92445	0,7709	26,3	5,994802791
4	26	0,95465	0,79554	26,3	5,974317431
4	27	0,94188	0,78559	26,3	6,000750812
4	28	0,95799	0,79909	26,3	6,003136971
4	29	0,93085	0,77868	26,3	6,091027827
4	30	0,95043	0,79297	26,3	6,010228184

**Tabelle 13: Ergebnisse Dichte Ceramill zolid fx multilayer (ohne Alterung)**

ohne Alterung						
Material	Schicht	Probennr	W (a)	W (fl)	Temp	Dichte
	1	1	0,93196	0,77588	23,5	5,94978938
	1	2	0,85132	0,70993	23,5	5,999637208
	1	3	0,886	0,7385	23,5	5,985394169
	1	4	0,91385	0,76182	23,5	5,989583372
	1	5	0,91699	0,76477	23,5	6,002659188
	1	6	0,93162	0,7768	23,5	5,996014034
	1	7	0,9036	0,75304	23,5	5,980228055
	1	8	0,90562	0,75523	23,8	5,999946429
	1	9	0,92436	0,7708	23,8	5,997681513
	1	10	0,92195	0,76854	23,8	5,987895336
	1	11	0,93797	0,78152	23,8	5,973571843
	1	12	0,94316	0,78647	23,8	5,997419907
	1	13	0,90845	0,75762	23,8	6,00113792

## Anhang

1	14	0,90473	0,75464	23,8	6,006029663
1	15	0,9195	0,76655	24,1	5,989522654
1	16	0,93463	0,77916	24,1	5,989396713
1	17	0,9139	0,7618	24,1	5,986313675
1	18	0,89939	0,74966	24	5,984639303
1	19	0,93472	0,77918	24	5,987398318
1	20	0,89697	0,74735	24	5,97292675
1	21	0,94004	0,78448	25,9	6,017794405
1	22	0,94865	0,7908	25,9	5,984816636
1	23	0,96867	0,80753	25,9	5,98634707
1	24	0,86939	0,72485	25,9	5,989849921
1	25	0,94507	0,78771	25,9	5,980797705
1	26	0,94897	0,79095	25,9	5,980395613
1	27	0,97658	0,81615	25,6	6,062351105
1	28	0,96428	0,80407	25,6	5,994229391
1	29	0,96242	0,80243	25,5	5,991074935
1	30	0,92269	0,77113	25,5	6,063217291
2	1	0,88877	0,74113	23,4	5,998591546
2	2	0,92623	0,77245	23,4	6,00181882
2	3	0,89258	0,74468	23,4	6,013713026
2	4	0,9306	0,77582	23,4	5,991178434
2	5	0,89509	0,74652	23,5	6,00324928
2	6	0,88504	0,73823	23,5	6,00700512
2	7	0,93625	0,78075	23,5	5,999461736
2	8	0,93657	0,78094	23,9	5,995958115
2	9	0,90978	0,75877	23,9	6,002639289
2	10	0,93995	0,78358	23,9	5,989120909
2	11	0,85598	0,71391	23,9	6,003061596
2	12	0,91505	0,76317	24	6,002645918
2	13	0,88326	0,7368	24	6,008525899
2	14	0,80188	0,66871	24	5,99931298
2	15	0,82354	0,68652	23,9	5,988423551
2	16	0,87653	0,73017	23,9	5,967005954
2	17	0,90044	0,75115	23,9	6,009461143
2	18	0,90294	0,75293	23,9	5,997224805
2	19	0,85823	0,71551	23,9	5,991431324
2	20	0,89862	0,74925	23,9	5,994105624
2	21	0,89402	0,74547	25,9	5,9932705
2	22	0,91444	0,76236	25,9	5,987871762
2	23	0,90589	0,75522	25,9	5,987397117
2	24	0,93572	0,77994	25,9	5,981686974

## Anhang

2	25	0,8928	0,74443	25,9	5,992353144
2	26	0,93236	0,77621	25,9	5,946092158
2	27	0,87308	0,72802	25,9	5,993709108
2	28	0,92824	0,77389	25,5	5,98944553
2	29	0,85921	0,7163	25,5	5,987833303
2	30	0,94172	0,78512	25,5	5,989120005
3	1	0,91942	0,766698	23,5	5,998783719
3	2	0,90987	0,7598	23,5	6,041373844
3	3	0,90327	0,75349	23,5	6,009169721
3	4	0,91677	0,76484	23,5	6,012672025
3	5	0,93346	0,77867	23,6	6,008897663
3	6	0,91359	0,762	23,6	6,005135812
3	7	0,97509	0,81319	23,6	6,001225694
3	8	0,87455	0,729	23,2	5,98767651
3	9	0,93922	0,78388	23,2	6,025171098
3	10	0,915	0,7629	23,2	5,994841026
3	11	0,8999	0,7502	23,2	5,990434255
3	12	0,90532	0,75599	23,3	6,041253993
3	13	0,88523	0,73813	23,3	5,996752663
3	14	0,91045	0,7592	23,3	5,998371772
3	15	0,89253	0,74376	25,9	5,974437677
3	16	0,90206	0,75172	25,9	5,975172452
3	17	0,85961	0,71704	25,9	6,004300936
3	18	0,93793	0,78194	25,9	5,987741607
3	19	0,83915	0,69987	25,9	5,999845218
3	20	0,83432	0,69576	25,9	5,996309446
3	21	0,89439	0,74581	25,9	5,994540016
3	22	0,90349	0,75345	26	5,996425799
3	23	0,93749	0,78169	26	5,992049929
3	24	0,9201	0,76745	26	6,002253135
3	25	0,89991	0,75037	25,9	5,992816908
3	26	0,92963	0,77486	25,9	5,98153736
3	27	0,95005	0,79242	25,9	6,002010645
3	28	0,937	0,78169	25,6	6,008413122
3	29	0,95165	0,79425	25,6	6,021323389
3	30	0,93384	0,779	25,6	6,006326753
4	1	0,90003	0,75068	23,7	6,004614034
4	2	0,91736	0,76516	23,7	6,005628594
4	3	0,96529	0,80665	23,7	6,062860981
4	4	0,91072	0,75973	23,7	6,009937426
4	5	0,90328	0,75366	23,7	6,015419596

## Anhang

4	6	0,94835	0,79086	23,7	5,99996989
4	7	0,91014	0,75923	23,7	6,009294016
4	8	0,95303	0,7954	23,3	6,024763146
4	9	0,94706	0,79	23,3	6,008753848
4	10	0,91248	0,7611	23,3	6,006581815
4	11	0,93233	0,77752	23,3	6,001271415
4	12	0,94686	0,78956	23,4	5,998200713
4	13	0,86671	0,72285	23,4	6,003404725
4	14	0,8073	0,67321	23,4	5,999326415
4	15	0,90463	0,7544	26	5,996398524
4	16	0,9112	0,76003	26	6,002389601
4	17	0,89555	0,74702	26	6,004152505
4	18	0,84502	0,70462	26	5,993439047
4	19	0,91223	0,76063	26	5,992132126
4	20	0,95401	0,79586	26	6,007029251
4	21	0,88857	0,74126	26	6,006693026
4	22	0,95604	0,79726	26	5,995928457
4	23	0,94919	0,79185	26	6,007447972
4	24	0,93276	0,77807	26	6,004595071
4	25	0,93675	0,78131	26	6,001184994
4	26	0,96593	0,80613	26	6,019282399
4	27	0,83073	0,69273	26	5,994555763
4	28	0,97543	0,8137	25,6	6,006550926
4	29	0,889	0,74173	25,6	6,01183482
4	30	0,96559	0,80545	25,6	6,004994298

**Tabelle 14: Ergebnisse Dichte Ceramill zolid fx multilayer (mit Alterung)**

mit Alterung						
Material	Schicht	Probenr	W (a)	W (fl)	Temp	Dichte
	1	1	0,89217	0,7445	27,3	6,014209509
	1	2	0,93487	0,77994	27,3	6,006742608
	1	3	0,93348	0,77848	27,3	5,995105192
	1	4	0,9242	0,76978	27,2	5,957926952
	1	5	0,90485	0,75457	27,2	5,993874394
	1	6	0,93616	0,78061	27,2	5,991179587
	1	7	0,91081	0,75935	27,2	5,986351042
	1	8	0,91868	0,76586	27,2	5,984342458
	1	9	0,89154	0,74333	27,2	5,988190967
	1	10	0,92214	0,76873	27,2	5,983779357
	1	11	0,92497	0,77086	27,2	5,974882056

## Anhang

1	12	0,90373	0,75333	27,2	5,981681346
1	13	0,90866	0,75835	27,2	6,017906306
1	14	0,9167	0,7644	27,2	5,99183149
1	15	0,95797	0,79948	27,2	6,01702675
1	16	0,8937	0,74523	27,2	5,9921863
1	17	0,92714	0,77291	27,1	5,984418008
1	18	0,93996	0,78384	27,1	5,993715934
1	19	0,9394	0,78317	27,1	5,985929015
1	20	0,91486	0,76267	27,1	5,984308658
1	21	0,91517	0,76302	27,1	5,987909515
1	22	0,81775	0,68155	27,1	5,97707924
1	23	0,92813	0,77382	27,1	5,987701654
1	24	0,94292	0,78608	27,1	5,98499052
1	25	0,96572	0,80524	27,1	5,990673911
1	26	0,95159	0,79354	27,1	5,993778569
1	27	0,91903	0,76719	27,1	6,025434387
1	28	0,9633	0,80323	27,1	5,990967745
1	29	0,92303	0,76977	27,1	5,995595076
1	30	0,94063	0,7849	27,1	6,013005338
2	1	0,90909	0,75793	27,1	5,987084942
2	2	0,85478	0,71264	27,1	5,986644504
2	3	0,88123	0,73487	27,1	5,9939373
2	4	0,91859	0,7659	27,1	5,989030329
2	5	0,76022	0,63394	27,1	5,993079697
2	6	0,90266	0,75264	27,1	5,989911669
2	7	0,93194	0,77717	27,1	5,99441058
2	8	0,91054	0,75945	27	5,999590917
2	9	0,89882	0,74935	27	5,986558258
2	10	0,92575	0,77188	27	5,98960583
2	11	0,93237	0,7775	27	5,993484857
2	12	0,90418	0,75397	27	5,992588864
2	13	0,84462	0,704	27	5,979610403
2	14	0,90287	0,75281	27	5,989888697
2	15	0,87912	0,73316	27	5,996152732
2	16	0,85563	0,71348	27	5,992355569
2	17	0,91218	0,76066	27	5,993341243
2	18	0,89507	0,74993	27	6,139404312
2	19	0,81563	0,68031	27	6,000528733
2	20	0,91297	0,76117	27	5,98746851
2					
2	22	0,90782	0,75738	27	6,007511877

## Anhang

2	23	0,9204	0,7675	27	5,992769235
2	24	0,91936	0,76656	27	5,989915853
2	25	0,9025	0,75197	27	5,968743679
2	26	0,92713	0,77319	27,1	5,995624843
2	27	0,92864	0,77352	27,1	5,959713914
2	28	0,92092	0,76751	27,1	5,976044438
2	29	0,93926	0,78323	27,1	5,992707214
2	30	0,92638	0,77288	27,1	6,007944481
3	1	0,90045	0,75114	27,1	6,003657233
3	2	0,90235	0,75272	27,1	6,003458762
3	3	0,93385	0,7787	27,1	5,991984683
3	4	0,90719	0,75634	27,1	5,986849844
3	5	0,86211	0,7188	27,1	5,988686596
3	6	0,90722	0,75776	27,1	6,042717049
3	7	0,85521	0,71328	27,1	5,998516037
3	8	0,89208	0,74385	27,2	5,991008962
3	9	0,86611	0,72243	27,2	6,000796052
3	10	0,89391	0,74554	27,2	5,997632869
3	11	0,92251	0,76938	27,2	5,997123417
3	12	0,88118	0,73469	27,2	5,988098972
3	13	0,90898	0,75674	27,2	5,943722428
3	14	0,90567	0,75541	27,2	6,000103485
3	15	0,86261	0,71949	27,2	5,999931699
3	16	0,90993	0,75893	27,2	5,998783645
3	17	0,90329	0,75319	27,2	5,990716797
3	18	0,88523	0,73792	27,2	5,982136219
3	19	0,9081	0,75736	27,2	5,997045615
3	20	0,85359	0,71199	27,2	6,000924966
3	21	0,94457	0,78773	27,2	5,99528078
3	22	0,94849	0,79142	27,2	6,011342785
3	23	0,91878	0,76575	27,2	5,976782294
3	24	0,93112	0,77619	27,2	5,982773056
3	25	0,88031	0,73429	27,2	6,00143926
3	26	0,9324	0,77764	27,2	5,997575498
3	27	0,93805	0,7824	27,2	5,999416537
3	28	0,94714	0,79023	27,2	6,008908235
3	29	0,87158	0,727	27,2	6,001104153
3	30	0,94105	0,78499	27,2	6,002790696
4	1	0,91636	0,76404	27,2	5,988823298
4	2	0,91699	0,76514	27,2	6,011485197
4	3	0,92897	0,7749	27,2	6,00227264

## Anhang

4	4	0,90341	0,75339	27,2	5,994706898
4	5	0,91798	0,76561	27,3	5,997319806
4	6	0,96164	0,80212	27,3	6,000960697
4	7	0,94989	0,79237	27,3	6,002898333
4	8	0,91483	0,76355	27,3	6,019799324
4	9	0,93722	0,779774	27,3	5,925628548
4	10	0,96091	0,80163	27,3	6,00543962
4	11	0,93653	0,78134	27,3	6,007326991
4	12	0,9494	0,79308	27,3	6,045850998
4	13	0,93191	0,77728	27,3	5,999342318
4	14	0,91935	0,76686	27,3	6,001542849
4	15	0,92552	0,7718	27,3	5,993478397
4	16	0,92806	0,77379	27,3	5,988501456
4	17	0,98141	0,81865	27,3	6,002417232
4	18	0,95658	0,79816	27,3	6,010831428
4	19	0,91055	0,75963	27,3	6,005930937
4	20	0,92976	0,77593	27,3	6,016625714
4	21	0,89737	0,74884	27,3	6,014237543
4	22	0,91778	0,76547	27,3	5,99837499
4	23	0,95922	0,79961	27,3	5,982487496
4	24	0,96524	0,80533	27,3	6,008734003
4					
4	26	0,89223	0,74442	27,3	6,008918218
4	27	0,91005	0,75915	27,3	6,003429046
4	28	0,92614	0,77283	27,3	6,013528592
4	29	0,90172	0,75262	27,3	6,020286836
4	30	0,92217	0,76928	27,3	6,004201597

**Tabelle 15: Ergebnisse biaxiale Biegefestigkeit IPS e.max ZirCAD Prime (ohne Alterung)**

ohne Alterung									
Material	Schicht	Probennr	d1 [mm]	d2 [mm]	d3 [mm]	b [mm]	v	P [N]	$\sigma$ [MPa]
IPS e.max ZirCAD Prime	1	1	11	1,4	12,98	1,34	0,25	517,91248	477,6646046
	1	2	11	1,4	12,98	1,33	0,25	738,10651	691,0222586
	1	3	11	1,4	12,98	1,3	0,25	504,59393	494,4605015
	1	4	11	1,4	12,99	1,34	0,25	495,90793	457,3158608
	1	5	11	1,4	12,99	1,3	0,25	640,4314	627,4956492

## Anhang

	1	6	11	1,4	12,97	1,34	0,25	370,40024	341,6563795
	1	7	11	1,4	12,98	1,28	0,25	373,00006	377,0207461
	1	8	11	1,4	12,98	1,25	0,25	461,61823	489,2594309
	1	9	11	1,4	12,98	1,33	0,25	397,36371	372,015644
	1	10	11	1,4	12,97	1,28	0,25	300,26913	303,5418851
	1	11	11	1,4	12,97	1,27	0,25	440,40924	452,2482083
	1	12	11	1,4	12,94	1,25	0,25	682,87476	724,1096825
	1	13	11	1,4	12,94	1,3	0,25	437,4375	428,8571239
	1	14	11	1,4	12,94	1,26	0,25	313,86063	327,5511052
	1	15	11	1,4	12,94	1,3	0,25	327,3287	320,9081227
	1	16	11	1,4	12,97	1,29	0,25	380,48126	378,6881601
	1	17	11	1,4	12,97	1,29	0,25	468,17966	465,9732571
	1	18	11	1,4	12,97	1,24	0,25	360,92624	388,7791445
	1	19	11	1,4	12,96	1,28	0,25	428,68613	433,4101386
	1	20	11	1,4	12,97	1,2	0,25	490,47089	564,1292457
	1	21	11	1,4	12,98	1,25	0,25	555,17242	588,4155552
	1	22	11	1,4	12,97	1,23	0,25	502,99432	550,6564562
	1	23	11	1,4	12,98	1,24	0,25	523,26166	563,5751401
	1	24	11	1,4	12,97	1,21	0,25	500,33286	565,9996411
	1	25	11	1,4	12,97	1,11	0,25	437,06537	587,5276539
	1	26	11	1,4	12,98	1,21	0,25	513,96277	581,3493679
	1	27	11	1,4	12,97	1,24	0,25	491,40949	529,3318649
	1	28	11	1,4	12,97	1,2	0,25	502,8053	578,3160256
	1	29	11	1,4	12,97	1,17	0,25	492,1814	595,4994221
	1	30	11	1,4	12,95	1,24	0,25	533,38483	574,6834357
	2	1	11	1,4	13	1,34	0,25	711,24268	655,8154685
	2	2	11	1,4	13	1,34	0,25	614,30225	566,4296154
	2	3	11	1,4	12,98	1,33	0,25	625,29657	585,4085342
	2	4	11	1,4	12,99	1,32	0,25	530,99066	504,6192687
	2	5	11	1,4	12,99	1,28	0,25	603,61688	610,0511463
	2	6	11	1,4	12,98	1,32	0,25	644,97833	613,0184529
	2	7	11	1,4	12,98	1,34	0,25	632,38385	583,2402113
	2	8	11	1,4	12,97	1,28	0,25	523,32953	529,0335018
	2	9	11	1,4	12,98	1,32	0,25	558,7533	531,0660277
	2	10	11	1,4	12,96	1,35	0,25	551,67773	501,4152007
	2	11	11	1,4	12,96	1,31	0,25	480,0437	463,3591683
	2	12	11	1,4	12,97	1,39	0,25	655,36713	561,8015418
	2	13	11	1,4	12,97	1,3	0,25	493,68796	483,8310138
	2	14	11	1,4	12,98	1,32	0,25	584,4679	555,506421
	2	15	11	1,4	12,98	1,32	0,25	563,96783	536,0221762
	2	16	11	1,4	12,96	1,29	0,25	518,40204	516,0203832

## Anhang

2	17	11	1,4	12,97	1,3	0,25	549,08105	538,1181354
2	18	11	1,4	12,99	1,29	0,25	609,54639	606,5298085
2	19	11	1,4	12,98	1,29	0,25	750,84888	747,2215697
2	20	11	1,4	12,98	1,32	0,25	504,71799	479,7082693
2	21	11	1,4	12,98	1,23	0,25	701,70062	768,1002815
2	22	11	1,4	12,96	1,26	0,25	756,24091	789,0393301
2	23	11	1,4	12,98	1,29	0,25	686,92078	683,6023016
2	24	11	1,4	12,99	1,24	0,25	633,30158	682,0119853
2	25	11	1,4	12,99	1,27	0,25	807,19324	828,6953115
2	26	11	1,4	12,98	1,26	0,25	669,58252	698,4564013
2	27	11	1,4	12,97	1,17	0,25	546,42664	661,1317462
2	28	11	1,4	12,97	1,16	0,25	465,92657	573,4946586
2	29	11	1,4	12,97	1,22	0,25	582,1911	647,8489744
2	30	11	1,4	12,97	1,21	0,25	486,2692	550,0901798
3	1	11	1,4	12,98	1,29	0,25	370,69498	368,9041709
3	2	11	1,4	12,98	1,36	0,25	338,9621	303,4936483
3	3	11	1,4	12,98	1,3	0,25	545,9209	534,9575242
3	4	11	1,4	12,98	1,29	0,25	596,53339	593,6515681
3	5	11	1,4	12,98	1,29	0,25	665,73602	662,5198909
3	6	11	1,4	12,98	1,31	0,25	535,46094	516,7273961
3	7	11	1,4	12,96	1,31	0,25	698,74994	674,4639911
3	8	11	1,4	12,98	1,27	0,25	634,34937	651,324407
3	9	11	1,4	12,98	1,3	0,25	723,41321	708,8853712
3	10	11	1,4	12,98	1,32	0,25	584,99152	556,0040952
3	11	11	1,4	12,97	1,3	0,25	475,41412	465,9220342
3	12	11	1,4	12,98	1,29	0,25	609,99762	607,0507566
3	13	11	1,4	12,98	1,35	0,25	896,44824	814,5804223
3	14	11	1,4	12,98	1,23	0,25	746,91095	817,5887151
3	15	11	1,4	12,98	1,09	0,25	562,69049	784,3192331
3	16	11	1,4	12,98	1,03	0,25	476,77158	744,2386008
3	17	11	1,4	12,98	1,23	0,25	793,6889	868,7931155
3	18	11	1,4	12,97	1,13	0,25	531,37061	689,2368889
3	19	11	1,4	12,98	1,19	0,25	700,93085	819,704908
3	20	11	1,4	12,98	1,26	0,25	670,47198	699,3842224
3	21	11	1,4	12,98	1,28	0,25	927,18048	937,1748514
3	22	11	1,4	12,99	1,26	0,25	813,05902	848,0194074
3	23	11	1,4	12,98	1,25	0,25	859,57959	911,0502967
3	24	11	1,4	12,98	1,29	0,25	1065,329	1060,182437
3	25	11	1,4	12,96	1,22	0,25	826,74915	920,0971168
3	26	11	1,4	12,98	1,25	0,25	891,10828	944,4668873
3	27	11	1,4	12,98	1,18	0,25	684,79987	814,4715841

## Anhang

	3	28	11	1,4	12,98	1,22	0,25	688,51678	766,0747632
	3	29	11	1,4	12,97	1,24	0,25	611,51941	658,7107477
	3	30	11	1,4	12,98	1,27	0,25	635,10193	652,0971092
	4	1	11	1,4	12,98	1,35	0,25	912,52856	829,1922144
	4	2	11	1,4	12,98	1,29	0,25	812,09668	808,1734881
	4	3	11	1,4	12,98	1,34	0,25	917,19049	845,9140373
	4	4	11	1,4	12,98	1,3	0,25	906,08557	887,889244
	4	5	11	1,4	12,98	1,35	0,25	916,96051	833,2194145
	4	6	11	1,4	12,98	1,33	0,25	961,16925	899,8556988
	4	7	11	1,4	12,98	1,35	0,25	877,38147	797,2549164
	4	8	11	1,4	12,98	1,33	0,25	688,24408	644,3405857
	4	9	11	1,4	12,98	1,34	0,25	691,94727	638,1748515
	4	10	11	1,4	12,98	1,34	0,25	882,74109	814,1417577
	4	11	11	1,4	12,98	1,28	0,25	683,13635	690,5000949
	4	12	11	1,4	12,98	1,28	0,25	857,46954	866,7124773
	4	13	11	1,4	12,96	1,32	0,25	786,56885	747,7707205
	4	14	11	1,4	12,97	1,11	0,25	540,14813	726,0972556
	4	15	11	1,4	12,96	1,28	0,25	734,67395	742,7698695
	4	16	11	1,4	12,98	1,2	0,25	776,10699	892,5558287
	4	17	11	1,4	12,98	1,24	0,25	877,24255	944,8276738
	4	18	11	1,4	12,98	1,25	0,25	844,46924	895,0351535
	4	19	11	1,4	12,98	1,28	0,25	744,57782	752,6038586
	4	20	11	1,4	12,98	1,27	0,25	780,50696	801,393143
	4	21	11	1,4	12,98	1,2	0,25	765,18341	879,9932457
	4	22	11	1,4	12,98	1,22	0,25	742,35925	825,9823168
	4	23	11	1,4	12,98	1,2	0,25	792,47443	911,3790665
	4	24	11	1,4	12,97	1,29	0,25	1021,2103	1016,397588
	4	25	11	1,4	12,96	1,28	0,25	473,55524	478,7736946
	4	26	11	1,4	12,96	1,22	0,25	673,47675	749,5187812
	4	27	11	1,4	12,97	1,18	0,25	747,48566	889,1329871
	4	28	11	1,4	12,98	1,14	0,25	690,04852	879,3185052
	4	29	11	1,4	12,97	1,17	0,25	748,61914	905,7682172
	4	30	11	1,4	12,96	1,19	0,25	639,60199	748,161679

**Tabelle 16: Ergebnisse biaxiale Biegefestigkeit IPS e.max ZirCAD Prime (mit Alterung)**

mit Alterung									
Material	Schicht	Probe	d1 [mm]	d2 [mm]	d3 [mm]	b [mm]	v	P [N]	$\sigma$ [MPa]
IPS e.max ZirCAD Prime	1	1	11	1,4	12,99	1,31	0,25	437,92194	422,5507897
	1	2	11	1,4	12,98	1,5	0,25	603,10681	443,9029185
	1	3	11	1,4	12,99	1,31	0,25	348,91907	336,6719393
	1	4	11	1,4	12,99	1,32	0,25	372,94989	354,4275153

## Anhang

1	5	11	1,4	12,99	1,36	0,25	407,25375	364,5961582
1	6	11	1,4	12,98	1,34	0,25	512,62469	472,7877464
1	7	11	1,4	12,98	1,32	0,25	328,04694	311,7915984
1	8	11	1,4	12,98	1,29	0,25	399,73654	397,805438
1	9	11	1,4	12,98	1,35	0,25	454,63449	413,1151563
1	10	11	1,4	12,98	1,29	0,25	397,26907	395,3498892
1	11	11	1,4	12,98	1,32	0,25	334,4675	317,8940105
1	12	11	1,4	12,98	1,4	0,25	558,45044	471,850968
1	13	11	1,4	12,96	1,33	0,25	604,86359	566,4136807
1	14	11	1,4	12,97	1,36	0,25	405,10318	362,7569232
1	15	11	1,4	12,96	1,33	0,25	373,91553	350,1465038
1	16	11	1,4	12,95	1,29	0,25	361,10406	359,4879597
1	17	11	1,4	12,97	1,3	0,25	380,40723	372,8120388
1	18	11	1,4	12,94	1,24	0,25	391,03552	421,362773
1	19	11	1,4	12,96	1,23	0,25	365,49878	400,179912
1	20	11	1,4	12,95	1,22	0,25	609,22253	678,0905468
1	21	11	1,4	12,97	1,14	0,25	427,30447	544,5723809
1	22	11	1,4	12,96	1,26	0,25	705,34753	735,9386953
1	23	11	1,4	12,96	1,26	0,25	658,10968	686,6521196
1	24	11	1,4	12,96	1,19	0,25	588,0423	687,8507561
1	25	11	1,4	12,97	1,22	0,25	547,69659	609,464274
1	26	11	1,4	12,94	1,14	0,25	445,02789	567,362793
1	27	11	1,4	12,97	1,21	0,25	655,5531	741,5919545
1	28	11	1,4	12,95	1,24	0,25	573,20758	617,5895626
1	29	11	1,4	12,97	1,24	0,25	476,83304	513,6305443
1	30	11	1,4	12,97	1,21	0,25	492,90192	557,5934207
2	1	11	1,4	12,98	1,34	0,25	627,76386	578,979244
2	2	11	1,4	12,98	1,33	0,25	582,50153	545,3434114
2	3	11	1,4	12,98	1,35	0,25	605,33435	550,0524047
2	4	11	1,4	12,98	1,35	0,25	526,22839	478,1707713
2	5	11	1,4	12,98	1,3	0,25	537,43073	526,6378534
2	6	11	1,4	12,99	1,35	0,25	608,46051	552,8275389
2	7	11	1,4	12,98	1,33	0,25	388,49597	363,7135857
2	8	11	1,4	12,98	1,29	0,25	399,90161	397,9697096
2	9	11	1,4	12,98	1,33	0,25	797,33472	746,4722669
2	10	11	1,4	12,98	1,32	0,25	633,96491	602,5507613
2	11	11	1,4	12,95	1,32	0,25	514,42133	489,1054415
2	12	11	1,4	12,98	1,25	0,25	368,35437	390,4110359
2	13	11	1,4	12,98	1,38	0,25	620,19037	539,3157829
2	14	11	1,4	12,98	1,35	0,25	835,12659	758,8589457
2	15	11	1,4	12,98	1,36	0,25	628,97369	563,1588979

## Anhang

2	16	11	1,4	12,98	1,31	0,25	669,81506	646,3810324
2	17	11	1,4	12,98	1,3	0,25	694,59784	680,6486829
2	18	11	1,4	12,98	1,2	0,25	478,8743	550,7256718
2	19	11	1,4	12,97	1,24	0,25	474,4606	511,0750257
2	20	11	1,4	12,97	1,26	0,25	587,31024	612,7091389
2	21	11	1,4	12,98	1,33	0,25	729,58905	683,0481361
2	22	11	1,4	12,98	1,21	0,25	620,33026	701,6628967
2	23	11	1,4	12,98	1,22	0,25	597,56354	664,8760869
2	24	11	1,4	12,98	1,31	0,25	678,24744	654,5183919
2	25	11	1,4	12,97	1,27	0,25	909,06653	933,5038202
2	26	11	1,4	12,98	1,21	0,25	631,53705	714,3390262
2	27	11	1,4	12,99	1,22	0,25	621,80267	691,7636421
2	28	11	1,4	12,98	1,25	0,25	749,18652	794,0470115
2	29	11	1,4	12,98	1,28	0,25	754,13251	762,2615388
2	30	11	1,4	12,97	1,17	0,25	457,79672	553,8967657
3	1	11	1,4	12,95	1,25	0,25	526,9845	558,7392824
3	2	11	1,4	12,98	1,33	0,25	685,56689	641,8341795
3	3	11	1,4	12,98	1,33	0,25	503,35159	471,2424991
3	4	11	1,4	12,98	1,29	0,25	609,34021	606,3965228
3	5	11	1,4	12,95	1,3	0,25	558,46033	547,4406142
3	6	11	1,4	12,95	1,33	0,25	569,13324	533,0182284
3	7	11	1,4	12,97	1,36	0,25	617,98297	553,3839582
3	8	11	1,4	12,98	1,26	0,25	559,23627	583,351774
3	9	11	1,4	12,98	1,32	0,25	594,08917	564,6509456
3	10	11	1,4	12,98	1,27	0,25	878,10834	901,6063127
3	11	11	1,4	12,96	1,22	0,25	492,94629	548,6046908
3	12	11	1,4	12,96	1,27	0,25	837,17316	859,7801796
3	13	11	1,4	12,98	1,37	0,25	716,38373	632,0928291
3	14	11	1,4	12,98	1,37	0,25	845,04303	745,6138638
3	15	11	1,4	12,98	1,26	0,25	569,84491	594,4178848
3	16	11	1,4	12,98	1,21	0,25	768,31256	869,0474266
3	17	11	1,4	12,98	1,17	0,25	849,75751	1028,015284
3	18	11	1,4	13	1,17	0,25	767,2063	927,92715
3	19	11	1,4	12,98	1,32	0,25	1120,979	1065,432403
3	20	11	1,4	12,98	1,23	0,25	718,32532	786,2981169
3	21	11	1,4	12,98	1,25	0,25	756,99329	802,3212348
3	22	11	1,4	12,98	1,27	0,25	797,21619	818,5495066
3	23	11	1,4	12,98	1,19	0,25	840,2973	982,6872731
3	24	11	1,4	12,98	1,28	0,25	966,6236	977,0431364
3	25	11	1,4	12,98	1,29	0,25	773,85675	770,1182935
3	26	11	1,4	12,98	1,25	0,25	1035,3671	1097,363738

## Anhang

	3	27	11	1,4	12,98	1,26	0,25	950,96448	991,9721728
	3	28	11	1,4	12,96	1,3	0,25	573,3432	561,8958649
	3	29	11	1,4	13	1,31	0,25	932,87701	900,0263959
	3	30	11	1,4	12,98	1,21	0,25	879,01697	994,2664906
	4	1	11	1,4	12,98	1,31	0,25	592,89069	572,1479176
	4	2	11	1,4	12,97	1,45	0,25	819,76825	645,7775801
	4	3	11	1,4	12,98	1,34	0,25	834,0014	769,1897175
	4	4	11	1,4	12,98	1,34	0,25	948,8952	875,1549212
	4	5	11	1,4	12,98	1,33	0,25	847,70581	793,6301588
	4	6	11	1,4	12,97	1,29	0,25	771,62726	767,9907947
	4	7	11	1,4	12,96	1,35	0,25	977,76538	888,5768482
	4	8	11	1,4	12,97	1,37	0,25	835,10626	736,9338064
	4	9	11	1,4	12,97	1,35	0,25	952,3681	865,4962261
	4	10	11	1,4	12,97	1,35	0,25	799,23822	726,334346
	4	11	11	1,4	12,97	1,33	0,25	971,55206	909,6842393
	4	12	11	1,4	12,97	1,34	0,25	843,32013	777,8766655
	4	13	11	1,4	12,97	1,31	0,25	782,01257	754,742869
	4	14	11	1,4	12,98	1,24	0,25	751,39111	809,2803004
	4	15	11	1,4	12,98	1,27	0,25	653,9339	671,4330183
	4	16	11	1,4	12,98	1,24	0,25	788	848,7096343
	4	17	11	1,4	12,98	1,26	0,25	874	911,6888165
	4	18	11	1,4	12,98	1,28	0,25	955	965,2942458
	4	19	11	1,4	12,97	1,33	0,25	1010	945,6838359
	4	20	11	1,4	12,98	1,28	0,25	935	945,0786595
	4	21	11	1,4	12,98	1,28	0,25	786	794,4725415
	4	22	11	1,4	12,98	1,2	0,25	796,83984	916,399481
	4	23	11	1,4	12,98	1,2	0,25	895,69464	1030,086674
	4	24	11	1,4	12,98	1,23	0,25	840,48547	920,0178933
	4	25	11	1,4	12,98	1,23	0,25	907,53693	993,4142078
	4	26	11	1,4	12,99	1,25	0,25	867,3609	919,1885883
	4	27	11	1,4	12,98	1,27	0,25	966,29419	992,1519977
	4	28	11	1,4	12,98	1,27	0,25	928,07507	952,9101468
	4	29	11	1,4	12,97	1,26	0,25	842,81049	879,2587809
	4	30	11	1,4	12,98	1,27	0,25	857,36389	880,3067507

**Tabelle 17: Ergebnisse biaxiale Biegefestigkeit Dentona Optimill Multilayer 3D (ohne Alterung)**

ohne Alterung									
Material	Schicht	Probennr	d1 [mm]	d2 [mm]	d3 [mm]	b [mm]	v	P [N]	$\sigma$ [MPa]
Dentona Optimill ML 3D	1	1	11	1,4	12,95	1,24	0,25	532,03619	573,2303815
	1	2	11	1,4	12,95	1,1	0,25	454,65839	622,4883502
	1	3	11	1,4	12,95	1,21	0,25	549,57398	621,8516778

## Anhang

1	4	11	1,4	12,95	1,22	0,25	484,53894	539,3124127
1	5	11	1,4	12,95	1,13	0,25	524,61365	680,6347046
1	6	11	1,4	12,97	1,22	0,25	517,39044	575,7402795
1	7	11	1,4	12,95	1,13	0,25	470,99707	611,0724596
1	8	11	1,4	12,97	1,22	0,25	561,32324	624,627697
1	9	11	1,4	12,96	1,27	0,25	580,35242	596,0242529
1	10	11	1,4	12,96	1,25	0,25	567,56421	601,692435
1	11	11	1,4	12,98	1,22	0,25	518,83081	577,2745117
1	12	11	1,4	12,96	1,26	0,25	599,78021	625,7928828
1	13	11	1,4	12,96	1,15	0,25	503,94748	631,2031721
1	14	11	1,4	12,96	1,25	0,25	595,00385	630,7820448
1	15	11	1,4	12,94	1,28	0,25	499,21292	504,8347024
1	16	11	1,4	12,92	1,1	0,25	489,92517	671,014505
1	17	11	1,4	12,94	1,19	0,25	547,43219	640,50088
1	18	11	1,4	12,94	1,15	0,25	531,09613	665,3662662
1	19	11	1,4	12,94	1,18	0,25	432,47809	514,6161557
1	20	11	1,4	12,94	1,17	0,25	533,39722	645,5982499
1	21	11	1,4	12,98	1,2	0,25	592,28577	681,1536514
1	22	11	1,4	12,9	1,22	0,25	598,64478	666,7172995
1	23	11	1,4	12,9	1,2	0,25	466,99551	537,5791364
1	24	11	1,4	12,9	1,15	0,25	441,23618	553,0541044
1	25	11	1,4	12,9	1,16	0,25	540,60919	665,9776214
1	26	11	1,4	12,9	1,19	0,25	650,84436	761,8604203
1	27	11	1,4	12,9	1,19	0,25	580,89117	679,9751541
1	28	11	1,4	12,93	1,2	0,25	520,70642	599,191726
1	29	11	1,4	12,93	1,2	0,25	673,56354	775,0887687
1	30	11	1,4	12,92	1,19	0,25	659,39618	771,6849479
2	1	11	1,4	12,97	1,25	0,25	621,74713	659,0549678
2	2	11	1,4	12,98	1,18	0,25	475,90231	566,0177961
2	3	11	1,4	12,95	1,12	0,25	407,78674	538,5530007
2	4	11	1,4	12,98	1,16	0,25	457,50983	563,0678535
2	5	11	1,4	12,97	1,2	0,25	544,23938	625,9726309
2	6	11	1,4	12,98	1,2	0,25	551,53601	634,2897111
2	7	11	1,4	12,98	1,18	0,25	547,51886	651,1954449
2	8	11	1,4	12,98	1,19	0,25	580,01221	678,296375
2	9	11	1,4	12,96	1,23	0,25	647,76318	709,2275779
2	10	11	1,4	12,98	1,16	0,25	504,46686	620,8589502
2	11	11	1,4	12,97	1,19	0,25	496,27542	580,4391771
2	12	11	1,4	12,98	1,17	0,25	481,827	582,902195
2	13	11	1,4	12,98	1,25	0,25	501,75574	531,8003341
2	14	11	1,4	12,97	1,1	0,25	439,29199	601,3063501

## Anhang

2	15	11	1,4	12,96	1,2	0,25	474,439	545,7546712
2	16	11	1,4	12,97	1,04	0,25	399,51502	611,7786285
2	17	11	1,4	12,97	1,17	0,25	454,66229	550,1043606
2	18	11	1,4	12,97	1,2	0,25	495,70187	570,1458175
2	19	11	1,4	12,95	1,07	0,25	473,68112	685,4091753
2	20	11	1,4	12,96	1,18	0,25	492,21243	585,5556036
2	21	11	1,4	12,9	1,15	0,25	483,61481	606,1723151
2	22	11	1,4	12,9	1,18	0,25	644,13531	766,8409284
2	23	11	1,4	12,93	1,19	0,25	644,26331	753,8845457
2	24	11	1,4	12,92	1,17	0,25	644,70642	780,5087888
2	25	11	1,4	12,91	1,18	0,25	590,60474	703,0281426
2	26	11	1,4	12,9	1,2	0,25	514,3183	592,0544811
2	27	11	1,4	12,93	1,19	0,25	606,62555	709,8427345
2	28	11	1,4	12,95	1,2	0,25	693,37305	797,6931376
2	29	11	1,4	12,94	1,2	0,25	711,1994	818,2993629
2	30	11	1,4	12,94	1,2	0,25	638,53412	734,6913695
3	1	11	1,4	12,98	1,26	0,25	426,8652	445,2725774
3	2	11	1,4	13,02	1,23	0,25	569,42072	623,0086763
3	3	11	1,4	13,02	1,26	0,25	461,61075	481,2889353
3	4	11	1,4	13,02	1,26	0,25	481,40671	501,9287851
3	5	11	1,4	13	1,1	0,25	457,86783	626,510284
3	6	11	1,4	13	1,23	0,25	586,88678	642,2698708
3	7	11	1,4	12,98	1,22	0,25	496,12311	552,0088994
3	8	11	1,4	13,05	1,26	0,25	609,10596	634,8484504
3	9	11	1,4	13,01	1,21	0,25	575,02325	650,1848741
3	10	11	1,4	12,98	1,18	0,25	529,06244	629,2441695
3	11	11	1,4	13	1,21	0,25	521,81635	590,0928921
3	12	11	1,4	13	1,22	0,25	565,52136	629,0755396
3	13	11	1,4	13	1,18	0,25	552,94556	657,4940148
3	14	11	1,4	13,03	1,22	0,25	621,40723	690,997803
3	15	11	1,4	13	1,23	0,25	553,83905	606,1035062
3	16	11	1,4	13,05	1,23	0,25	536,16321	586,4150306
3	17	11	1,4	12,98	1,19	0,25	515,75079	603,1457426
3	18	11	1,4	13	1,2	0,25	417,33926	479,8441442
3	19	11	1,4	12,98	1,17	0,25	482,29205	583,4648093
3	20	11	1,4	13,02	1,14	0,25	506,49435	645,1132491
3	21	11	1,4	12,95	1,19	0,25	721,409	843,9544816
3	22	11	1,4	12,96	1,2	0,25	690,54138	794,3406609
3	23	11	1,4	12,98	1,23	0,25	497,7106	544,8073449
3	24	11	1,4	12,95	1,2	0,25	624,33569	718,2689036
3	25	11	1,4	12,95	1,18	0,25	564,79749	671,9858563

## Anhang

	3	26	11	1,4	12,96	1,18	0,25	588,76721	700,4210317
	3	27	11	1,4	12,98	1,21	0,25	647,71002	732,632468
	3	28	11	1,4	12,97	1,2	0,25	608,38458	699,751087
	3	29	11	1,4	12,97	1,18	0,25	681,02985	810,0839073
	3	30	11	1,4	12,97	1,2	0,25	560,6239	644,8177611
	4	1	11	1,4	13,01	1,23	0,25	559,38971	612,1057287
	4	2	11	1,4	13	1,17	0,25	494,60239	598,2158686
	4	3	11	1,4	13,01	1,24	0,25	492,77396	530,5503076
	4	4	11	1,4	13,03	1,25	0,25	389,60864	412,6944085
	4	5	11	1,4	13	1,21	0,25	342,40122	387,2023657
	4	6	11	1,4	13,01	1,27	0,25	607,01904	623,0416332
	4	7	11	1,4	12,99	1,26	0,25	642,22888	669,8438144
	4	8	11	1,4	13,01	1,24	0,25	560,6593	603,6397856
	4	9	11	1,4	13,01	1,22	0,25	507,16544	564,0949104
	4	10	11	1,4	13,02	1,22	0,25	528,69379	587,9705866
	4	11	11	1,4	13,02	1,25	0,25	523,81665	554,9199369
	4	12	11	1,4	13,01	1,25	0,25	455,56055	482,6677415
	4	13	11	1,4	13,02	1,26	0,25	621,50928	648,003842
	4	14	11	1,4	13,02	1,26	0,25	517,03009	539,0707704
	4	15	11	1,4	13,02	1,2	0,25	572,94006	658,5939778
	4	16	11	1,4	13,03	1,22	0,25	501,7959	558,0044604
	4	17	11	1,4	13	1,2	0,25	577,10413	663,5369814
	4	18	11	1,4	13	1,22	0,25	561,95905	625,1128843
	4	19	11	1,4	13	1,2	0,25	506,81424	582,7197828
	4	20	11	1,4	12,97	1,2	0,25	702,26831	807,7341665
	4	21	11	1,4	12,98	1,22	0,25	711,82831	792,0122134
	4	22	11	1,4	12,98	1,21	0,25	699,91486	791,6819732
	4	23	11	1,4	12,98	1,2	0,25	585,36505	673,1945364
	4	24	11	1,4	12,97	1,2	0,25	646,44873	743,5316654
	4	25	11	1,4	12,97	1,21	0,25	541,03998	612,0494193
	4	26	11	1,4	12,98	1,2	0,25	644,26697	740,9342286
	4	27	11	1,4	12,98	1,21	0,25	519,43463	587,5386562
	4	28	11	1,4	12,98	1,22	0,25	735,94171	818,8418712
	4	29	11	1,4	12,97	1,22	0,25	584,35236	650,2539695
	4	30	11	1,4	12,98	1,23	0,25	585,43439	640,8321482

**Tabelle 18: Ergebnisse biaxiale Biegefestigkeit Dentona Optimill Multilayer 3D (mit Alterung)**

mit Alterung									
Material	Schicht	Probe	d1 [mm]	d2 [mm]	d3 [mm]	b [mm]	v	P [N]	$\sigma$ [MPa]
Dentona Optimill	1	1	11	1,4	12,96	1,18	0,25	472,42551	562,0162847

## Anhang

1	2	11	1,4	12,96	1,15	0,25	406,41284	509,0393061
1	3	11	1,4	12,96	1,17	0,25	457,32019	553,386077
1	4	11	1,4	12,96	1,2	0,25	487,46188	560,7351062
1	5	11	1,4	12,95	1,12	0,25	425,86627	562,4301492
1	6	11	1,4	12,97	1,18	0,25	599,35504	712,931859
1	7	11	1,4	12,96	1,19	0,25	364,79254	426,708805
1	8	11	1,4	12,96	1,24	0,25	483,42142	520,7893485
1	9	11	1,4	12,95	1,2	0,25	543,49323	625,2634392
1	10	11	1,4	12,96	1,21	0,25	554,66821	627,5410121
1	11	11	1,4	12,95	1,14	0,25	521,94367	665,3425841
1	12	11	1,4	12,95	1,26	0,25	607,9184	634,3597041
1	13	11	1,4	12,96	1,26	0,25	776,51746	810,1952809
1	14	11	1,4	12,96	1,23	0,25	466,10468	510,3320131
1	15	11	1,4	12,95	1,22	0,25	472,02387	525,3826028
1	16	11	1,4	12,92	1,18	0,25	659,05206	784,4102046
1	17	11	1,4	12,93	1,18	0,25	495,30881	589,450584
1	18	11	1,4	12,93	1,17	0,25	516,47388	625,1899719
1	19	11	1,4	12,94	1,2	0,25	622,03204	715,7042359
1	20	11	1,4	12,93	1,18	0,25	577,68445	687,4831023
1	21	11	1,4	12,9	1,2	0,25	633,78113	729,5734141
1	22	11	1,4	12,93	1,2	0,25	695,74493	800,613534
1	23	11	1,4	12,9	1,22	0,25	598,21747	666,2414025
1	24	11	1,4	12,9	1,21	0,25	505,32034	572,1214496
1	25	11	1,4	12,9	1,16	0,25	442,60367	545,2444066
1	26	11	1,4	12,91	1,14	0,25	640,52887	816,8998306
1	27	11	1,4	12,9	1,19	0,25	564,18353	660,4176509
1	28	11	1,4	12,92	1,15	0,25	539,07831	675,5285393
1	29	11	1,4	12,9	1,21	0,25	726,19269	822,1921384
1	30	11	1,4	12,93	1,19	0,25	608,12763	711,600388
2	1	11	1,4	12,98	1,17	0,25	395,14829	478,040468
2	2	11	1,4	12,98	1,16	0,25	533,59003	656,7015033
2	3	11	1,4	12,98	1,2	0,25	562,63403	647,0529052
2	4	11	1,4	12,98	1,2	0,25	621,0058	714,1829007
2	5	11	1,4	12,99	1,2	0,25	541,84631	623,0575424
2	6	11	1,4	12,98	1,18	0,25	519,87329	618,3149911
2	7	11	1,4	12,99	1,15	0,25	608,53461	761,9288349
2	8	11	1,4	12,97	1,15	0,25	567,20007	710,3435992
2	9	11	1,4	12,98	1,19	0,25	639,63294	748,0199484
2	10	11	1,4	12,98	1,13	0,25	600,10382	778,2977772
2	11	11	1,4	12,98	1,15	0,25	659,97998	826,4400705
2	12	11	1,4	12,99	1,2	0,25	596,93854	686,4231698

## Anhang

2	13	11	1,4	12,97	1,33	0,25	633,23175	592,9079509
2	14	11	1,4	12,96	1,21	0,25	568,83679	643,5710715
2	15	11	1,4	12,96	1,18	0,25	431,89847	513,8036976
2	16	11	1,4	12,96	1,19	0,25	497,7963	582,2872941
2	17	11	1,4	12,97	1,2	0,25	576,98932	663,6409185
2	18	11	1,4	12,97	1,17	0,25	597,67517	723,1383019
2	19	11	1,4	12,97	1,19	0,25	380,47095	444,9953273
2	20	11	1,4	12,97	1,18	0,25	589,98395	701,7849578
2	21	11	1,4	12,92	1,2	0,25	582,44293	670,3141898
2	22	11	1,4	12,93	1,2	0,25	637,81134	733,9476955
2	23	11	1,4	12,92	1,15	0,25	589,8609	739,1651026
2	24	11	1,4	12,95	1,15	0,25	596,59351	747,3331267
2	25	11	1,4	12,92	1,19	0,25	591,69019	692,4492813
2	26	11	1,4	12,95	1,2	0,25	628,85809	723,4717121
2	27	11	1,4	12,9	1,2	0,25	488,87204	562,7621706
2	28	11	1,4	12,95	1,18	0,25	653,16022	777,1182399
2	29	11	1,4	12,93	1,23	0,25	655,37683	717,821113
2	30	11	1,4	12,94	1,21	0,25	599,26233	678,1559236
3	1	11	1,4	13,03	1,17	0,25	545,06543	659,0174935
3	2	11	1,4	13,01	1,2	0,25	620,67664	713,551133
3	3	11	1,4	13	1,21	0,25	468,66473	529,9867108
3	4	11	1,4	13	1,15	0,25	557,86414	698,4031785
3	5	11	1,4	13	1,2	0,25	546,17358	627,9739738
3	6	11	1,4	12,98	1,21	0,25	641,73254	725,8712719
3	7	11	1,4	13,01	1,2	0,25	536,03204	616,2408079
3	8	11	1,4	13	1,2	0,25	572,93897	658,7480045
3	9	11	1,4	13,01	1,15	0,25	593,12683	742,4617493
3	10	11	1,4	13,01	1,22	0,25	658,89386	732,8548961
3	11	11	1,4	13,04	1,15	0,25	488,91635	611,7979159
3	12	11	1,4	13,03	1,25	0,25	729,07648	772,2769779
3	13	11	1,4	13	1,22	0,25	629,7243	700,493709
3	14	11	1,4	13,01	1,21	0,25	585,96283	662,5543683
3	15	11	1,4	13	1,24	0,25	506,07758	544,9380956
3	16	11	1,4	12,98	1,17	0,25	671,04565	811,8141738
3	17	11	1,4	13	1,17	0,25	636,35156	769,6598596
3	18	11	1,4	12,98	1,15	0,25	587,84113	736,10636
3	19	11	1,4	13,02	1,17	0,25	577,83673	698,7220952
3	20	11	1,4	12,99	1,15	0,25	518,19104	648,8122299
3	21	11	1,4	12,94	1,21	0,25	677,41913	766,6021577
3	22	11	1,4	12,95	1,2	0,25	770,11206	885,9777706
3	23	11	1,4	13	1,2	0,25	728,89764	838,0646069

## Anhang

3	24	11	1,4	12,94	1,21	0,25	640,85632	725,2258162
3	25	11	1,4	12,95	1,2	0,25	658,28748	757,3288355
3	26	11	1,4	12,95	1,21	0,25	596,8017	675,290595
3	27	11	1,4	12,99	1,21	0,25	706,44598	798,9747029
3	28	11	1,4	12,97	1,22	0,25	795,21466	884,8967317
3	29	11	1,4	12,97	1,23	0,25	784,40686	858,7347434
3	30	11	1,4	12,97	1,21	0,25	551,27515	623,6279142
4	1	11	1,4	13,01	1,15	0,25	488,96802	612,0782791
4	2	11	1,4	13,03	1,22	0,25	496,38593	551,9755303
4	3	11	1,4	13,03	1,12	0,25	449,82529	593,5097373
4	4	11	1,4	13,02	1,18	0,25	454,37427	540,1579463
4	5	11	1,4	13	1,16	0,25	602,20752	740,9751469
4	6	11	1,4	13,01	1,24	0,25	460,04843	495,316024
4	7	11	1,4	13	1,2	0,25	571,26697	656,8255926
4	8	11	1,4	13,01	1,25	0,25	538,25684	570,2847033
4	9	11	1,4	13,02	1,2	0,25	586,31177	673,9647376
4	10	11	1,4	13,03	1,2	0,25	426,79779	490,5459551
4	11	11	1,4	13,02	1,25	0,25	596,7428	632,1763079
4	12	11	1,4	13,01	1,22	0,25	559,76044	622,5937163
4	13	11	1,4	13,01	1,23	0,25	640,34168	700,6864826
4	14	11	1,4	13,03	1,25	0,25	520,02533	550,8387707
4	15	11	1,4	13,01	1,2	0,25	602,95526	693,0149842
4	16	11	1,4	13	1,21	0,25	623,22266	704,7676123
4	17	11	1,4	12,99	1,19	0,25	547,84003	640,596625
4	18	11	1,4	13	1,18	0,25	513,60553	610,7157525
4	19	11	1,4	13	1,15	0,25	491,21301	614,9610765
4	20	11	1,4	13	1,2	0,25	683,31335	785,6531601
4	21	11	1,4	12,98	1,25	0,25	576,49164	611,011341
4	22	11	1,4	12,99	1,21	0,25	658,62787	744,8934779
4	23	11	1,4	12,99	1,22	0,25	641,05762	713,1850198
4	24	11	1,4	12,97	1,21	0,25	722,79834	817,6628757
4	25	11	1,4	12,96	1,19	0,25	706,79645	826,7610573
4	26	11	1,4	12,97	1,21	0,25	729,24017	824,9501748
4	27	11	1,4	12,97	1,2	0,25	673,97754	775,194719
4	28	11	1,4	12,99	1,22	0,25	658,34766	732,4204154
4	29	11	1,4	12,98	1,19	0,25	520,6087	608,8268358
4	30	11	1,4	12,99	1,22	0,25	629,38995	700,2045915

**Tabelle 19: Ergebnisse biaxiale Biegefestigkeit Ceramill zolid fx multilayer (ohne Alterung)**

ohne Alterung

## Anhang

Material	Schicht	Probenr	d1 [mm]	d2 [mm]	d3 [mm]	b [mm]	v	P [N]	$\sigma$ [MPa]
Ceramill zolid fx multilayer	1	1	11	1,4	12,93	1,23	0,25	518,84625	568,2819056
	1	2	11	1,4	12,93	1,14	0,25	544,32007	694,0328237
	1	3	11	1,4	12,9	1,17	0,25	526,82623	637,9517858
	1	4	11	1,4	12,94	1,2	0,25	533,16144	613,4505511
	1	5	11	1,4	12,92	1,22	0,25	552,95563	615,6843955
	1	6	11	1,4	12,92	1,22	0,25	635,34827	707,4238764
	1	7	11	1,4	12,93	1,19	0,25	539,95966	631,8336559
	1	8	11	1,4	12,97	1,21	0,25	459,36761	519,6578687
	1	9	11	1,4	12,95	1,25	0,25	589,45349	624,972504
	1	10	11	1,4	12,96	1,22	0,25	536,87885	597,4976572
	1	11	11	1,4	12,97	1,23	0,25	539,09485	590,177751
	1	12	11	1,4	12,95	1,23	0,25	565,67694	619,4263061
	1	13	11	1,4	12,96	1,19	0,25	570,91919	667,8213424
	1	14	11	1,4	12,96	1,19	0,25	639,05035	747,5164141
	1	15	11	1,4	12,96	1,22	0,25	443,93378	494,0581921
	1	16	11	1,4	12,96	1,23	0,25	540,05072	591,2945869
	1	17	11	1,4	12,96	1,23	0,25	629,93976	689,7129384
	1	18	11	1,4	12,96	1,22	0,25	442,03232	491,9420403
	1	19	11	1,4	12,97	1,25	0,25	603,11816	639,4605763
	1	20	11	1,4	12,96	1,22	0,25	634,9007	706,5871224
	1	21	11	1,4	12,95	1,23	0,25	648,83673	710,4877545
	1	22	11	1,4	12,95	1,24	0,25	698,84595	752,9557828
	1	23	11	1,4	12,92	1,26	0,25	748,37152	781,2026137
	1	24	11	1,4	12,94	1,17	0,25	399,34991	483,3538641
	1	25	11	1,4	12,94	1,25	0,25	595,26099	631,2054152
	1	26	11	1,4	12,93	1,23	0,25	562,83087	616,4573777
	1	27	11	1,4	12,95	1,27	0,25	765,38965	786,1520203
	1	28	11	1,4	12,95	1,26	0,25	686,79749	716,6696261
	1	29	11	1,4	12,95	1,25	0,25	578,37274	613,2240558
	1	30	11	1,4	12,95	1,2	0,25	674,52661	776,0111983
2	1	11	1,4	12,96	1,18	0,25	445,58841	530,0897997	
2	2	11	1,4	12,95	1,22	0,25	562,39917	625,9741543	
2	3	11	1,4	12,96	1,18	0,25	617,6626	734,7961386	
2	4	11	1,4	12,96	1,24	0,25	490,57217	528,492851	
2	5	11	1,4	12,96	1,2	0,25	597,71979	687,5665146	
2	6	11	1,4	12,96	1,18	0,25	501,10437	596,1338077	
2	7	11	1,4	12,92	1,25	0,25	640,23578	679,0588915	
2	8	11	1,4	13	1,25	0,25	607,20654	643,4130456	
2	9	11	1,4	12,99	1,21	0,25	599,633	678,1715876	
2	10	11	1,4	12,99	1,25	0,25	527,59918	559,1249812	

## Anhang

2	11	11	1,4	12,98	1,18	0,25	516,83459	614,7008961
2	12	11	1,4	12,97	1,22	0,25	516,04974	574,2483809
2	13	11	1,4	12,98	1,21	0,25	639,5097	723,356992
2	14	11	1,4	12,97	1,13	0,25	521,28162	676,1505354
2	15	11	1,4	12,98	1,18	0,25	475,58853	565,6445978
2	16	11	1,4	12,98	1,21	0,25	535,90625	606,1698989
2	17	11	1,4	12,98	1,25	0,25	517,16626	548,1336225
2	18	11	1,4	12,98	1,23	0,25	563,10498	616,3897819
2	19	11	1,4	12,99	1,21	0,25	495,22238	560,0855043
2	20	11	1,4	12,97	1,23	0,25	537,70557	588,6568249
2	21	11	1,4	12,94	1,23	0,25	637,2641	697,8989619
2	22	11	1,4	12,96	1,2	0,25	673,68658	774,9523212
2	23	11	1,4	12,96	1,22	0,25	572,75385	637,4232916
2	24	11	1,4	12,98	1,21	0,25	673,1886	761,4515874
2	25	11	1,4	12,93	1,22	0,25	601,0752	669,1824022
2	26	11	1,4	12,93	1,23	0,25	735,04675	805,0819824
2	27	11	1,4	12,9	1,16	0,25	526,01385	647,9975946
2	28	11	1,4	12,98	1,24	0,25	672,93677	724,7816222
2	29	11	1,4	12,95	1,17	0,25	571,13568	691,1924124
2	30	11	1,4	12,95	1,23	0,25	693,06421	758,9176292
3	1	11	1,4	12,98	1,2	0,25	558,06848	641,802328
3	2	11	1,4	12,99	1,2	0,25	568,66711	653,9136918
3	3	11	1,4	12,97	1,21	0,25	469,18631	530,7652302
3	4	11	1,4	12,97	1,2	0,25	633,46808	728,601594
3	5	11	1,4	12,99	1,23	0,25	612,00226	669,834652
3	6	11	1,4	12,98	1,22	0,25	687,30524	764,7267406
3	7	11	1,4	12,98	1,3	0,25	720,82361	706,3477769
3	8	11	1,4	13,05	1,21	0,25	555,133	627,4001352
3	9	11	1,4	13,05	1,25	0,25	715,7738	758,0085093
3	10	11	1,4	13,02	1,21	0,25	502,76602	568,4159214
3	11	11	1,4	13	1,22	0,25	539,06897	599,650386
3	12	11	1,4	12,99	1,24	0,25	646,84564	696,5977947
3	13	11	1,4	13,01	1,2	0,25	463,31564	532,6435426
3	14	11	1,4	13,02	1,22	0,25	631,19153	701,9603072
3	15	11	1,4	12,99	1,21	0,25	548,51196	620,3548362
3	16	11	1,4	12,98	1,23	0,25	617,52142	675,9554763
3	17	11	1,4	13	1,21	0,25	368,50745	416,7244408
3	18	11	1,4	13	1,26	0,25	682,64337	711,9118684
3	19	11	1,4	12,99	1,14	0,25	521,07007	663,9130921
3	20	11	1,4	13,01	1,15	0,25	526,21625	658,704708
3	21	11	1,4	13	1,21	0,25	638,73804	722,3130881

## Anhang

3	22	11	1,4	12,97	1,2	0,25	517,69678	595,44389
3	23	11	1,4	12,94	1,23	0,25	486,64291	532,946364
3	24	11	1,4	13	1,2	0,25	658,56531	757,1986005
3	25	11	1,4	13	1,2	0,25	466,79755	536,7097906
3	26	11	1,4	12,96	1,22	0,25	456,70956	508,2764891
3	27	11	1,4	12,99	1,25	0,25	705,84564	748,0222576
3	28	11	1,4	12,98	1,25	0,25	655,03357	694,2562792
3	29	11	1,4	12,98	1,25	0,25	605,23468	641,4754858
3	30	11	1,4	13	1,22	0,25	562,21442	625,3969544
4	1	11	1,4	12,99	1,2	0,25	467,3096	537,3620852
4	2	11	1,4	12,98	1,2	0,25	516,07684	593,5101703
4	3	11	1,4	12,98	1,27	0,25	526,65533	540,748509
4	4	11	1,4	12,97	1,2	0,25	478,93558	550,8615775
4	5	11	1,4	12,98	1,2	0,25	472,49545	543,3897303
4	6	11	1,4	12,97	1,25	0,25	369,93124	392,1289088
4	7	11	1,4	12,96	1,22	0,25	576,23248	641,2947011
4	8	11	1,4	13,01	1,25	0,25	601,55261	637,3467647
4	9	11	1,4	13	1,24	0,25	438,28244	471,937129
4	10	11	1,4	12,99	1,2	0,25	534,43182	614,5463279
4	11	11	1,4	12,98	1,24	0,25	343,48447	369,9474315
4	12	11	1,4	13	1,25	0,25	538,68347	570,8040816
4	13	11	1,4	13	1,17	0,25	512,05164	619,3205345
4	14	11	1,4	13,01	1,06	0,25	364,52264	537,0750477
4	15	11	1,4	12,98	1,17	0,25	554,07367	670,304405
4	16	11	1,4	13	1,18	0,25	512,62402	609,5486665
4	17	11	1,4	12,99	1,15	0,25	502,79599	629,5365267
4	18	11	1,4	13	1,11	0,25	335,31357	450,5869557
4	19	11	1,4	12,98	1,18	0,25	525,90704	625,4912769
4	20	11	1,4	12,99	1,23	0,25	631,7738	691,47455
4	21	11	1,4	12,99	1,15	0,25	536,50275	671,7397963
4	22	11	1,4	12,98	1,23	0,25	630,73639	690,4209317
4	23	11	1,4	12,98	1,25	0,25	329,86127	349,613007
4	24	11	1,4	12,96	1,21	0,25	603,01971	682,2449759
4	25	11	1,4	12,96	1,21	0,25	602,5152	681,6741762
4	26	11	1,4	12,97	1,28	0,25	590,13648	596,568603
4	27	11	1,4	12,98	1,1	0,25	348,36267	476,7849371
4	28	11	1,4	13	1,26	0,25	522,74902	545,1620113
4	29	11	1,4	13	1,15	0,25	510,19739	638,7280602
4	30	11	1,4	13	1,24	0,25	604,99542	651,4516128

## Anhang

**Tabelle 20: Ergebnisse biaxiale Biegefestigkeit Ceramill zolid fx multilayer (mit Alterung)**

mit Alterung									
Material	Schicht	Probe	d1 [mm]	d2 [mm]	d3 [mm]	b [mm]	v	P [N]	$\sigma$ [MPa]
Ceramill zolid fx multilayer	1	1	11	1,4	12,94	1,18	0,25	573,40521	680,9516794
	1	2	11	1,4	12,94	1,22	0,25	570,67566	635,2621939
	1	3	11	1,4	12,93	1,22	0,25	564,95978	628,7236843
	1	4	11	1,4	12,93	1,24	0,25	568,83026	613,0200633
	1	5	11	1,4	12,93	1,2	0,25	468,94553	539,6289883
	1	6	11	1,4	12,93	1,24	0,25	582,86334	628,1433098
	1	7	11	1,4	12,96	1,2	0,25	418,88303	481,8477624
	1	8	11	1,4	12,95	1,2	0,25	563,75861	648,5778086
	1	9	11	1,4	12,95	1,17	0,25	507,28906	613,9247869
	1	10	11	1,4	12,96	1,2	0,25	443,67493	510,3662778
	1	11	11	1,4	12,95	1,23	0,25	472,22476	517,0945089
	1	12	11	1,4	12,96	1,19	0,25	599,80634	701,6115051
	1	13	11	1,4	12,95	1,18	0,25	557,84161	663,7098861
	1	14	11	1,4	12,95	1,23	0,25	617,90826	676,6205335
	1	15	11	1,4	12,95	1,25	0,25	704,31842	746,7589104
	1	16	11	1,4	12,95	1,2	0,25	494,76318	569,2018143
	1	17	11	1,4	12,95	1,24	0,25	467,68866	503,9005839
	1	18	11	1,4	12,96	1,23	0,25	648,44897	709,9784413
	1	19	11	1,4	12,95	1,23	0,25	650,4718	712,2781861
	1	20	11	1,4	12,9	1,21	0,25	613,83557	694,9819092
	1	21	11	1,4	12,94	1,2	0,25	558,27741	642,3487473
	1	22	11	1,4	12,94	1,08	0,25	416,75302	591,9902693
	1	23	11	1,4	12,95	1,21	0,25	479,03928	542,0405461
	1	24	11	1,4	12,92	1,22	0,25	519,63483	578,5835942
	1	25	11	1,4	12,94	1,27	0,25	357,50641	367,2482308
	1	26	11	1,4	12,95	1,26	0,25	594,42676	620,2812496
	1	27	11	1,4	12,92	1,22	0,25	574,80798	640,0157409
	1	28	11	1,4	12,94	1,25	0,25	550,58929	583,8362532
	1	29	11	1,4	12,94	1,21	0,25	555,87714	629,0590186
	1	30	11	1,4	12,93	1,22	0,25	509,20615	566,9037662
2	1	11	1,4	12,94	1,18	0,25	432,90549	515,1247281	
2	2	11	1,4	12,95	1,15	0,25	472,67877	592,1092017	
2	3	11	1,4	12,93	1,17	0,25	490,96515	594,3117384	
2	4	11	1,4	12,95	1,2	0,25	588,23956	676,7420003	
2	5	11	1,4	12,95	1,03	0,25	441,30804	689,1262397	
2	6	11	1,4	12,95	1,21	0,25	599,3866	678,2154504	
2	7	11	1,4	12,96	1,21	0,25	678,23547	767,3426488	

## Anhang

2	8	11	1,4	12,98	1,21	0,25	600,42627	679,1492568
2	9	11	1,4	13	1,22	0,25	582,36768	647,8150688
2	10	11	1,4	12,98	1,22	0,25	650,6488	723,9411436
2	11	11	1,4	12,98	1,24	0,25	701,6676	755,7259578
2	12	11	1,4	12,98	1,2	0,25	639,32202	735,2473309
2	13	11	1,4	12,98	1,16	0,25	416,44458	512,5279107
2	14	11	1,4	12,95	1,24	0,25	600,65558	647,1627881
2	15	11	1,4	12,98	1,19	0,25	629,09619	735,6977332
2	16	11	1,4	12,98	1,17	0,25	519,84796	628,8990033
2	17	11	1,4	12,98	1,22	0,25	572,64185	637,1470912
2	18	11	1,4	12,98	1,22	0,25	626,08398	696,6092193
2	19	11	1,4	12,97	1,12	0,25	542,27918	716,0028573
2	20	11	1,4	12,98	1,23	0,25	622,91327	681,8575352
2	21	11	1,4	12,96	1,21	0,25	240,01694	271,5505739
2	22	11	1,4	12,98	1,18	0,25	476,24121	566,4208668
2	23	11	1,4	12,95	1,2	0,25	652,40363	750,5597412
2	24	11	1,4	12,97	1,2	0,25	576,89673	663,5344234
2	25	11	1,4	12,97	1,18	0,25	557,35596	662,9740149
2	26	11	1,4	12,97	1,23	0,25	491,2207	537,7672046
2	27	11	1,4	12,97	1,22	0,25	610,63232	679,4977184
2	28	11	1,4	12,97	1,21	0,25	689,92676	780,4770234
2	29	11	1,4	12,98	1,24	0,25	718,40564	773,7535381
2	30	11	1,4	12,95	1,22	0,25	698,11963	777,0367877
3	1	11	1,4	13,02	1,18	0,25	591,1579	702,7656683
3	2	11	1,4	12,98	1,17	0,25	473,73538	573,1131637
3	3	11	1,4	12,98	1,21	0,25	610,95581	691,0593451
3	4	11	1,4	12,98	1,2	0,25	525,46631	604,3084525
3	5	11	1,4	12,95	1,13	0,25	543,34259	704,9336695
3	6	11	1,4	12,95	1,21	0,25	661,98334	749,0446555
3	7	11	1,4	12,96	1,14	0,25	548,65039	699,3032825
3	8	11	1,4	13	1,21	0,25	582,46869	658,6812325
3	9	11	1,4	13	1,19	0,25	606,85944	709,5248849
3	10	11	1,4	13	1,21	0,25	562,47144	636,0674586
3	11	11	1,4	13,01	1,22	0,25	658,40198	732,3078002
3	12	11	1,4	13,01	1,2	0,25	638,59937	734,1557165
3	13	11	1,4	13	1,22	0,25	671,23731	746,6720061
3	14	11	1,4	12,99	1,2	0,25	486,92377	559,9165313
3	15	11	1,4	13	1,15	0,25	379,31287	474,8706614
3	16	11	1,4	13,01	1,23	0,25	538,54053	589,3612985
3	17	11	1,4	12,99	1,22	0,25	602,24115	670,0011904
3	18	11	1,4	12,99	1,19	0,25	540,40979	631,9083501

## Anhang

3	19	11	1,4	13,01	1,24	0,25	600,31177	646,3320338
3	20	11	1,4	13,01	1,15	0,25	575,86865	720,8583803
3	21	11	1,4	12,97	1,27	0,25	639,72321	656,9200802
3	22	11	1,4	12,97	1,24	0,25	606,88965	653,7237049
3	23	11	1,4	13	1,19	0,25	576,33582	673,8374301
3	24	11	1,4	12,98	1,22	0,25	704,50775	783,8670321
3	25	11	1,4	12,93	1,16	0,25	516,46552	636,0052737
3	26	11	1,4	13,01	1,2	0,25	586,32159	674,0553993
3	27	11	1,4	13,01	1,23	0,25	564,29492	617,4732014
3	28	11	1,4	12,97	1,23	0,25	667,12488	730,3394962
3	29	11	1,4	13	1,17	0,25	508,39581	614,8988591
3	30	11	1,4	13	1,22	0,25	834,01007	927,7374309
4	1	11	1,4	13	1,23	0,25	523,2467	572,6242344
4	2	11	1,4	12,98	1,21	0,25	479,66476	542,5544892
4	3	11	1,4	12,98	1,24	0,25	633,20984	681,9940238
4	4	11	1,4	12,98	1,23	0,25	576,11517	630,6310873
4	5	11	1,4	12,97	1,2	0,25	538,27917	619,1173289
4	6	11	1,4	12,97	1,25	0,25	610,37866	647,0043358
4	7	11	1,4	13,02	1,23	0,25	567,00702	620,3678284
4	8	11	1,4	13	1,2	0,25	463,69571	533,1433916
4	9	11	1,4	13	1,24	0,25	576,50739	620,7760457
4	10	11	1,4	13,01	1,25	0,25	462,62604	490,15365
4	11	11	1,4	13,01	1,23	0,25	496,48251	543,270256
4	12	11	1,4	13,01	1,24	0,25	534,3504	575,3140304
4	13	11	1,4	13	1,23	0,25	560,69049	613,6015012
4	14	11	1,4	13,01	1,2	0,25	492,61499	566,3270757
4	15	11	1,4	12,98	1,2	0,25	531,67224	611,4455365
4	16	11	1,4	13	1,19	0,25	573,52997	670,556904
4	17	11	1,4	12,99	1,24	0,25	552,21411	594,6876765
4	18	11	1,4	13	1,22	0,25	564,50629	627,9463889
4	19	11	1,4	13	1,18	0,25	514,24811	611,4798262
4	20	11	1,4	13	1,19	0,25	504,38748	589,7172374
4	21	11	1,4	12,96	1,18	0,25	521,29297	620,1509727
4	22	11	1,4	13	1,2	0,25	583,53827	670,9347657
4	23	11	1,4	13	1,24	0,25	597,14002	642,9930074
4	24	11	1,4	12,96	1,26	0,25	536,06384	559,3131133
4	25	11	1,4	12,98	1,24	0,25	150,88368	162,5081657
4	26	11	1,4	12,98	1,15	0,25	537,07105	672,5310551
4	27	11	1,4	13,01	1,17	0,25	581,65479	703,4217233
4	28	11	1,4	12,98	1,2	0,25	594,86298	684,1175511
4	29	11	1,4	12,98	1,18	0,25	563,72211	670,4668918

## Anhang

	4	30	11	1,4	13,01	1,19	0,25	616,51196	720,7253205
--	---	----	----	-----	-------	------	------	-----------	-------------

## Anhang

**Tabelle 21: Ergebnisse Härte IPS e.max ZirCAD Prime**

		<b>Vickershärte</b>	
<b>Schicht</b>	<b>Probe</b>	<b>ohne Alterung</b>	<b>mit Alterung</b>
1	1	1508,06	1555,57
1	2	1586,97	1563,4
1	3	1609,48	1568,91
1	4	77,823	1607,62
1	5	1533,73	1503,72
1	6	1637,48	1622,33
1	7	1585,32	1529,34
1	8	1588,1	1531,89
1	9	1662,54	1489,04
1	10	1557,29	1597,23
Mittelwert		1434,6793	1556,905
Standardabweichung		454,3473415	41,81688254
2	1	1454,29	1970,34
2	2	1512,61	1564,98
2	3	1667,26	1565,6
2	4	1638,54	1613,57
2	5	1541,08	1545,39
2	6	1539,04	1488,76
2	7	1631,2	1477,85
2	8	1555,94	1508,15
2	9	1553,44	1532,41
2	10	1504,46	1803,98
Mittelwert		1559,786	1607,103
Standardabweichung		63,32782504	149,7100458
3	1	1453,17	1507,12
3	2	1496,46	1501,27
3	3	1524,42	1497,98
3	4	1509,02	1489,21
3	5	1470,15	1588,91
3	6	1475,12	1514,27
3	7	1466,48	1469,42
3	8	1457,7	1468,01
3	9	1499,43	1489,54
3	10	1491,56	1488,36
Mittelwert		1484,351	1501,409
Standardabweichung		22,20099342	32,34961776
4	1	1455,15	1654,29

## Anhang

4	2	42,0927	1527,05
4	3	1530,61	1499,03
4	4	1463,09	1591,77
4	5	1471,99	1490,52
4	6	1494,32	1456,18
4	7	1479,09	1465,62
4	8	1556,27	1489,61
4	9	1671,14	1552,77
4	10	1443,66	1526,39
Mittelwert		1360,74127	1525,323
Standardabweichung		444,1574111	57,73070362

## Anhang

**Tabelle 22: Ergebnisse Dentona Optimill Multilayer 3D**

Material	Schicht	Probe	Vickershärte		
			ohne Alterung	mit Alterung	
Dentona Optimill Multilayer 3D	1	1	1535,86	1448,23	
	1	2	1519,25	1500,2	
	1	3	1515,05	1550,52	
	1	4	1509,09	1476,36	
	1	5	1528,34	1485,73	
	1	6	1514,94	1524,01	
	1	7	1573,21	1532,5	
	1	8	1546,84	1639,47	
	1	9	1565,55	1494,48	
	1	10	1536,64	1543,69	
	Mittelwert			1534,477	1519,519
	Standardabweichung			20,73243452	50,20847507
	2	1	1636,8	1469,32	
	2	2	1562,91	1486,61	
	2	3	1551,42	1560,53	
	2	4	1573,84	1527,1	
	2	5	1537,11	1541,37	
	2	6	1548,54	1544,4	
	2	7	1540,24	1526,52	
	2	8	1587,63	1493,81	
	2	9	11,0016	1486,28	
	2	10	8,65733	1515,06	
	Mittelwert			1255,814893	1515,1
	Standardabweichung			623,5988581	28,42226381
	3	1	1449,36	14,8174	
	3	2	1462,38	1505,02	
	3	3	1522,99	1467,3	
	3	4	1511,73	1552,19	
	3	5	1908,07	1523,67	
	3	6	1555,48	1519,87	
	3	7	1476,5	1485,22	
	3	8	1473,81	1553,3	
	3	9	1470,35	1533,02	
	3	10	1499,17	1502,75	
	Mittelwert			1532,984	1365,71574
	Standardabweichung			128,6403892	451,0404997
4	1	1455,72	1549,19		

## Anhang

	4	2	1469,8	1464,19
	4	3	1475	1508,76
	4	4	1455,21	1527,61
	4	5	1533,26	1579,31
	4	6	1533,67	1509,29
	4	7	1695,99	1494,72
	4	8	1511,5	1540,62
	4	9	1482,49	1563,2
	4	10	1616,87	1495,75
	Mittelwert		1522,951	1523,264
	Standardabweichung		74,152439	33,45963305

## Anhang

**Tabelle 23: Ergebnisse Härte Ceramill zolid fx Multilayer**

Material	Schicht	Probe	Vickershärte		
			ohne Alterung	mit Alterung	
Ceramill zolid fx multilayer	1	1	1547,23	1545,96	
	1	2	1574,92	1496,42	
	1	3	1591,84	1534,72	
	1	4	1603,07	1563,87	
	1	5	1485,94	1578,53	
	1	6	1535,14	1520,54	
	1	7	1525,34	1509,67	
	1	8	1539,45	1562,22	
	1	9	1552,92	1535,66	
	1	10	1482,27	1537,83	
	Mittelwert			1543,812	1538,542
	Standardabweichung			38,01654503	24,10719801
	2	1	1497,84	1559,57	
	2	2	1520	1555,18	
	2	3	1550,28	1584,1	
	2	4	1587	1496,75	
	2	5	1541,17	1577,35	
	2	6	1547,43	1605,61	
	2	7	1590,31	1532,74	
	2	8	1518,75	1530,81	
	2	9	1489,06	1529,96	
	2	10	1556,55	1528,99	
	Mittelwert			1539,839	1550,106
	Standardabweichung			32,24888105	30,76744617
	3	1	1403,13	1618,78	
	3	2	1545,59	1508,64	
	3	3	1495,41	1513,84	
	3	4	1477,43	1547,88	
	3	5	1528,16	1587,77	
	3	6	1573,49	1570,76	
	3	7	1514,77	1529,92	
	3	8	1550,41	1508,33	
	3	9	1508,77	1487,65	
	3	10	1604,69	1533,15	
	Mittelwert			1520,185	1540,672
	Standardabweichung			52,82837443	38,79671759
	4	1	1553,01	1536,77	

## Anhang

	4	2	1565,32	1529,65
	4	3	1549,1	1572,07
	4	4	1511,35	1499,35
	4	5	1600,28	1586,88
	4	6	1548,45	1557,83
	4	7	1570,82	1572,89
	4	8	1584,61	1553,29
	4	9	1513,44	1506,88
	4	10	1523,58	1523,95
	Mittelwert		1551,996	1543,956
	Standardabweichung		28,09806086	27,87565217

## Danksagung

### **IV Danksagung**

In erster Linie danke ich Herrn Prof. Dr. med. dent. Schmitter, Leiter der Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik der Zahnklinik Würzburg, für die freundliche Überlassung des spannenden Themas dieser Doktorarbeit.

Frau Dr. Winter danke ich für die Betreuung, das entgegengebrachte Vertrauen, sowie für den unproblematischen, regelmäßigen Austausch. Danke für die vielen Anregungen zur Optimierung dieser Studie.

Des weiteren bedanke ich mich bei Frau Prof. Dr. med. dent. Jockel-Schneider für die freundliche Übernahme des Amts als Korreferentin.

Zudem möchte ich mich besonders bei Axel Schurig (M.Sc.) bedanken, welcher mich während der Laborarbeit stets unterstützt hat. Auch im Anschluss stand er mir bei jeder Fragestellung hilfsbereit zur Seite.

Aus ganzem Herzen danke ich meiner Familie und meinen Freunden, die mich während meines Studiums und meiner Promotion jederzeit liebevoll motivierten und unterstützten.

**V Lebenslauf**

## VI Eigene Veröffentlichungen

Winter A, Schurig A, Odenthal AL, Schmitter M. Impact of different layers within a blank on mechanical properties of multi-layered zirconia ceramics before and after thermal aging. Dent Mater. 2022 May;38(5):e147-e154. Epub 2022 Mar 26.

### Autorenbeiträge zur Publikation

#### Dr. Anna Winter

- Projektverwaltung
- Konzepterstellung und Planung der Methodik
- Validierung des Versuchsaufbaus und Supervision der Versuchsdurchführung
- Bereitstellung von Quellen und weiterem Studienmaterial
- Analyse der hervorgebrachten Ergebnisse und statistischen Auswertung
- Visualisierung der Ergebnisse für die Publikation
- Verfassen der Publikation

#### Axel Schurig, M.Sc.

- Planung der Methodik
- Validierung des Versuchsaufbaus
- Betreuung der Software und initiale Betreuung der Versuchsdurchführung
- Statistische Auswertung
- Revision der Publikation

#### Anna-Lisa Odenthal

- Validierung des Versuchsaufbaus
- Versuchsdurchführung (initial unter Anleitung, danach selbständig)
- Datenkuratierung und Zusammenfassung der Ergebnisse
- Visualisierung der Ergebnisse für die Dissertation
- Schreiben der Dissertation mit anschließender Überprüfung und Bearbeitung
- Überarbeitung des Schriftteils der Publikation

## Eigene Veröffentlichungen

### Prof. Dr. med. dent. Marc Schmitter

- Projektverwaltung
- Konzepterstellung
- Planung der Methodik
- Revision der Publikation

Über die Publikation hinausgehender Anteil zur Dissertationsschrift der Doktorandin:

#### 1. Beitrag zur Konzeptualisierung

Vor Beginn der Versuchsdurchführung hat die Doktorandin bereits projektbezogene Literatur aufgearbeitet und damit zur Konzeptualisierung beigetragen.

#### 2. Literaturübersicht

In der Einleitung der Dissertationsschrift wird die vorhandene Literatur zu dentalen Zirkoniumdioxidkeramiken sowie deren Herstellungs- und Prüfverfahren deutlich umfangreicher als in der Publikation dargelegt.

#### 3. Material und Methoden

Im Rahmen der Dissertation hat die Doktorandin die der Publikation zugrunde liegenden werkstoffkundlichen Versuche eigenständig durchgeführt:

- Herstellung von 720 keramischen Probenkörper aus drei verschiedenen Multilayer-Zirkoniumdioxidkeramiken und anschließende Testung der mechanischen Eigenschaften (Dichte, Biegefestigkeit, Vickers-Härte).
- Zusätzliche EDX-Analyse zur Evaluierung der Elementzusammensetzung.

#### 4. Darlegung der Ergebnisse

Im Rahmen der Dissertationsschrift wurden die hervorgebrachten Ergebnisse der einzelnen Multilayer-Zirkoniumdioxidkeramiken und deren Schichten deutlich detaillierter dargelegt als in der Publikationsschrift. Darüber hinaus hat sich die Doktorandin selbstständig Kenntnisse über die statistische Auswertung angeeignet. Hierdurch hat sie die Analyse der statistischen Auswertung für die Dissertationsschrift auch nach einer Korrektur des Signifikanzniveaus (Bonferroni-Korrektur) weitestgehend selbstständig durchgeführt.

## Eigene Veröffentlichungen

### 5. Interpretation der Ergebnisse im Rahmen der Diskussion

Die Doktorandin legt zudem eine deutlich ausführlichere Diskussion der verwendeten Methodik dar, welche auf Grundlage der aktuellen Evidenz basiert. Es wurden alternative Prüfmethoden diskutiert.

Bei der Diskussion der Ergebnisse werden im Rahmen der Dissertation Vergleichswerte der Dichte, der biaxialen Biegefestigkeit des Weibull-Moduls und der Vickers-Härte genannt. Die zur Grundlage der Diskussion verwendeten Studien unterschieden sich weitestgehend von der Publikation. Zudem wurde in der Dissertation eine größere Menge an Vergleichsliteratur einbezogen. Bei der Diskussion der Dichte wurde u.a. die „Niedertemperaturdegradation“ beleuchtet. In der Diskussion der biaxialen Biegefestigkeit wurden auch die Werte anderer (Multilayer-)Zirkoniumdioxidkeramiken dargestellt. Auch die unterschiedliche Stabilisierung von Zirkoniumdioxidkeramiken wurde unter diesem Punkt ausführlicher diskutiert, indem u.a. eine Studie hinzugezogen wurde, welche eine 3Y-TZP- Zirkoniumdioxidkeramik mit einer 5Y-TZP-Zirkoniumdioxidkeramik vergleicht. Bei der Diskussion der Härte wurde z.B. der „Eindruckgrößeneffekt“ sowie eine Studie, welche den Zusammenhang zwischen der Korngröße und der Härte untersucht, genannt. Der Vergleich der mechanischen Eigenschaften vor und nach künstlicher Alterung im Thermocycler wurde deutlich detaillierter dargestellt und diskutiert. Zudem wurde ein ausführlicher Bezug der mechanischen Eigenschaften zu der durchgeführten EDX-Analyse hergestellt. Besonders hervorgehoben wurde hier, inwiefern der Yttriumoxid-Gehalt der Zirkoniumdioxid-Keramiken einen Einfluss auf die Dichte, die biaxiale Biegefestigkeit und die Härte haben könnte.

### 6. Schlussfolgerung

Die Doktorandin zieht in die Dissertation eine ausführlichere Schlussfolgerung als in der Publikation und gibt Anregungen auf mögliche Folgestudien und weitere Untersuchungen.