

**Aus der Poliklinik für zahnärztliche Prothetik, Alterszahnheilkunde und  
medizinische Werkstoffkunde**

(Direktor: Prof. Dr. med. dent. Reiner Biffar)

im Zentrum für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde

(Geschäftsführender Direktor: Prof. Dr. med. dent. Karl-Friedrich Krey)

der Universitätsmedizin der Universität Greifswald

Opazität und Biegefestigkeit von multilayer  
Zirkoniumdioxid für den Einsatz in der  
Digitalen Zahnmedizin

Inaugural - Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Zahnmedizin

der Medizinischen Fakultät der Universität Greifswald

vorgelegt von:

Lutz Eckstein

geboren am 14.10.1991

in Schwäbisch Hall

2020

Dekan: Prof. Dr. Karlhans Endlich  
1. Gutachter: Prof. Dr. Reiner Biffar  
2. Gutachter: Prof. Dr. Sven Reich  
Ort, Raum: Greifswald, Hörsaal des ZZMK  
Tag der Disputation: 21. September 2021

Meiner Familie und Anke

# Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis .....	I
Abkürzungsverzeichnis .....	III
1 Einleitung.....	1
2 Literaturübersicht.....	2
<b>2.1 Dentale Keramiken.....</b>	<b>2</b>
<b>2.2 Zirkoniumdioxid .....</b>	<b>2</b>
<b>2.3 Lithiumdisilikatkeramik .....</b>	<b>3</b>
<b>2.4 Eigenschaften.....</b>	<b>4</b>
2.4.1 Optische Eigenschaften .....	4
2.4.2 Mechanische Eigenschaften .....	5
<b>2.5 Messmethoden .....</b>	<b>6</b>
3 Fragestellung .....	9
4 Material und Methoden.....	10
<b>4.1 Material.....</b>	<b>10</b>
4.1.1 Probenumfang .....	12
4.1.2 Prüfkörperherstellung .....	14
<b>4.2 Methoden.....</b>	<b>15</b>
4.2.1 Rauheit.....	15
4.2.2 Optische Dichte .....	16
4.2.3 Schichtstärke.....	16
4.2.4 Biaxialer Biegeversuch.....	17
4.2.5 Statistische Auswertung .....	18
5 Ergebnisse .....	20
<b>5.1 Ergebnisse Opazität.....</b>	<b>20</b>
<b>5.2 Ergebnisse Biegefestigkeit .....</b>	<b>28</b>
<b>5.3 Ergebnisse des Zusammenhangs der Opazität und der Biegefestigkeit .....</b>	<b>36</b>
<b>5.4 Ergebnisse Rauheit .....</b>	<b>40</b>

6	Diskussion.....	41
6.1	<b>Diskussion der Prüfkörperherstellung .....</b>	<b>41</b>
6.2	<b>Diskussion der Methoden .....</b>	<b>43</b>
6.3	<b>Diskussion der Ergebnisse.....</b>	<b>44</b>
7	Zusammenfassung.....	48
8	Literaturverzeichnis.....	50
9	Abbildungsverzeichnis.....	55
10	Anhang.....	62
11	Eidesstattliche Erklärung.....	79
12	Danksagung .....	80

## Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
bzw.	beziehungsweise
m	Meter
mm	Millimeter
µm	Mikrometer
nm	Nanometer
g	Gramm
et al.	und andere
&	und
°C	Grad Celsius
cm <sup>3</sup>	Kubikzentimeter
%	Prozent
W	Watt
K	Kelvin
MPa	Megapascal
LASER	light amplification by stimulated emission of radiation
ISO	Internationale Organisation für Normung
N	Newton
p	Signifikanzwert
F max	Gesamtbruchlast
CAD	computer-aided design
CAM	computer-aided manufacturing

# 1 Einleitung

In der Zahnmedizin wächst der Wunsch nach ästhetischem und gleichzeitig stabilem Zahnersatz stetig. Um ästhetische und stabile monolithische Restaurationen zu ermöglichen, wurden multilayer Zirkoniumdioxide entwickelt. Allerdings können diese Werkstoffe mit konventionellen Fertigungsverfahren wie dem Gießen, Pressen oder Schichten nicht verarbeitet werden. Die Digitale Zahnmedizin bietet durch das CAD/CAM-Verfahren die Möglichkeit der Verarbeitung industriell vorgeschinterter Zirkoniumdioxidrohlingen. Die Vorteile des Materials Zirkoniumdioxid liegen in seiner hervorragenden Biokompatibilität und seiner hohen Biegefestigkeit (Bargel & Schulze, 2018). Jedoch mussten zunächst Abstriche bei der Ästhetik gemacht werden (Stawarczyk et al., 2017; Werling & Werling, 2011). Neue multilayer Zirkoniumdioxide versprechen gute optische Eigenschaften bei akzeptabler Festigkeit (Ueda et al., 2015). Jedoch ist die Reduktion der Opazität mit einer Reduzierung der Biegefestigkeit verbunden (Stawarczyk et al., 2017).

Die hier vorliegende Studie untersucht den Zusammenhang zwischen Opazität und Biegefestigkeit von neun multilayer Zirkoniumdioxiden verschiedener Hersteller. Als Vergleichsmaterial dient eine im ästhetischen Bereich bewährte Lithiumdisilikatkeramik (Werling & Werling, 2011). Da die Farbe einen Einfluss auf die Opazität hat (Kurtulmus-Yilmaz & Ulusoy, 2014; Stawarczyk, 2018; Barizon et al., 2014), wird in den Untersuchungen eine einheitliche Zahnfarbe gewählt, um die Reproduzierbarkeit zu gewährleisten. Des Weiteren werden die Prüfkörper der Materialien in drei unterschiedlichen Schichtstärken gefertigt, sodass der Einfluss der Schichtstärke mit erfasst werden kann. Insgesamt werden 690 Prüfkörper untersucht. Um eine Beeinflussung der Ergebnisse durch unterschiedlich raue Oberflächen auszuschließen, wird eine optische Rauheitsmessung der Prüfkörper durchgeführt. Für die Opazitätsmessung kommt ein Mikrotiterplatten-Lesegerät zur Anwendung. Die biaxiale Biegefestigkeit wird mit Hilfe einer Universalprüfmaschine ermittelt. Die Daten werden deskriptiv aufgearbeitet und auf Unterschiede untersucht.

Die Ergebnisse lassen eine Aussage über den Zusammenhang der Opazität sowie der Biegefestigkeit der einzelnen Materialien unter Berücksichtigung ihres Farbverlaufes zu. Mit Hilfe des hier eingesetzten Mikrotiterplatten-Lesegeräts wird zusätzlich eine neue Methode zur Opazitätsmessung von Zirkoniumdioxid erprobt.

## 2 Literaturübersicht

### 2.1 Dentale Keramiken

Die Keramiken stellen eine große Gruppe dar. Zu ihnen gehören alle anorganischen und nichtmetallischen Werkstoffe (Hornbogen et al., 2017). Die in der Zahnmedizin verwendeten Werkstoffe für vollkeramische Restaurationen können, wie in Abb. 1 dargestellt, nach Pospiech (P. Pospiech, 2014) in vier übergeordnete Klassen eingeteilt werden: Silikatkeramiken, welche sich weiter in Feldspatkeramiken und Glaskeramiken unterteilen, Hybridkeramiken, Glasinfiltrierte Oxidkeramiken und Oxidkeramiken.

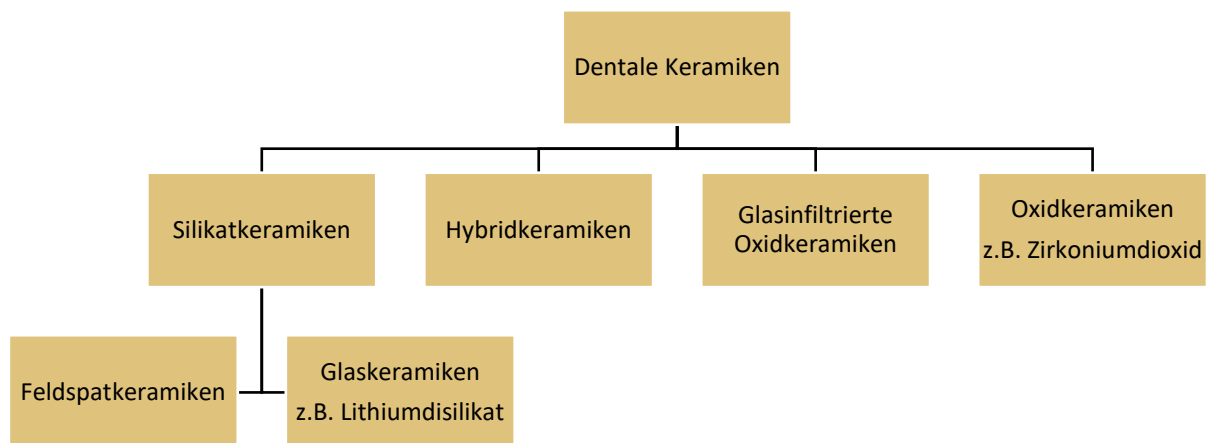


Abb. 1: Chemische Einteilung der dentalen Keramiken (P. Pospiech, 2014)

### 2.2 Zirkoniumdioxid

Chemisch gesehen besteht Zirkoniumdioxid aus Zirkonium- und Sauerstoffatomen. Die Atome gehen Mischbindungen ein. Das heißt, dass ionische und kovalente Bindungen zwischen den Atomen bestehen (Arnold, 2019). Das Material siedet bei 4300 °C und der Schmelzpunkt liegt bei 2680 °C. Bei 20 °C beträgt die Dichte 5,85 g/cm<sup>3</sup>. In Wasser ist der Werkstoff praktisch unlöslich (O'Neil, 2006).

Bis zu einer Temperatur von 1170 °C besitzt das Kristallgitter eine monokline Struktur. Zwischen 1170 °C und 2370 °C besteht eine tetragonale Gitterstruktur. Über 2370 °C liegt eine kubische Struktur vor. Bei der martensitischen (diffusionslos) Phasenumwandlung von der



tetragonalen in die monokline Form tritt eine Volumenzunahme von 3 % bis 5 % auf. Die hierbei entstehenden Werkstoffschädigungen durch Eigenspannung lassen eine Verwendung von reinem Zirkoniumdioxid nicht zu (Rösler et al., 2016).

Um eine Verwendung des Materials möglich zu machen, muss die kubische beziehungsweise tetragonale Phase stabilisiert werden, sodass es nicht mehr zur Phasenumwandlung kommt. Zur Stabilisierung werden dem Zirkoniumdioxid geringe Mengen der Oxide von Magnesium, Calcium, Cer oder Yttrium hinzugefügt. Durch unterschiedliche Mengen der stabilisierenden Elemente entstehen unterschiedliche Werkstoffvarianten. Diese Varianten können in drei Klassen eingeteilt werden. Das vollstabilisierte Zirkoniumdioxid (FSZ, Fully Stabilized Zirconia) weist ein kubisches Kristallgitter auf und hat den größten Anteil der drei Klassen an stabilisierenden Elementen. Werden geringere Mengen des stabilisierenden Oxides zugegeben, entsteht teilstabilisiertes Zirkoniumdioxid (PSZ, Partially Stabilized Zirconia), welches eine kubische und tetragonale Phase besitzt. Beim tetragonalstabilisierten polykristallinen Zirkoniumdioxid (TZP, Tetragonal Zirconia Polycrystal) wird gerade so viel Oxid hinzugegeben, dass fast ausschließlich tetragonale Kristallgitter entstehen. Mit der Stabilisierung des Materials geht ein weiterer positiver Effekt einher. Durch mechanische Spannung, wie zum Beispiel im Spannungsfeld eines Mikrorisses, kann die Gitterumwandlung der tetragonalen Phase in die monokline ausgelöst werden. Die dabei entstandene Volumenzunahme kann Risse schließen, verlangsamen oder verzweigen. Dieser Effekt wird Umwandlungsverstärkung genannt und verbessert die Bruchzähigkeit (Arnold, 2019).

Des Weiteren besitzt der Werkstoff eine hervorragende Biokompatibilität (Covacci et al., 1999; Della Bona et al., 2015; Gautam et al., 2016; Nevarez-Rascon et al., 2016). Zu den Eigenschaften von Zirkoniumdioxid gehören zudem eine gute Korrosionsbeständigkeit, ein linearer Ausdehnungskoeffizient von  $9 \cdot 10^{-6} /\text{K}$  im Bereich von 20 °C bis 1500 °C sowie eine geringe Wärmeleitfähigkeit von ca. 2 W/(m · K) (Bargel & Schulze, 2018).

### **2.3 Lithiumdisilikatkeramik**

Siliziumdioxid ( $\text{SiO}_2$ ) und Lithiumoxid ( $\text{Li}_2\text{O}$ ) sind die Grundrohstoffe aus denen Lithiumdisilikatkeramik hergestellt wird (Kieschnick et al., 2019). Der Werkstoff kann am Patientenstuhl oder im Labor verarbeitet werden. Für eine leichtere Verarbeitung wird das Material in teilgesinterten Blöcken durch CAD/CAM-Schleifeinheiten bearbeitet. In diesem

Zustand ist der Werkstoff bläulich eingefärbt und besitzt eine geringere Biegefestigkeit von ca. 120 MPa. Diese Biegefestigkeit ist für eine Okklusionskontrolle im Patientenmund ausreichend. Die minimale Volumenreduktion von 0,2 %, welche beim anschließenden Kristallisationsbrand entsteht, beeinflusst die klinische Passung nicht (Werling & Werling, 2011). Während des Kristallisationsbrands wandeln sich Lithiummetasilikatkristalle ( $\text{Li}_2\text{SiO}_3$ ) in Lithiumdisilikatkristalle ( $\text{Li}_2\text{Si}_2\text{O}_5$ ) um (Johannes Boldt, Frank A. Spitznagel, 2017). Die fertige Restauration kann sowohl adhäsiv als auch konventionell eingesetzt werden. Lithiumdisilikatkeramik weist eine leichte Verarbeitung, ein breites Indikationsfeld und ästhetische Vorzüge auf (Werling & Werling, 2011; Johannes Boldt, Frank A. Spitznagel, 2017; Kieschnick et al., 2019).

## 2.4 Eigenschaften

### 2.4.1 Optische Eigenschaften

Die Lichtdurchlässigkeit eines Werkstoffs wird durch die Begriffe Transluzenz und Opazität beschrieben. Die beiden Eigenschaften verhalten sich reziprok zueinander. Ein Material, welches nur einen kleinen Anteil des Lichtes durchscheinen lässt, weist eine hohe Opazität und eine niedrige Transluzenz auf. Durch Reflexion und Brechung des einfallenden Lichtes an Einschlüssen des Werkstoffkristallgitters kommt es zur diffusen Streuung und damit zur Beeinträchtigung der Lichtdurchlässigkeit (Marxkors & Meiners, 2001).

Die Opazität lässt sich wie folgt berechnen:

$$O = \frac{I_0}{I} = 10^E$$

hierbei gilt:

$O$  – Opazität

$I_0$  – einfallender Lichtstrom

$I$  – transmittierter Lichtstrom

$E$  – Extinktion oder optische Dichte

Transparenz beschreibt die Eigenschaft eines Werkstoffes, durchsichtig zu sein. Diffuse Streuung darf weder im Inneren noch an der Oberfläche des Materials auftreten. Raut man

die Oberfläche eines transparenten Körpers an, verliert dieser seine Transparenz (Marxkors & Meiners, 2001).

Als Opaleszenz wird die Eigenschaft von Werkstoffen bezeichnet, bei der langwelliges blaues Licht zu einem größeren Anteil gestreut wird als kurzwelliges rotes Licht. Dadurch erscheinen Zähne im Auflicht bläulich und im Durchlicht rötlich-gelblich (Ludwig & Biffar, 2005).

#### 2.4.2 Mechanische Eigenschaften

Die Biegefestigkeit ist eine Werkstoffkenngröße, anhand der die Stabilität von keramischen Restaurationen abgeschätzt werden kann. Die Biegefestigkeit entspricht der maximalen Biegespannung, die während der Biegebelastung vom Prüfkörper ausgehalten wird (Ludwig & Biffar, 2005; Bargel & Schulze, 2018).

Die biaxiale Biegefestigkeit lässt sich wie folgt berechnen (Deutsches Institut für Normung e. V. (Hrsg.), 1998).

$$S = \frac{-0,2387 * F_{max} * (X - Y)}{d^2}$$

hierbei gilt:

$S$  – maximale Biegefestigkeit in Megapascal [MPa]

$F_{max}$  – Gesamtbruchlast in Newton [N]

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

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

$\nu$  – Poisson-Verteilung mit dem Wert 0,25

$r_1$  – Radius der Kugeln in mm

$r_2$  – Radius des Prüfstempels in mm

$r_3$  – Radius des Prüfkörpers in mm

$d$  – Schichtstärke des Prüfkörpers bei Bruchbeginn in mm

Die Rauheit gibt die Beschaffenheit der Oberfläche an. Der Mittenrauwert ist ein Maß für die Rauheit (Ludwig & Biffar, 2005). Die Biegefestigkeit wird von der Rauheit beeinflusst

(Lohbauer et al., 2008; Fischer et al., 2003; Kosmač et al., 1999; Kosmač et al., 2000). Die mittlere arithmetische Höhe ( $S_a$ ) beziffert den Betrag des Höhenunterschieds eines jeden Punkts in Relation zum arithmetischen Mittel der Oberfläche (Deutsches Institut für Normung e. V. (Hrsg.), 2016).

Keramiken sind spröde Werkstoffe. Dies bedeutet, dass im Material vorhandene Risse nicht durch eine plastische Verformung entlastet werden können und beim Rissfortschritt weniger Energie dissipiert. Dies bedeutet, dass weniger Energie in thermische Energie umgewandelt wird (Rösler et al., 2016).

Die Bruchzähigkeit  $K_{IC}$  stellt einen Grenzwert dar, bei dem es zur Rissfortpflanzung kommt (Rösler et al., 2016).

$$K_{IC} = \sigma * \sqrt{\pi * \alpha} * Y$$

hierbei gilt:

$\sigma$  – anliegende Spannung

$\alpha$  – kritische Risslänge

$Y$  – Geometriefaktor

Die Werte der Biegefestigkeit von Keramik streuen sehr stark. Dies hängt damit zusammen, dass die Festigkeit durch den größten Fehler im Material bestimmt wird. Dieser Fehler ist statistisch verteilt. Die Weibullstatistik ermöglicht es, Aussagen über die Versagenswahrscheinlichkeit zu machen. Ein Maß für die Streuung der Festigkeit ist das Weibullmodul (Rösler et al., 2016).

## 2.5 Messmethoden

Der TP Parameter („translucency parameter“) bestimmt die Lichtdurchlässigkeit von dentalen Materialien. Der Parameter ergibt sich aus dem Unterschied zwischen zwei Farbmessungen einer Probe einmal vor einem schwarzen und einmal vor einem weißen Hintergrund. Somit kann eine Aussage über die Deckkraft eines Werkstoffes gemacht werden. Zur Farbmessung wird ein Spektralphotometer eingesetzt (Johnston et al., 1995).

Das CR Verhältnis („contrast ration“) bestimmt ebenfalls die Lichtdurchlässigkeit von Prüfkörpern. Aus dem Unterschied zwischen zwei Reflexionsmessungen einer Probe vor

einem schwarzen und vor einem weißen Hintergrund wird das Verhältnis berechnet. Mit Hilfe dieses Wertes kann dann ein Rückschluss auf die Lichtdurchlässigkeit gemacht werden. Zu dieser Reflexionsmessung wird ein Spektralphotometer eingesetzt (Miyagawa et al., 1981).

Der T% Parameter („transmittance percentage“) ist ein weiteres Maß für die Lichtdurchlässigkeit von Werkstoffen. Mit einem Spektralphotometer wird zunächst die Intensität eines Lichtstrahles gemessen. In einer zweiten Messung wird die Abschwächung des Lichtstrahls nach Passieren einer Probe gemessen. Hierbei kann entweder die direkte oder die totale Transmission gemessen werden. Bei der totalen Transmission wird sowohl das direkt als auch das diffus transmittierte Licht mit Hilfe einer Ulbricht-Kugel gemessen (Brodbelt et al., 1980).

Um die Opazität zu bestimmen, kann die Extinktion gemessen und anschließend umgerechnet werden. Der Synergy THX (BioTek Instruments, Winooski, Vermont, Vereinigte Staaten) ist ein Mikrotiterplatten-Lesegerät, das unter anderem in der Lage ist, Extinktionen zu messen. Hierfür wird Licht einer bestimmten Wellenlänge durch eine Xenon-Blitzröhre und mit einem Monochromator erzeugt. Nachdem das Licht die Probe passiert hat, fällt es auf eine Photodiode. Anschließend werden die Daten mit der Software Gen5 (BioTek Instruments, Winooski, Vermont, Vereinigte Staaten) verarbeitet (Synergy HTX Operator's Manual, BioTek Instruments, Revision E, 2019).

Es gibt verschiedene Methoden, um einen Biegeversuch durchzuführen. Diese Methoden ergeben minimal unterschiedliche Biegefestigkeitswerte für dasselbe Material (Fischer et al., 2008; Jin et al., 2004). Aus diesem Grund können Biegefestigkeitswerte nur miteinander verglichen werden, wenn sie auch durch dasselbe Verfahren ermittelt wurden. Beim Dreipunkt-Biegeversuch wird ein balkenförmiger Prüfkörper auf zwei Auflagen gelegt und mit einem Stempel bis zum Bruch belastet. Der Dreipunkt-Biegeversuch hat jedoch den Nachteil, dass Materialfehler, welche gegenüber dem Stempel in der Zugzone liegen, zum frühzeitigen Versagen der Probe führen und somit eine breitere Streuung der Ergebnisse zu verzeichnen ist. Beim Vierpunkt-Biegeversuch wird dieser Nachteil umgangen, indem statt eines Stempels zwei Stempel die Kraft auf den balkenförmigen Prüfkörper übertragen. Durch die beiden Stempel wird das Volumen, in dem die Zugzone liegt, vergrößert. Trotzdem besteht sowohl beim Vierpunkt-Biegeversuch als auch beim Dreipunkt-Biegeversuch der Nachteil der Prüfkörpergeometrie. Bei balkenförmigen Prüfkörpern haben Kantendefekte einen großen Einfluss auf die Ergebnisse. Mit dem biaxialen Biegeversuch wird dieses Problem umgangen,

da hier die Spannungsspitzen im Zentrum und nicht an den Kanten liegen (Fischer, 2009). Für den biaxialen Biegeversuch wird ein runder Prüfkörper mit einem Radius von 8 mm hergestellt. Die Materialstärke soll  $1,2 \pm 0,2$  mm betragen. Der Prüfkörper wird auf drei Kugeln gelagert. Diese Kugeln haben einen Radius von 1,6 mm und sind auf einem Kreis mit 5 mm Radius gleichmäßig verteilt. Der Stempel, welcher die Kraft zentral auf den Prüfkörper überträgt, hat einen Radius von 0,6 – 0,8 mm (Fischer et al., 2008).

Die Rauheitsmessung kann taktil, elektronenmikroskopisch oder optisch durchgeführt werden. Bei der taktilen Messung wird die Oberfläche eindimensional mit Hilfe einer Diamantspitze abgetastet und die Daten mechanisch-elektrisch umgewandelt. Nachteilig ist hier, dass Hinterschneidungen nicht erfasst werden und es zu Flächenpressung kommt. Beim Rasterelektronenmikroskop wird unter Hochvakuum die Oberfläche mit einem rasterförmigen Elektronenstrahl abgefahren. Die rückgestreuten Elektronen steuern dann die Helligkeit einer Fernsehrohrleuchte. Durch Bildverarbeitung und Auswertung kann die Oberfläche numerisch klassifiziert werden. Bei dem optischen Verfahren wird eine LASER-Linie über die Oberfläche projiziert. Anhand der Auslenkung der LASER-Linie kann die Oberfläche vermessen und genormten Rauheitskenngrößen zugeordnet werden (Czichos et al., 2014).

### 3 Fragestellung

Durch das Verlangen nach ästhetischem Zahnersatz entwickelt die Industrie immer lichtdurchlässigere Zirkoniumdioxide. Jedoch ist gleichzeitig ein Rückgang der Biegefestigkeit zu verzeichnen. Durch multilayer Ronden soll eine stabile monolithische Konstruktion mit annehmbarer Ästhetik ermöglicht werden.

In der folgenden Arbeit wird der Zusammenhang zwischen Opazität und Biegefestigkeit von multilayer Zirkoniumdioxiden untersucht. Hierfür werden neun verschiedene multilayer Zirkoniumdioxide untersucht. Eine Lithiumdisilikatkeramik dient als Vergleichsmaterial, um die erhobenen Daten in ihrer Größenordnung einschätzen zu können. Die Schichtung der multilayer Ronden soll in ihrem vertikalen Verlauf untersucht werden.

Des Weiteren soll untersucht werden, ob zur Messung der optischen Eigenschaften ein Mikrotiterplatten-Lesegerät eingesetzt werden kann. Um sicherzustellen, dass alle Materialien ähnliche Rauheitswerte besitzen, wird eine Rauheitsmessung durchgeführt.

## 4 Material und Methoden

### 4.1 Material

Im Folgenden werden die verwendeten Messgeräte aufgeführt und kurz erläutert.

Die Rauheit wurde mit dem Profilometer Profilm 3D Optical Profiler (Filmetrics, San Diego, CA, USA) und der Software Profilm3D Version 2.3.8.3 von Filmetrics bestimmt. Die optische Rauheitsmessung hat den Vorteil einer berührungslosen und schnellen Messung. Von jedem Material wurden fünf Prüfkörper randomisiert ausgewählt und auf ihre Rauheit untersucht. Das Messgerät stand auf einer speziellen Platte, welche aktiv Schwingungen und Vibrationen der Umgebung dämpft (Abb. 2). Das Leibniz-Institut für Plasmaforschung und Technologie in Greifswald ermöglichte unentgeltlich die Rauheitsmessung.



*Abb. 2: Profilometer auf aktivem Schwingungsisolierungssystem*

Zur Messung der optischen Dichte wurde das Mikrotiterplatten-Lesegerät Synergy HTX (BioTek Instruments, Winooski, Vermont, Vereinigte Staaten; Abb. 4) und die Software Gen5 Version 3.08 von BioTek eingesetzt. Die Größe der Proben wurde so gewählt, dass die Prüfkörper in die 96-Well Mikrotiterplatten sortiert werden konnten. Diese Methode ermöglichte es, eine standardisierte und exakt wiederholbare Messung zu gewährleisten. Pro Material wurde je eine Mikrotiterplatte verwendet (Abb. 3). Zusätzlich befanden sich in den Mikrotiterplatten als Referenz jeweils die gleichen acht Prüfkörper, mit aufsteigender Schichtstärke (siehe Reihe 12 in Abb. 3).



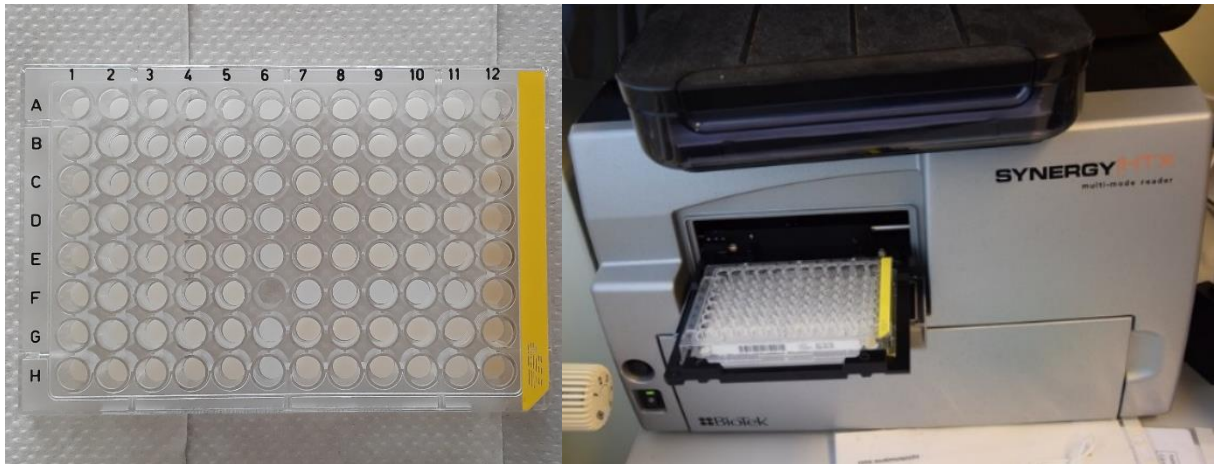


Abb. 3: 96-Well Mikrotiterplatte mit den Prüfkörpern eines Materials (links)

Abb. 4: Mikrotiterplatten-Lesegerät (rechts)

Mit Hilfe der Universalprüfmaschine Z050 (Zwick/Roell, Ulm, Deutschland) und der Software testXpert® III V1.2 von Zwick/Roell wurde der biaxiale Biegeversuch durchgeführt (Abb. 5). Die verwendeten Prüfkörper waren ungefähr halb so groß wie es in der ISO-Norm 6872 beschrieben wird. Aus diesem Grund musste ein spezielles Prüfwerkzeug entworfen werden. Hergestellt und gespendet wurde das Prüfwerkzeug von der Unternehmensgruppe OPTIMA packaging group aus Schwäbisch Hall.

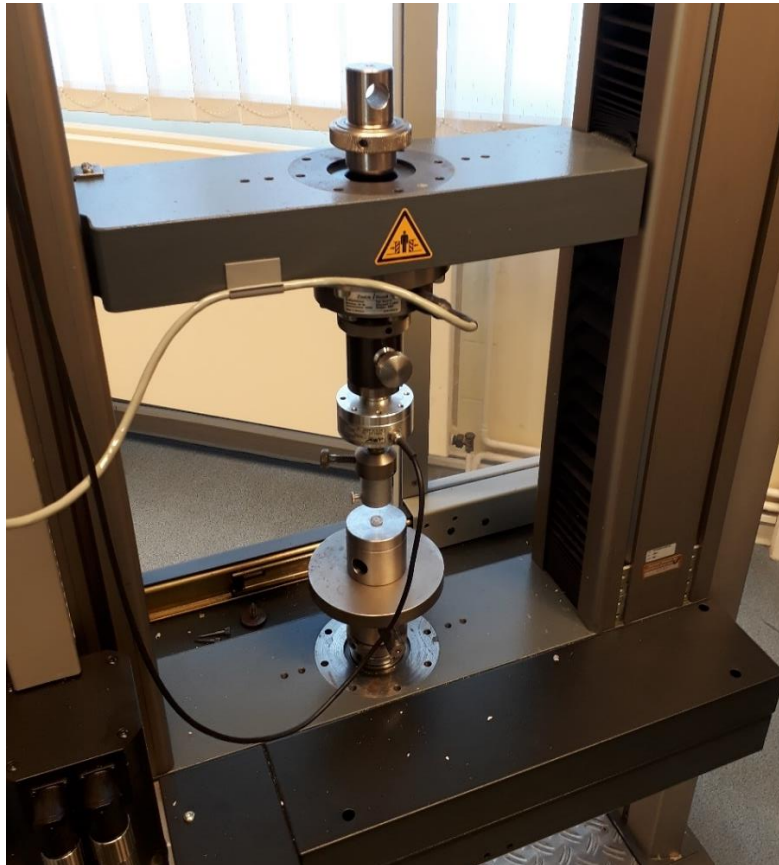


Abb. 5: Universalprüfmaschine mit eingespanntem Prüfwerkzeug

In Tabelle 1 sind die verwendeten Materialien für die Untersuchung aufgelistet. Alle Materialien wurden von den jeweiligen Herstellern bereitgestellt.

*Tabelle 1: Material, Hersteller und Rondenstärke in mm bzw. Block-Bezeichnung*

<b>Material</b>	<b>Hersteller</b>	<b>Stärke in mm</b>
Nacera Pearl Q <sup>3</sup> Multi-Shade	Doceram Medical Ceramics	20
KATANA™ Zirconia UTML	Kuraray Noritake Dental	18
KATANA™ Zirconia STML	Kuraray Noritake Dental	18
IPS e.max CAD LT	Ivoclar Vivadent	C16
IPS e.max ZirCAD Prime	Ivoclar Vivadent	20
Cercon® xt ML	Dentsply Sirona	18
Lava™ Esthetic Fluoreszierendes Vollzirkoniumoxid	3M	18
VITA YZ XT Multicolor	VITA Zahnfabrik	18
priti®multidisc ZrO <sub>2</sub> multicolor High Translucent	prிடidenta	18
priti®multidisc ZrO <sub>2</sub> multicolor Extra Translucent	prிடidenta	18

Das Material IPS e.max CAD LT dient hierbei als Vergleichsmaterial, welches sich im klinischen Alltag bewährt hat. Die Ronden werden in einer Höhe von 18 mm verwendet. Die Ronden von Nacera Pearl Q<sup>3</sup> Multi-Shade und IPS e.max ZirCAD Prime müssen in der Höhe von 20 mm untersucht werden. Die Materialien werden in der Farbe A3 untersucht. Die Ronde Nacera® Pearl Q3 Multi-Shade, die Ronde priti®multidisc ZrO<sub>2</sub> multicolor High Translucent und die Ronde priti®multidisc ZrO<sub>2</sub> multicolor Extra Translucent werden in einem Farbverlauf verwendet, welcher die Farbe A3 beinhaltet (Nacera A dark, priti A light). Bei dem Material IPS e.max CAD wird ein LT Block eingesetzt, da im klinischen Gebrauch dieser meist für Kronen und Brücken verwendet wird. Der IPS e.max CAD LT Block entspricht der Form C16.

#### **4.1.1 Probenumfang**

Pro Zirkoniumdioxid-Material wurden 75 Prüfkörper gefertigt. Von IPS e.max CAD LT waren nur 15 Proben erforderlich, da es keinen Schichtungsgradienten aufweist. Insgesamt mussten 690 Prüfkörper hergestellt werden. In Abb. 6 ist die Aufteilung der Prüfkörper schematisch dargestellt.

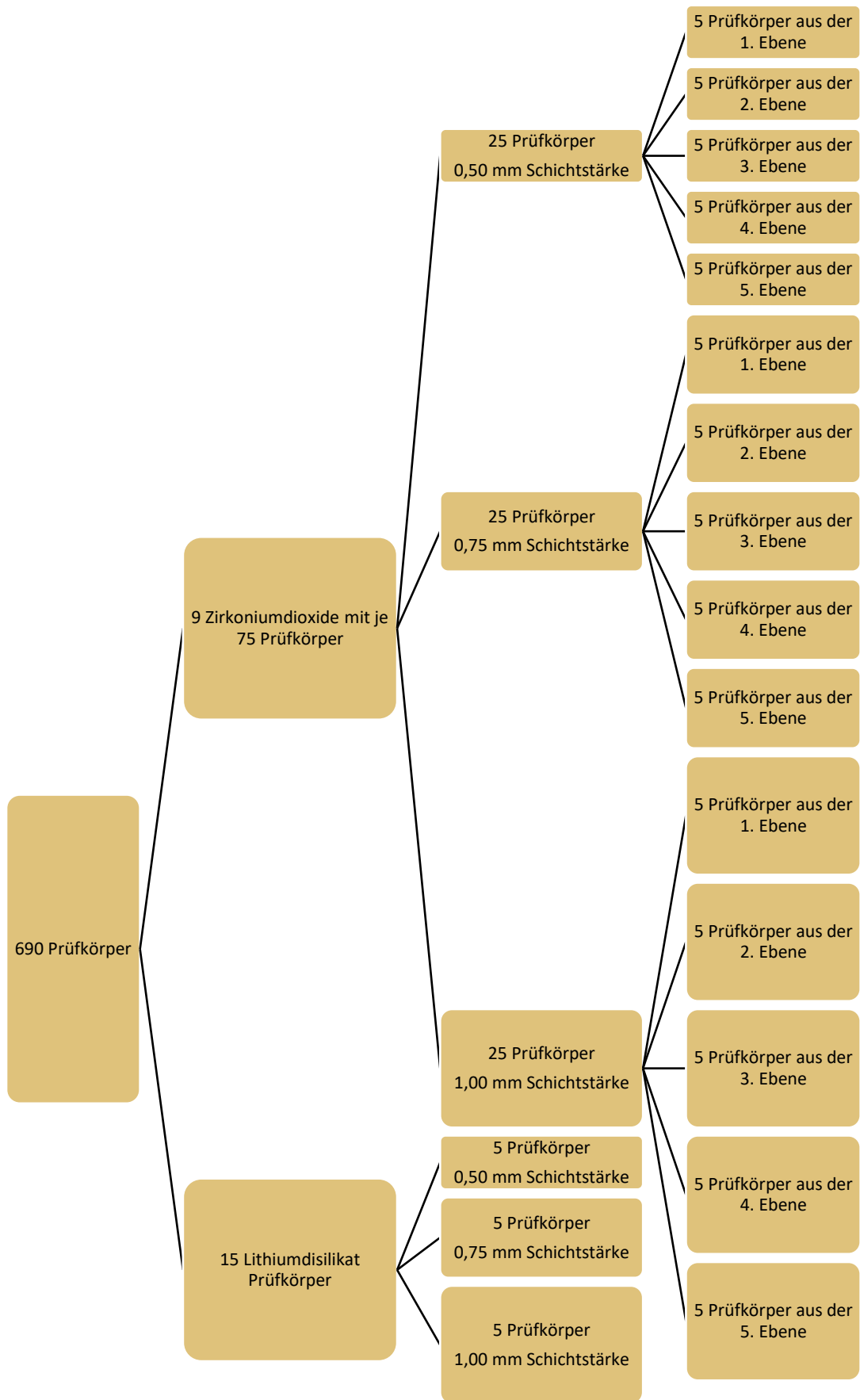


Abb. 6: Aufteilung der Prüfkörper

#### 4.1.2 Prüfkörperherstellung

Aus den jeweiligen Ronden wurden pro Material 15 zylinderförmige Prüfkörperrohlinge gefräst (inLab MC X5, Dentsply Sirona, York, Pennsylvania, USA). Bei der Platzierung der Objekte mit Hilfe der Software inLabCAM SW 19.1 von Sirona wurde darauf geachtet, dass die Prüfkörperrohlinge vertikal an der oberen Seite der Ronde positioniert wurden. Dies entsprach einem Abstand von 0,5 mm von der Oberfläche der Ronde. Pro Material wurden die 15 Prüfkörperrohlinge in drei Gruppen aufgeteilt. Die erste Gruppe aus 5 Prüfkörperrohlingen wurde in 0,5 mm starke Prüfkörper geschnitten, die zweite Gruppe in 0,75 mm starke Prüfkörper und die dritte Gruppe in 1 mm starke Prüfkörper. Da der Schichtungsgradient der Ronden untersucht werden sollte, wurden die Prüfkörperrohlinge immer nach demselben Schema wie in Abb. 7 dargestellt in fünf Ebenen eingeteilt. Zum Schneiden wurden die Rohlinge auf einer Technovit-Basis mit Hilfe einer Heißklebepistole befestigt und mit einem Sägemikrotom (SP1600, Leica, Wetzlar, Deutschland) geschnitten. Beim Schneidevorgang wurden nochmals 0,5 mm an der Oberkante entfernt, um eine homogene Oberfläche der Prüfkörper auf beiden Seiten gewährleisten zu können.

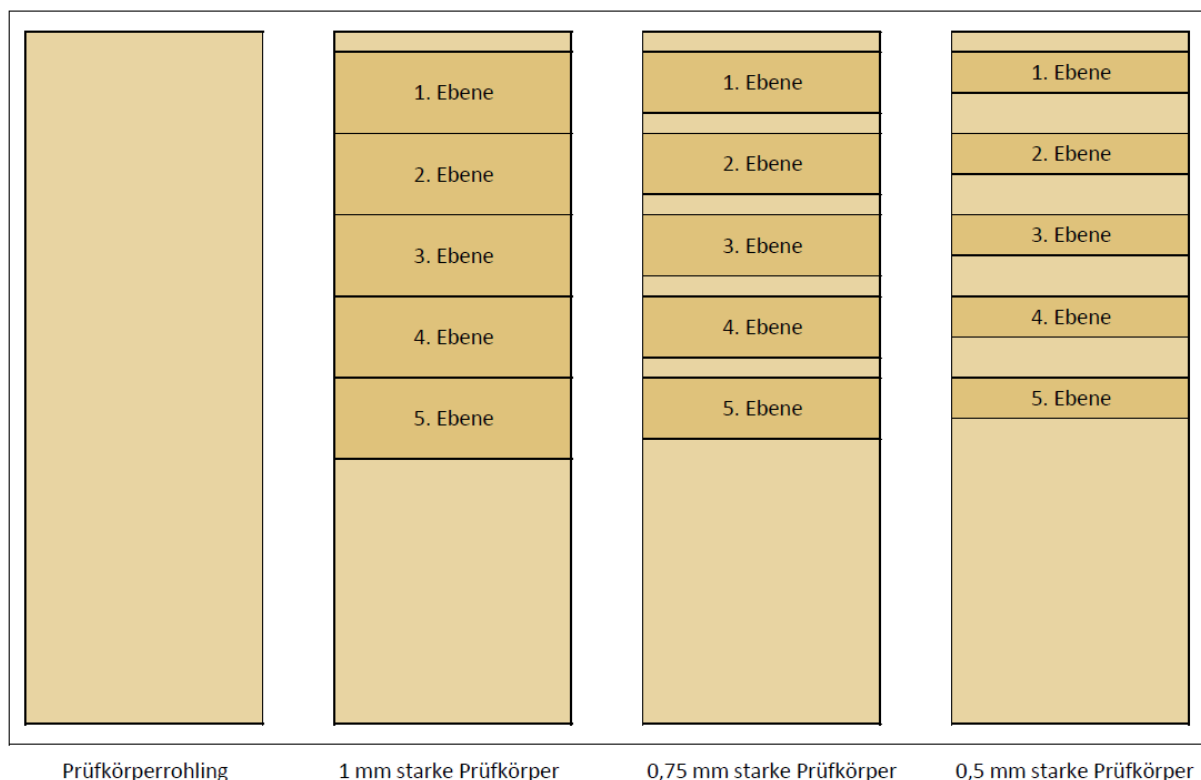


Abb. 7: Schematische Darstellung einer Ronde mit den Prüfkörperrohlingen und den darin enthaltenen Prüfkörpern von seitlicher Ansicht

Des Weiteren wurde darauf geachtet, dass die Prüfkörper mit ihrer oberen Fläche aus der gleichen Höhe jeder Ronde stammten. Um dies zu realisieren, wurden Schnitttabellen

angelegt, welche den jeweiligen Vergrößerungsfaktor der Ronde berücksichtigten. Abschließend wurden die Prüfkörper getrocknet und nach Herstellerangaben gesintert (inFire HTC speed, Dentsply Sirona, York, Pennsylvania, USA). Pro Sintervorgang wurde der Brennträger mit 45 Prüfkörpern bestückt (Abb. 8).

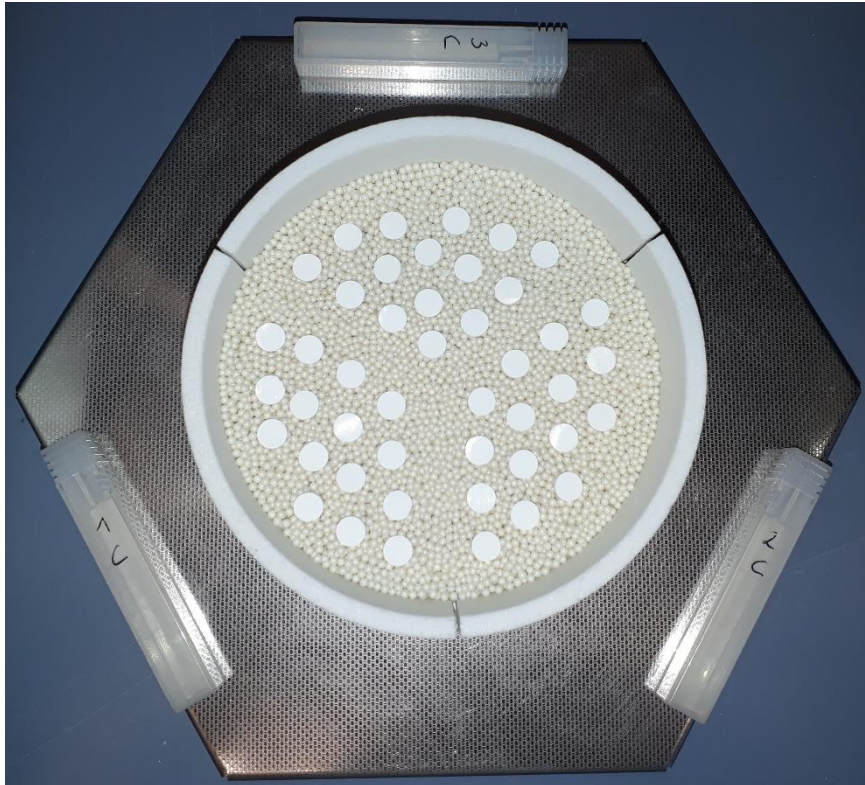


Abb. 8: Brennträger mit ungesinterten Prüfkörpern

## 4.2 Methoden

### 4.2.1 Rauheit

Für eine optische Messung der Rauheit ist es wichtig, dass die Oberfläche der Prüfkörper Licht reflektiert. Ein Vorversuch zeigte, dass die optische Messung verlässliche Werte liefert. Hierfür wurden die Ergebnisse des optischen Profilm 3D Optical Profiler (Filmetrics, San Diego, CA, USA) mit den Ergebnissen des mechanischen Dektak<sup>3</sup>ST (Bruker, Billerica, Massachusetts, USA) verglichen. Nach Sicherstellung der Verlässlichkeit des Profilm 3D Optical Profiler (Filmetrics, San Diego, CA, USA) wurden von jedem Material je 5 Stichproben auf ihre Rauheit untersucht. Zur Auswertung der Daten kam die Software Profilm3D Version 2.3.8.3 von Filmetrics zum Einsatz. Die Messebene wurde zunächst an drei Punkten eingeebnet und anschließend wurden Leerwerte ausgeglichen. Um die Oberfläche zu charakterisieren, wurde



die mittlere arithmetische Höhe ( $S_a$ ) nach DIN EN ISO 25178-1 gewählt (Deutsches Institut für Normung e. V. (Hrsg.), 2016).

#### 4.2.2 Optische Dichte

Bevor die Prüfkörper in die 96-Well Mikrotiterplatten sortiert wurden, wurden sie mit 2-Propanol gereinigt. Die optische Dichte der Prüfkörper wurde mit dem Mikrotiterplatten-Lesegerät Synergy HTX (BioTek Instruments, Winooski, Vermont, Vereinigte Staaten) bei 620 nm bestimmt. Die Daten wurden mit der Software Gen5 Version 3.08 von BioTek erhoben. Aus der optischen Dichte wurde die Opazität berechnet. Bei der angestrebten Prüfkörperdicke lieferte der Synergy THX im Vorversuch lineare Ergebnisse der optischen Dichte in Relation zur Prüfkörper-Schichtstärke.

Um die Reliabilität der Methode zu überprüfen, wurden die Messwerte der acht Referenz-Prüfkörper aus den zehn Mikrotiterplatten miteinander verglichen. Dabei ergab sich ein ICC(2,1) von 0,9995, was einen sehr guten Wert darstellt.

#### 4.2.3 Schichtstärke

Im Anschluss zu der optischen Dichte-Messung wurden die Prüfkörper auf ihre Schichtstärke vermessen. Hierzu wurde ein Probenhalter mit dem Programm FreeCAD Version 0.17 (Jürgen Riegel, Werner Mayer, Yorik van Havre, [www.freecadweb.org](http://www.freecadweb.org)) entworfen und mit Hilfe des SLA 3D-Druckers Form2 (Formlabs, Somerville, Massachusetts, USA) aus Standard-Resin „Clear“ hergestellt (Abb. 9).



Abb. 9: Probenhalter mit eingespannter Probe, welche markiert wurde, um sie um 90° drehen zu können.

Die erste Messstelle befand sich 1 mm vom Rand entfernt. Die zweite Messung wurde im Zentrum des Prüfkörpers durchgeführt. Als drittes wurde auf der gegenüberliegenden Seite 1 mm vom Rand entfernt gemessen. Zwei Markierungen auf dem Prüfkörper dienten als Anhaltspunkt, um ihn exakt um 90° drehen zu können. Die letzten beiden Messungen wurden wieder je 1 mm vom Rand entfernt durchgeführt. Zum Einsatz kam die Messuhr ST5-DI003 (SMILESTOOLS, Xuzhou, Jiangsu, China) mit einer Genauigkeit von 0,01 mm. Bei der Auswertung wurde der Mittelwert der fünf Messungen gebildet. Gleichzeitig konnte die Parallelität der Prüfkörper überprüft werden. Die ISO 6872 gibt eine Toleranz von 0,05 mm der Parallelität vor. Da die Prüfkörpergröße im Vergleich zur ISO 6872 halbiert wurde, musste auch darauf geachtet werden, dass die Toleranz den Wert von 0,025 mm nicht überschritt. Der Radius musste nicht mehr bearbeitet werden und entsprach der Toleranz der Fräsmaschine.

#### 4.2.4 Biaxialer Biegeversuch

Die biaxiale Biegefestigkeit wurde durch die Messung der Gesamtbruchlast  $F_{max}$  mit der Universalprüfmaschine Z050 (Zwick/Roell, Ulm, Deutschland) bestimmt. Die Daten wurden mit der Software testXpert® III V1.2 von Zwick/Roell aufgezeichnet. Da der Prüfkörperdurchmesser auf Grund der 96-Well Mikrotiterplatten auf 5,98 mm begrenzt war, wurde der Versuch in Anlehnung an die ISO 6872 durchgeführt. Hierfür wurde ein Prüfwerkzeug mit dem Programm FreeCAD Version 0.17 (Jürgen Riegel, Werner Mayer, Yorik van Havre, [www.freecadweb.org](http://www.freecadweb.org)) entworfen (Abb. 10).

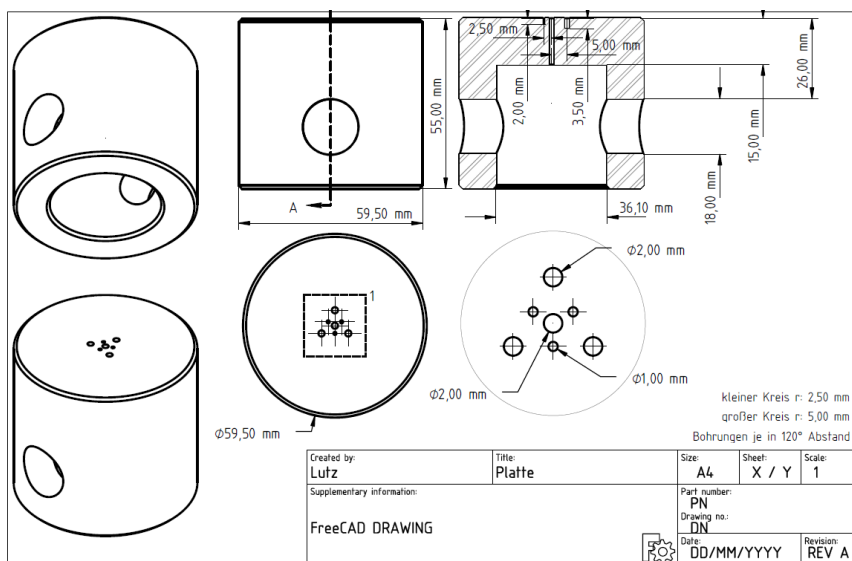


Abb. 10: Bauplan des Prüftisches, alle Angaben in mm, A: Schnittebene der Seitenaufsicht

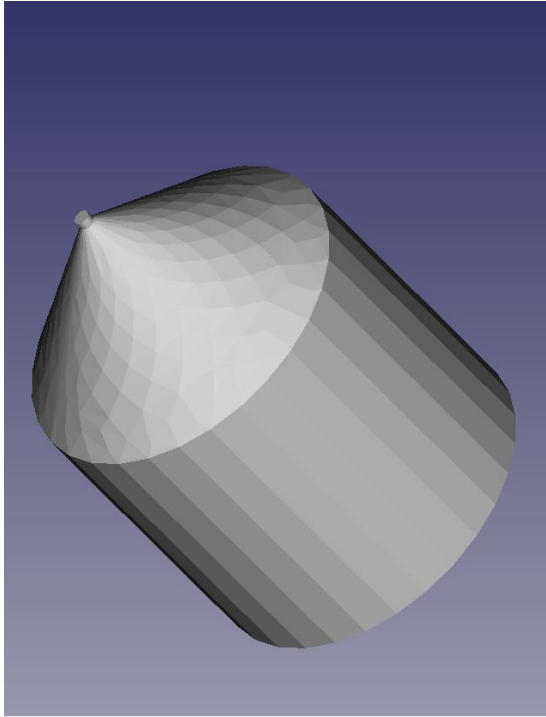


Abb. 11: 3D Modell des Stempels



Abb. 12: Prüftisch mit Zentrierring und Probe

Für den biaxialen Biegeversuch lagerten die Prüfkörper auf drei Metallkugeln mit einem Durchmesser von 5 mm. Die Kugeln wurden auf einem Kreis mit dem Durchmesser von 5 mm gleichmäßig angeordnet. Der Stempel hatte eine Auflagefläche von 0,8 mm Durchmesser (Abb. 11). Die Vorschubgeschwindigkeit betrug 1 mm/min. Die Positionierung der Prüfkörper erfolgte mit Hilfe eines Zentrierrings (Abb. 12). Dieser Zentrierring wurde zuvor mit der Software FreeCAD Version 0.17 (Jürgen Riegel, Werner Mayer, Yorik van Havre, [www.freecadweb.org](http://www.freecadweb.org)) entworfen und mit dem 3D-Drucker Form2 (Formlabs, Somerville, Massachusetts, USA) hergestellt.

#### 4.2.5 Statistische Auswertung

Die Auswertung der erhobenen Daten erfolgte mit der Software Palaeontological Statistics (PAST) 4.01 (Øyvind Hammer, Natural History Museum, University of Oslo) und Microsoft Excel 2016 für Windows (Microsoft Corp., Redmond, WA, USA). Zunächst wurde die Normalverteilung der Daten mit Hilfe des Kolmogorov-Smirnov-Tests bei  $\alpha=0,05$  überprüft. Es wurde kein Anzeichen gefunden, dass die Normalverteilungsannahme zu verwerfen ist. Im Anhang in der Tabelle 2 ist die maximale Abweichung der Teststatistik aufgeführt. Der kritische Wert für eine Stichprobengröße von 5 beträgt 0,5633. Es wurde die einfaktorielle Varianzanalyse (ANOVA) durchgeführt. Die Ergebnisse sind ebenfalls im Anhang in Tabelle 2



dargestellt. Für eine übersichtliche Darstellung der Daten kommen Box-Plot Diagramme zur Anwendung (Abb. 13).

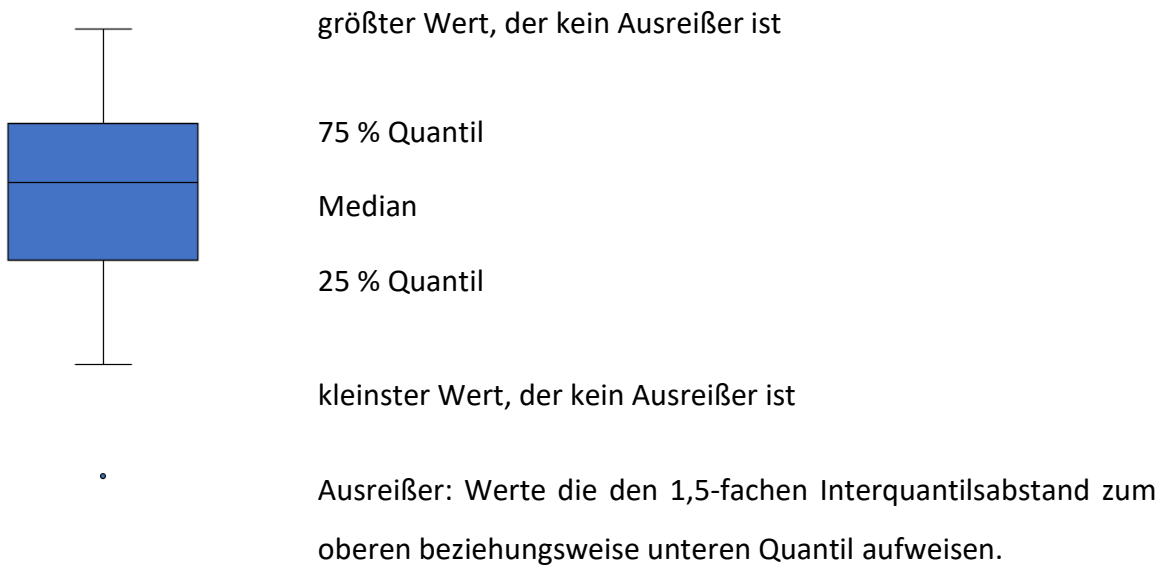


Abb. 13: Erklärung des Box-Plot Diagramms

## 5 Ergebnisse

Im Folgenden sind die Ergebnisse der Messungen der Opazität und der Biegefestigkeit dargestellt. Als erstes werden die Materialien ungeachtet der Ebenen untereinander verglichen. Im Anschluss wird für jeden Werkstoff getrennt der Einfluss der Ebene untersucht.

### 5.1 Ergebnisse Opazität

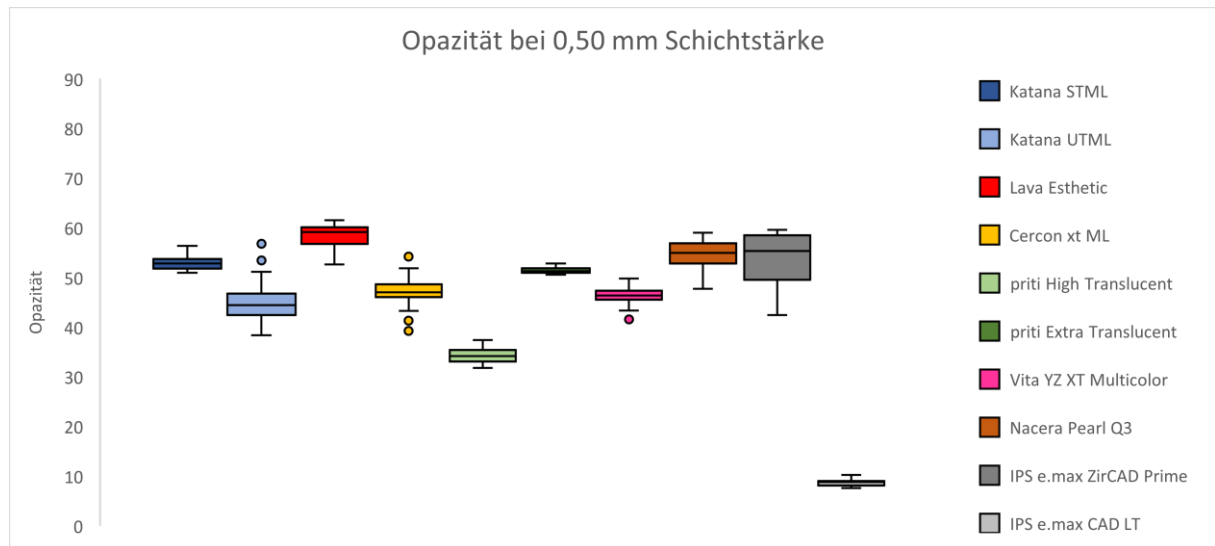


Abb. 14: Box-Plot-Diagramm der Opazität der Prüfkörper bei 0,50 mm Schichtstärke

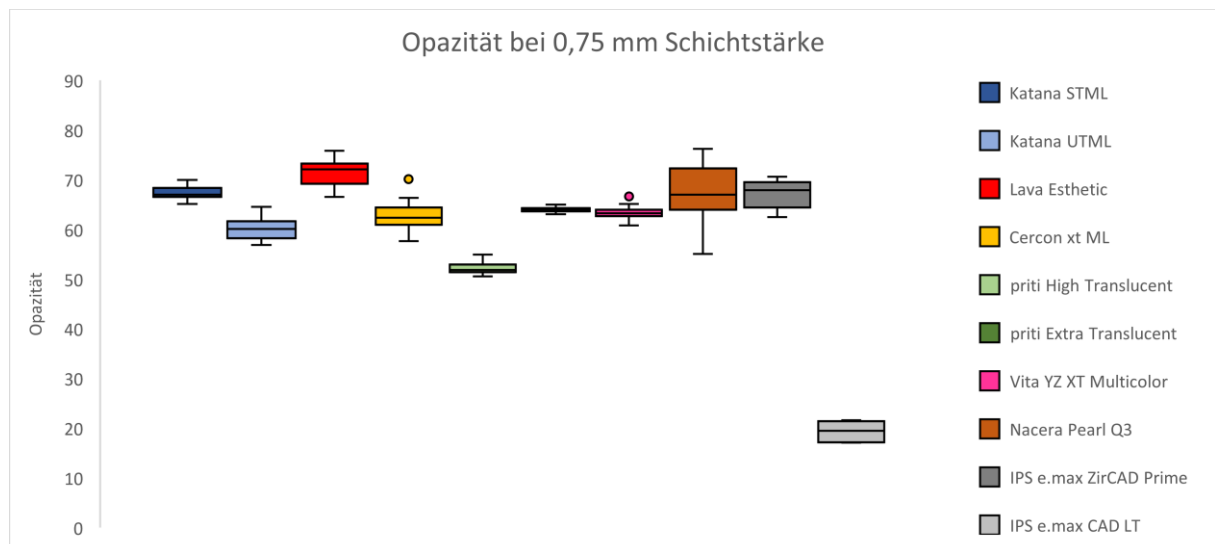


Abb. 15: Box-Plot-Diagramm der Opazität der Prüfkörper bei 0,75 mm Schichtstärke

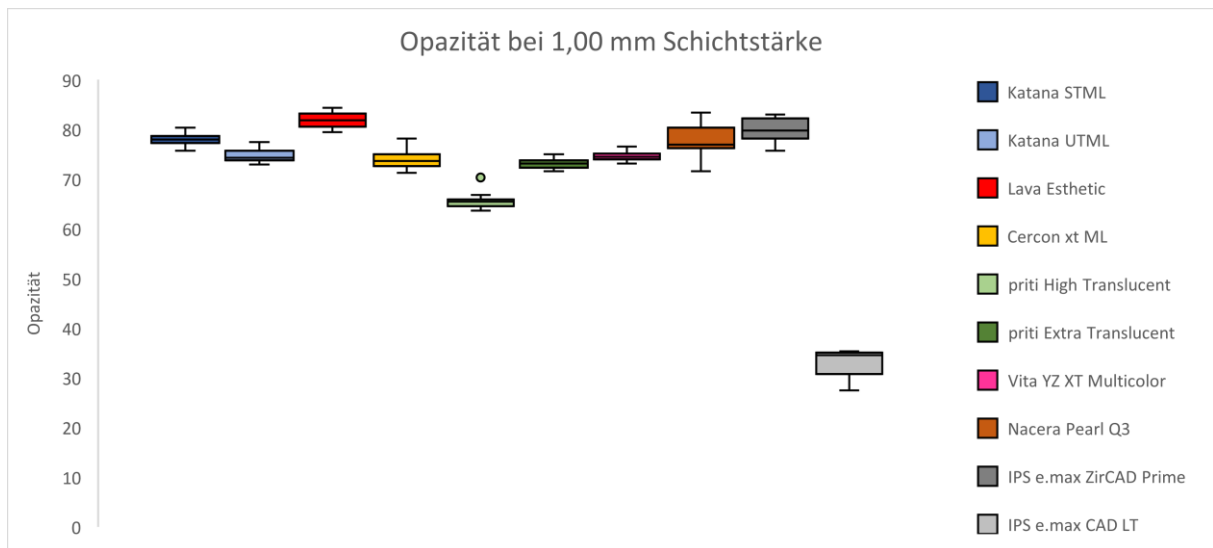


Abb. 16: Box-Plot-Diagramm der Opazität der Prüfkörper bei 1,00 mm Schichtstärke

Die Abb. 14, Abb. 15 und Abb. 16 zeigen die Opazitätswerte der einzelnen Materialien für die Schichtstärken von 0,50 mm, 0,75 mm und 1,00 mm. Die größten Mittelwerte der Opazität weist Lava Esthetic (59 für 0,50 mm, 72 für 0,75 mm und 82 für 1,00 mm) auf. Unter den Zirkoniumdioxiden weist priti High Translucent die niedrigsten Opazitätswerte mit 34 für 0,50 mm, 51 für 0,75 mm und 65 für 1,00 mm Schichtstärke auf. Jedoch sind die Mittelwerte der Opazität von IPS e.max CAD LT (9 für 0,50 mm, 19 für 0,75 mm und 33 für 1,00 mm) deutlich geringer als bei den Zirkoniumdioxiden.

In den drei dargestellten Box-Plot-Diagrammen der Opazität (Abb. 14, Abb. 15 und Abb. 16) ist zu erkennen, dass die Unterschiede in der Opazität bei einer Schichtstärke von 0,50 mm deutlicher zum Ausdruck kommen. Dies ist mit den niedrigeren absoluten Werten der Opazität zu erklären.

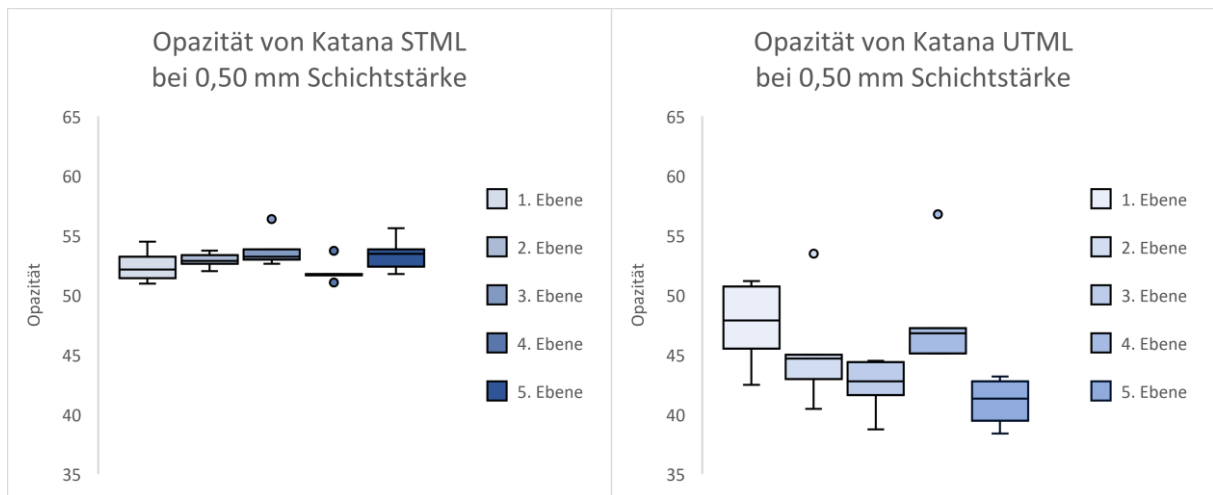


Abb. 17: Box-Plot-Diagramm der Opazität von Katana STML bei 0,50 mm Schichtstärke (links)

Abb. 18: Box-Plot-Diagramm der Opazität von Katana UTML bei 0,50 mm Schichtstärke (rechts)

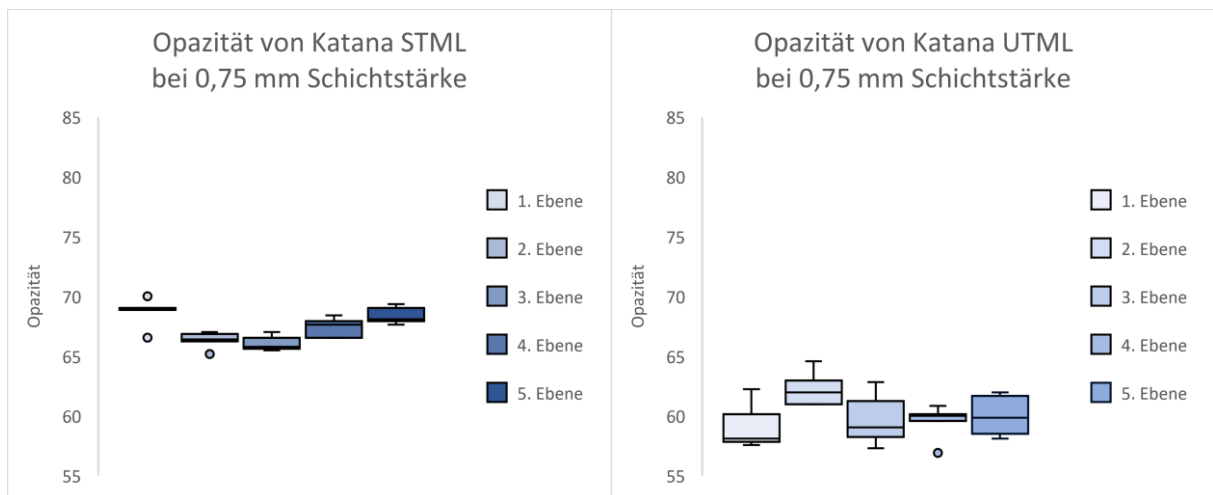


Abb. 19: Box-Plot-Diagramm der Opazität von Katana STML bei 0,75 mm Schichtstärke (links)

Abb. 20: Box-Plot-Diagramm der Opazität von Katana UTML bei 0,75 mm Schichtstärke (rechts)

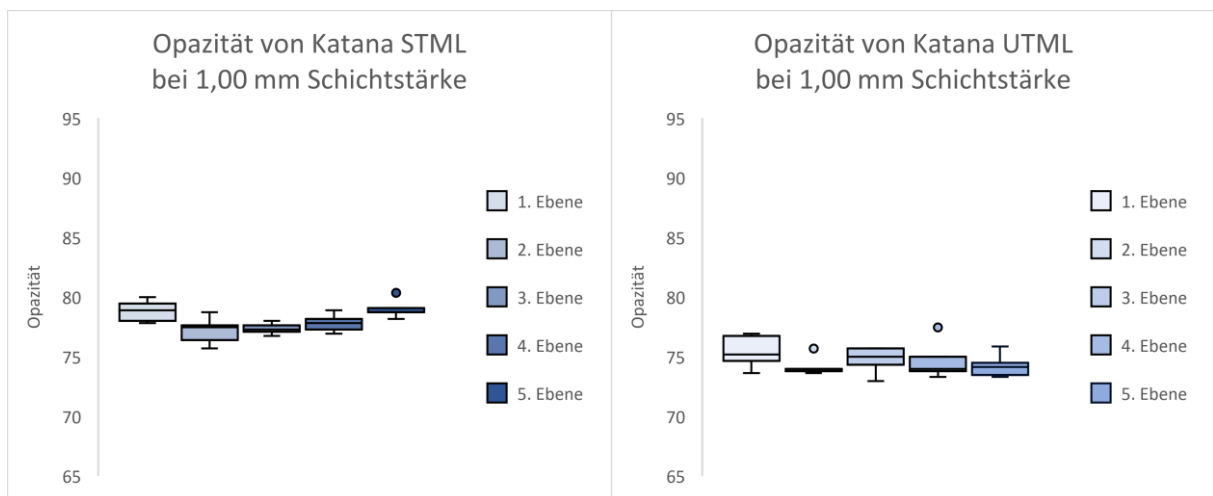


Abb. 21: Box-Plot-Diagramm der Opazität von Katana STML bei 1,00 mm Schichtstärke (links)

Abb. 22: Box-Plot-Diagramm der Opazität von Katana UTML bei 1,00 mm Schichtstärke (rechts)

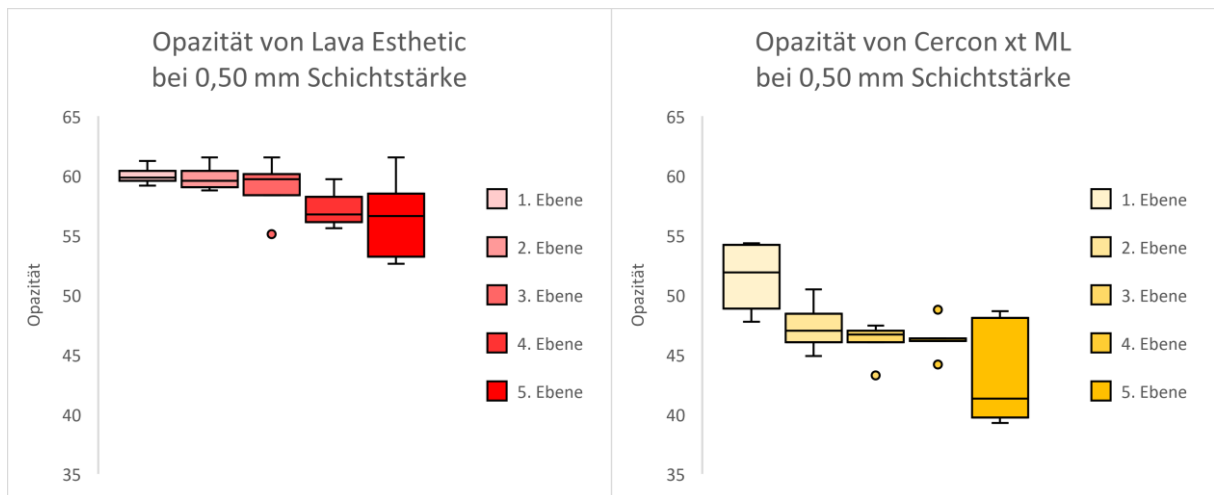


Abb. 23: Box-Plot-Diagramm der Opazität von Lava Esthetic bei 0,50 mm Schichtstärke (links)

Abb. 24: Box-Plot-Diagramm der Opazität von Cercon xt ML bei 0,50 mm Schichtstärke (rechts)

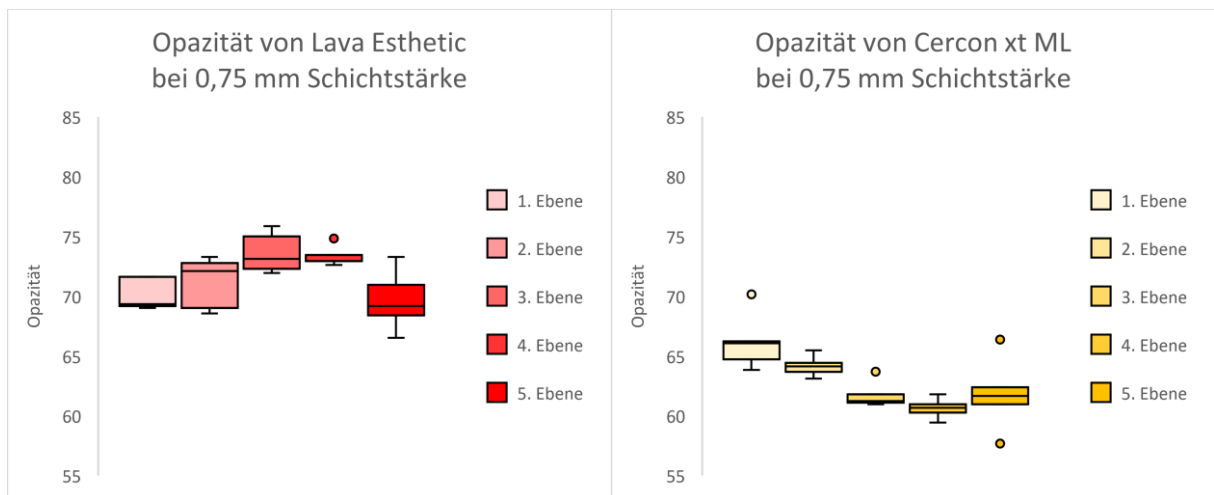


Abb. 25: Box-Plot-Diagramm der Opazität von Lava Esthetic bei 0,75 mm Schichtstärke (links)

Abb. 26: Box-Plot-Diagramm der Opazität von Cercon xt ML bei 0,75 mm Schichtstärke (rechts)

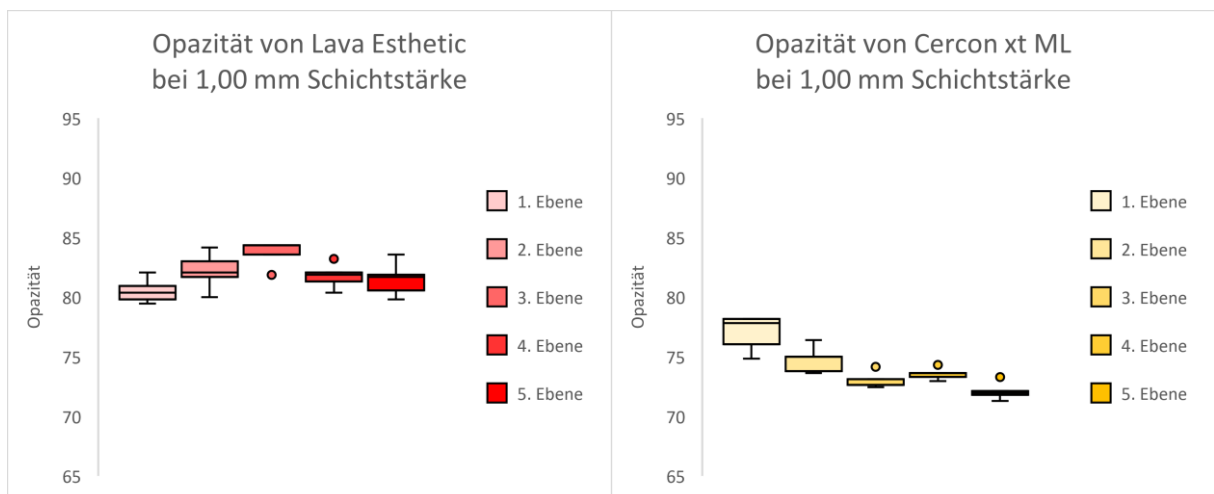


Abb. 27: Box-Plot-Diagramm der Opazität von Lava Esthetic bei 1,00 mm Schichtstärke (links)

Abb. 28: Box-Plot-Diagramm der Opazität von Cercon xt ML bei 1,00 mm Schichtstärke (rechts)

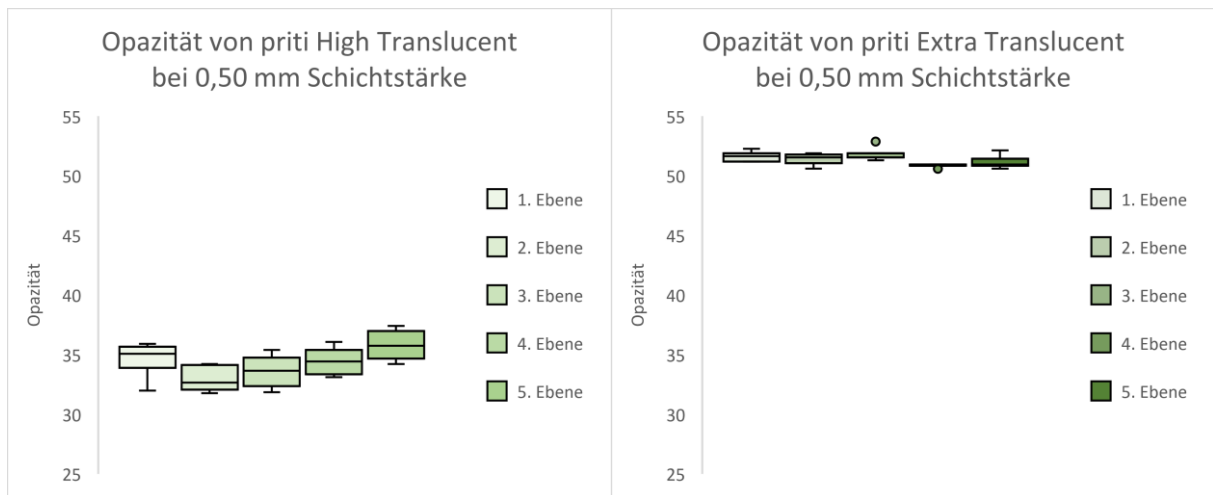


Abb. 29: Box-Plot-Diagramm der Opazität von priti High Translucent bei 0,50 mm Schichtstärke (links)

Abb. 30: Box-Plot-Diagramm der Opazität von priti Extra Translucent bei 0,50 mm Schichtstärke (rechts)

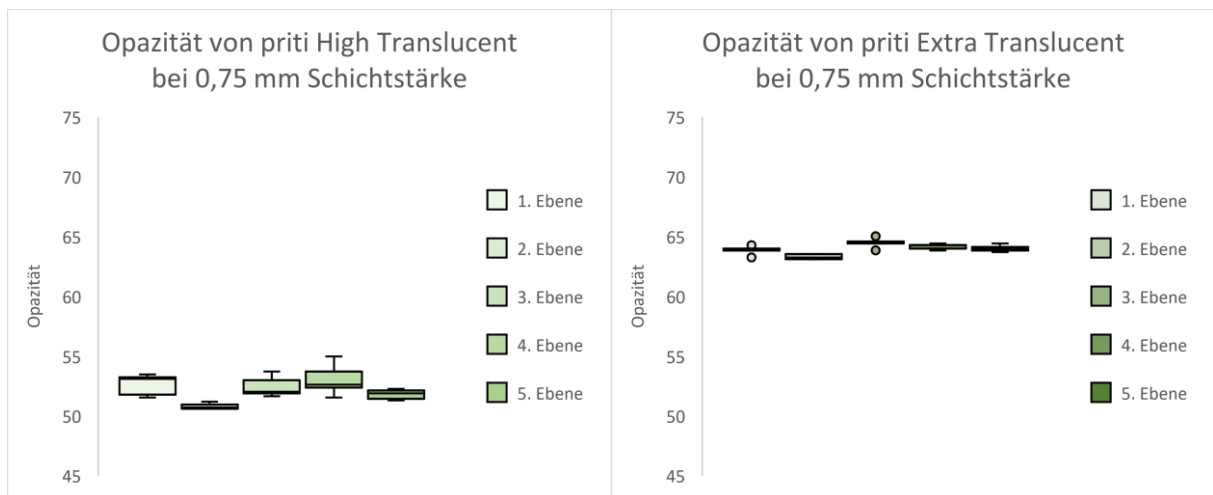


Abb. 31: Box-Plot-Diagramm der Opazität von priti High Translucent bei 0,75 mm Schichtstärke (links)

Abb. 32: Box-Plot-Diagramm der Opazität von priti Extra Translucent bei 0,75 mm Schichtstärke (rechts)

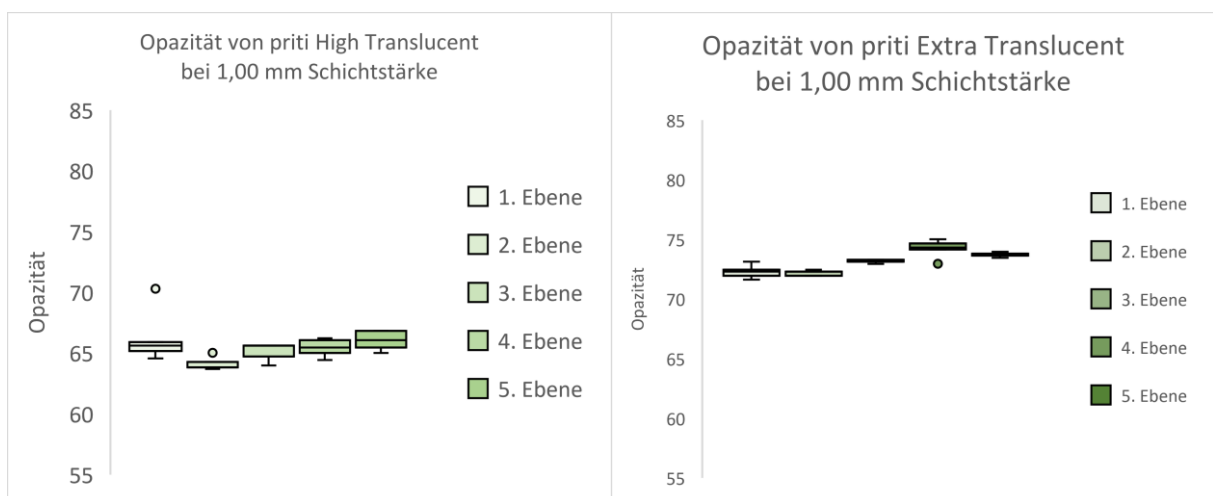


Abb. 33: Box-Plot-Diagramm der Opazität von priti High Translucent bei 1,00 mm Schichtstärke (links)

Abb. 34: Box-Plot-Diagramm der Opazität von priti Extra Translucent bei 1,00 mm Schichtstärke (rechts)

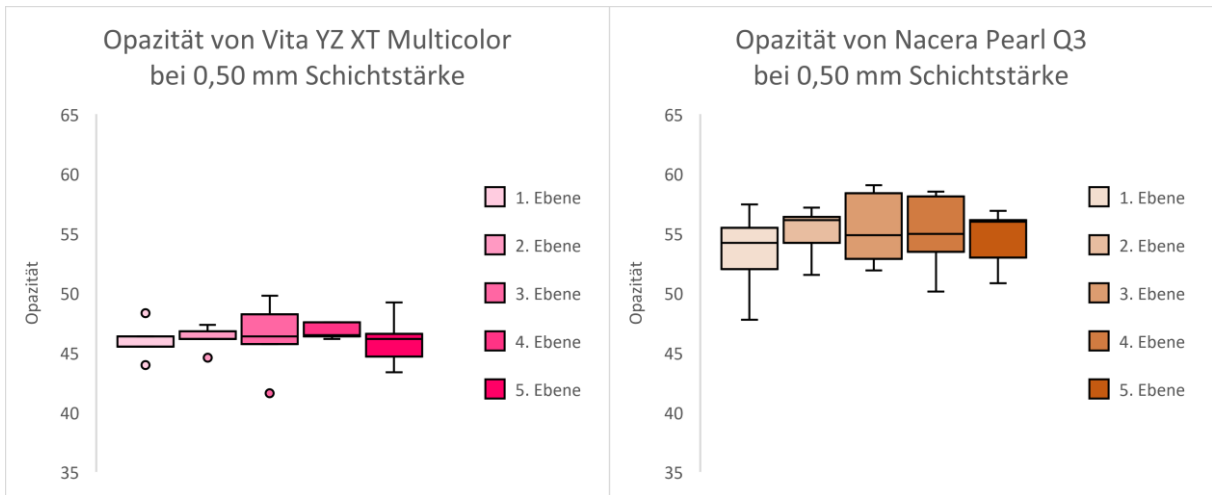


Abb. 35: Box-Plot-Diagramm der Opazität von Vita YZ XT Multicolor bei 0,50 mm Schichtstärke (links)

Abb. 36: Box-Plot-Diagramm der Opazität von Nacera Pearl Q3 bei 0,50 mm Schichtstärke (rechts)

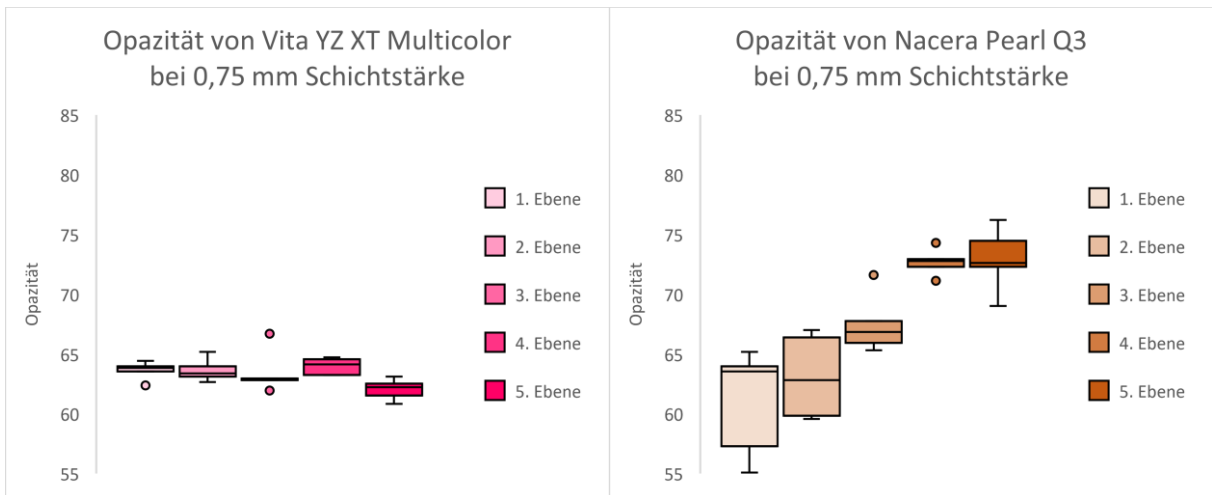


Abb. 37: Box-Plot-Diagramm der Opazität von Vita YZ XT Multicolor bei 0,75 mm Schichtstärke (links)

Abb. 38: Box-Plot-Diagramm der Opazität von Nacera Pearl Q3 bei 0,75 mm Schichtstärke (rechts)

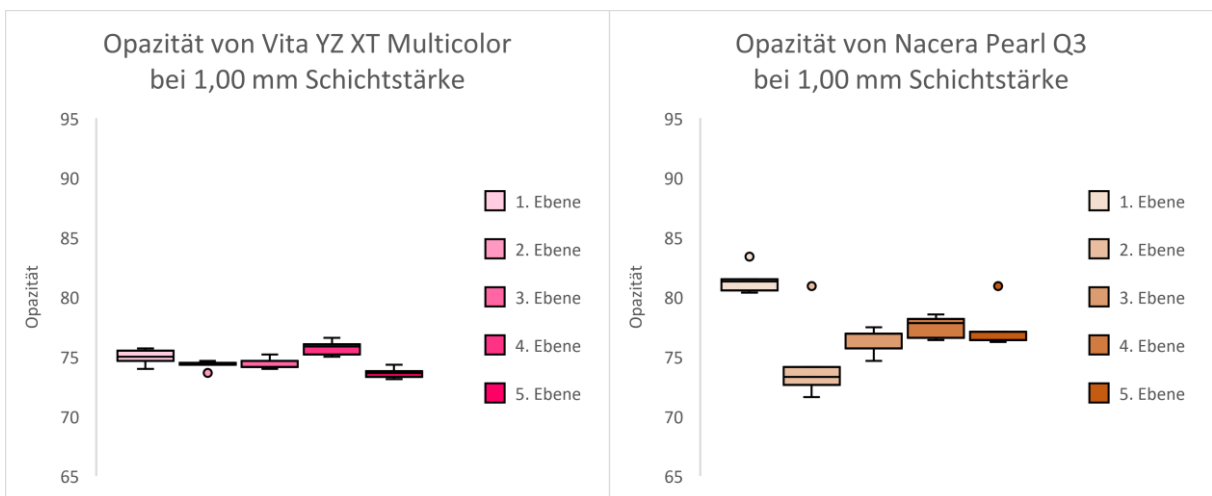


Abb. 39: Box-Plot-Diagramm der Opazität von Vita YZ XT Multicolor bei 1,00 mm Schichtstärke (links)

Abb. 40: Box-Plot-Diagramm der Opazität von Nacera Pearl Q3 bei 1,00 mm Schichtstärke (rechts)

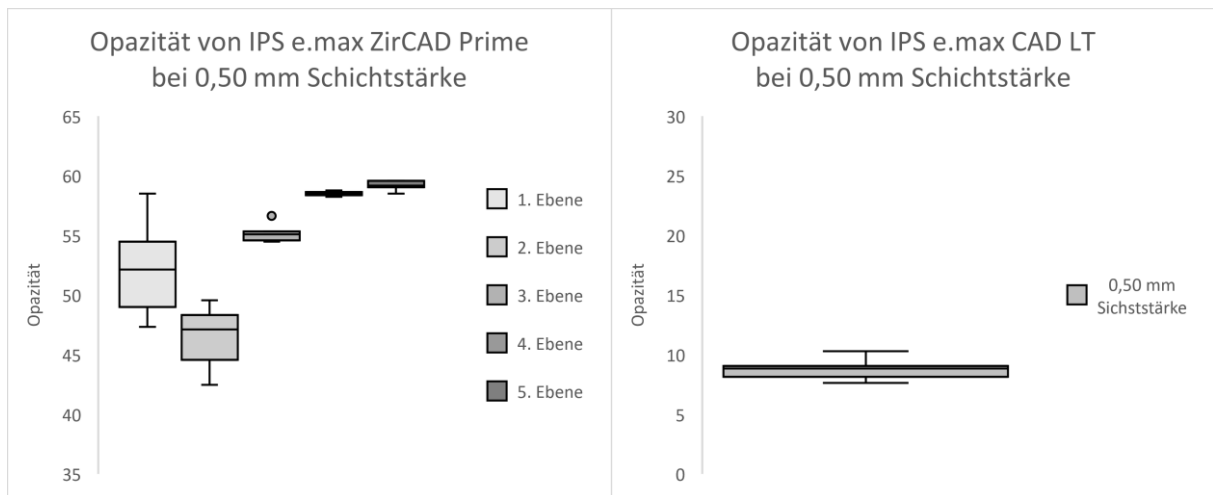


Abb. 41: Box-Plot-Diagramm der Opazität von IPS e.max ZirCAD Prime bei 0,50 mm Schichtstärke (links)

Abb. 42: Box-Plot-Diagramm der Opazität von IPS e.max CAD LT bei 0,50 mm Schichtstärke (rechts)

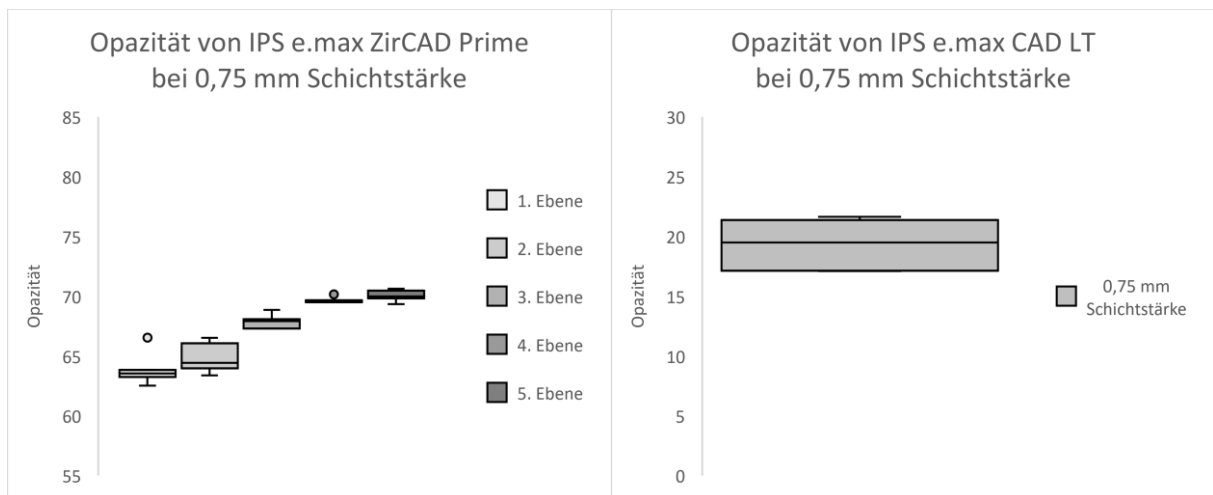


Abb. 43: Box-Plot-Diagramm der Opazität von IPS e.max ZirCAD Prime bei 0,75 mm Schichtstärke (links)

Abb. 44: Box-Plot-Diagramm der Opazität von IPS e.max CAD LT bei 0,75 mm Schichtstärke (rechts)

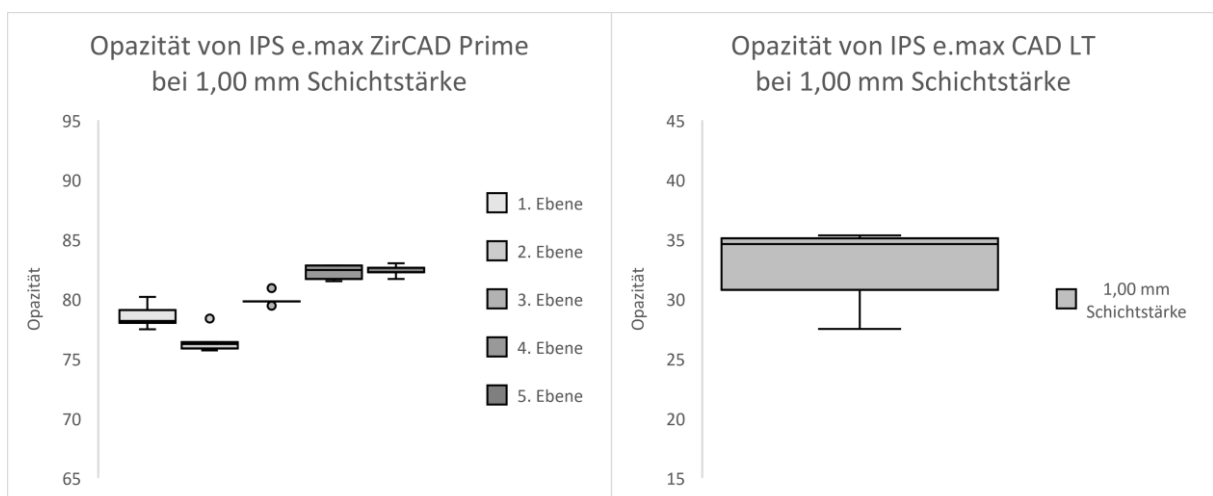


Abb. 45: Box-Plot-Diagramm der Opazität von IPS e.max ZirCAD Prime bei 1,00 mm Schichtstärke (links)

Abb. 46: Box-Plot-Diagramm der Opazität von IPS e.max CAD LT bei 1,00 mm Schichtstärke (rechts)



Innerhalb der Materialgruppe in Bezug auf die Ebenen gibt es bei Katana STML (Abb. 17, Abb. 19, Abb. 21), Katana UTML (Abb. 18, Abb. 20, Abb. 22), Lava Esthetic (Abb. 23, Abb. 25, Abb. 27) und Vita YZ XT Multicolor (Abb. 35, Abb. 37, Abb. 39) keinen Hinweis, dass bei einer tieferen Ebene die Opazität zunimmt. Bei priti High Translucent in der Schichtstärke 0,50 mm (Abb. 29,  $p = 0,046$ ) und priti Extra Translucent in der Schichtstärke 1,00 mm (Abb. 34,  $p < 0,001$ ) lässt sich eine Tendenz erkennen, welche auch statistisch signifikant ist, dass je tiefer die Ebene gewählt wird, die Opazität zunimmt. Jedoch kann diese Beobachtung bei den anderen Schichtstärken der beiden Materialien nicht bestätigt werden (Abb. 30, Abb. 31, Abb. 32, Abb. 33). Bei dem Material Nacera Pearl Q3 in der Schichtstärke 0,50 mm (Abb. 36) kann keine Abhängigkeit der Opazität zur Ebene erkannt werden. Dagegen weist Nacera Pearl Q3 in der Schichtstärke 0,75 mm (Abb. 38,  $p < 0,001$ ) eine deutliche Opazitätssteigerung im Vergleich der Ebenen auf, welche nach unten zunimmt. In der Schichtstärke 1,00 mm (Abb. 40) reißt jedoch der Opazitätswert der ersten Ebene aus dem Schema aus und weist einen höheren Opazitätswert als erwartet auf. IPS e.max ZirCAD Prime (Abb. 41, Abb. 43, Abb. 45) weist ebenfalls eine Opazitätssteigerung im Verlauf der Ebenen auf. Diese Änderung ist hier in allen drei Schichtstärken statistisch signifikant mit einem p-Wert kleiner 0,001. Statistisch zeigt Cercon xt ML in allen Schichtstärken einen signifikanten Unterschied. Der p-Wert für die dünnste Schicht liegt bei 0,005, für die 0,75 mm starken Prüfkörper bei 0,001 und für die stärksten Prüfkörper ist p kleiner als 0,001. Jedoch ist bei Cercon xt ML (Abb. 24, Abb. 26, Abb. 28) eine Abnahme der Opazität im Verlauf der Ebenen zu erkennen. Bei IPS e.max CAD LT (Abb. 42, Abb. 44, Abb. 46) erübrigt sich die Betrachtung der einzelnen Ebenen, da es keinen Schichtungsgradienten aufweist und somit homogen geschichtet ist.

Bei der Auswertung der Opazitätswerte von pridentata (priti Extra Translucent und priti High Translucent) ist zu beachten, dass die Ronden in ihrem Farbverlauf die Farben A1 bis A3 beinhalten. In den ausgewählten Ebenen ist somit eine hellere Farbe vertreten. Wenn man aber nun die Opazitätswerte der Produkte von pridentata im Verhältnis zu ihren Ebenen betrachtet (Abb. 29, Abb. 30, Abb. 31, Abb. 32, Abb. 33 und Abb. 34) fällt auf, dass die Opazitätswerte zwischen den Ebenen nicht so stark variieren. Die geringere Opazität kann also nicht allein mit dem Farbverlauf von A1 bis A3 erklärt werden.

IPS e.max ZirCAD Prime weist einen Verlauf der Opazität auf (Abb. 43 und Abb. 45). Bei Nacera Pearl Q3 kann ebenfalls ein Verlauf bei der Schichtstärke von 0,75 mm erkannt werden (Abb.

41). Bei den anderen Zirkoniumdioxiden kann davon ausgegangen werden, dass kein Verlauf der Opazität in den Ronden vorhanden ist.

## 5.2 Ergebnisse Biegefestigkeit

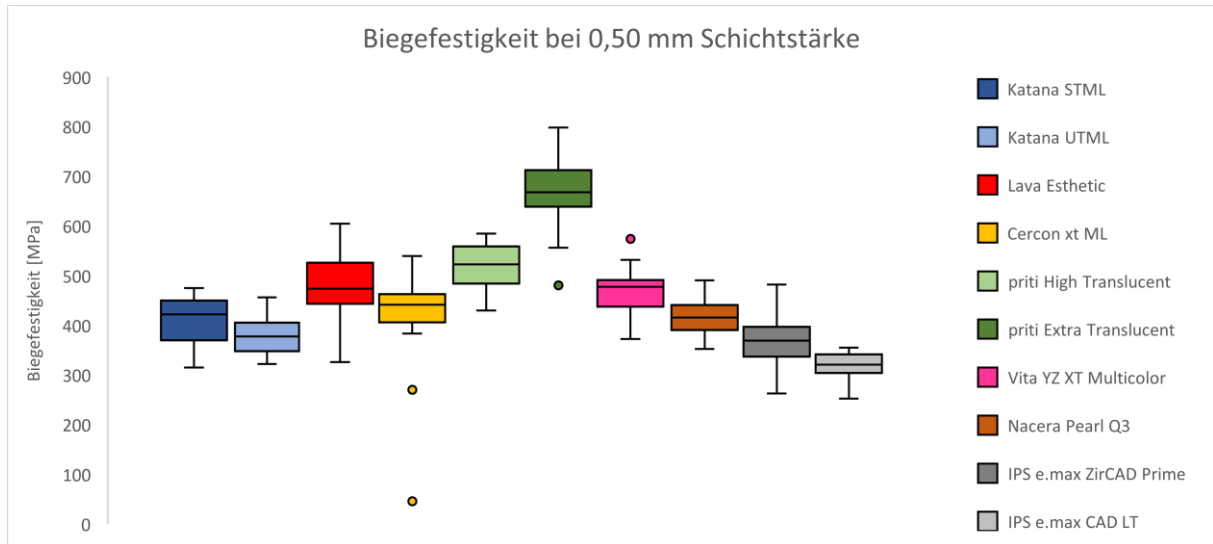


Abb. 47: Box-Plot-Diagramm der Biegefestigkeit [MPa] der Prüfkörper bei 0,50 mm Schichtstärke

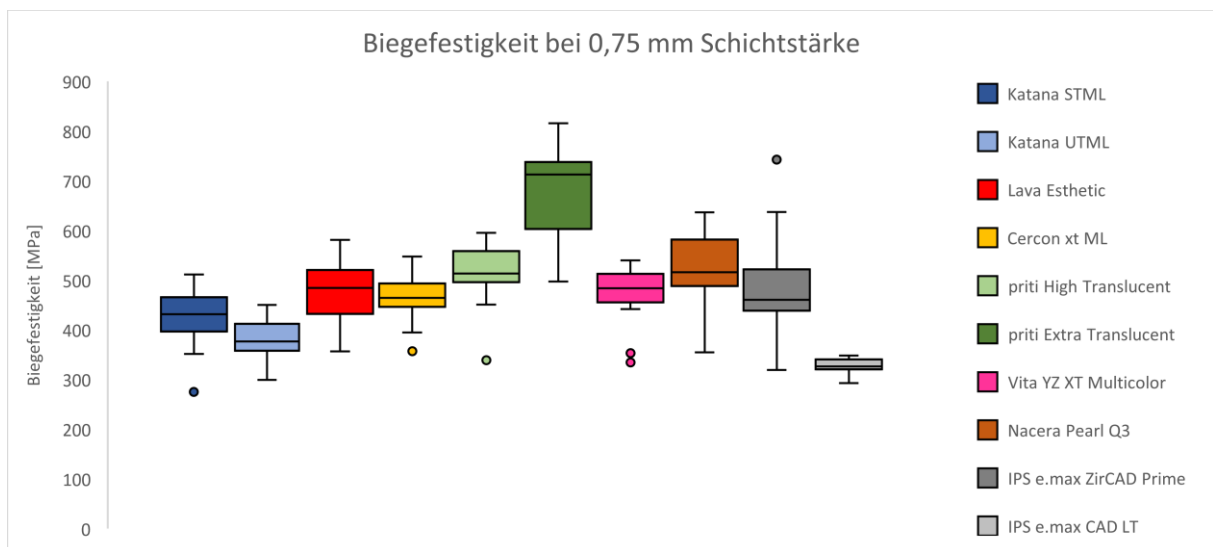


Abb. 48: Box-Plot-Diagramm der Biegefestigkeit [MPa] der Prüfkörper bei 0,75 mm Schichtstärke

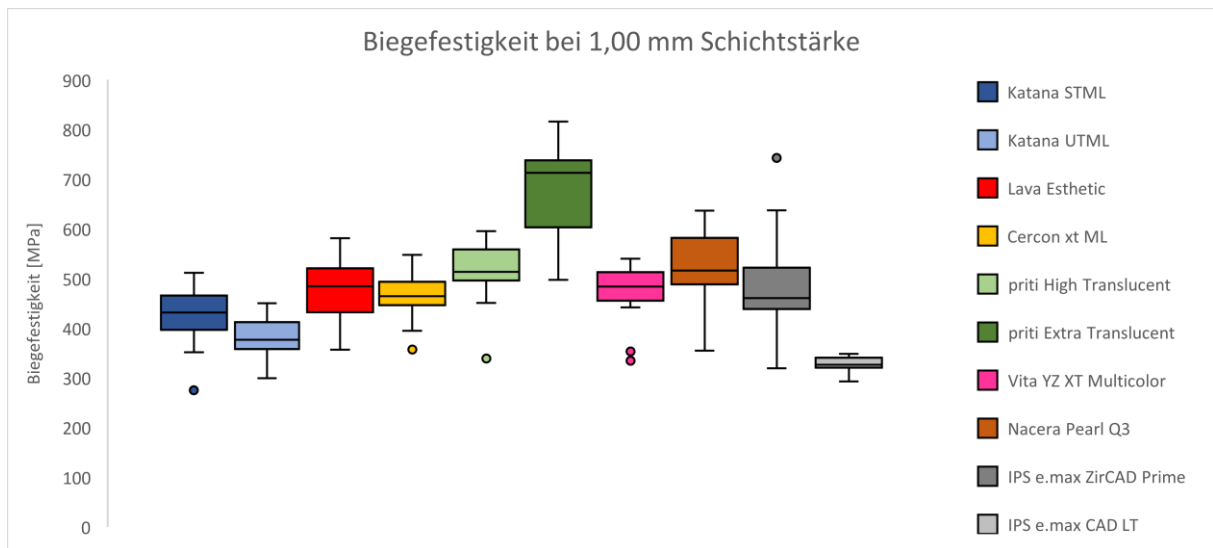


Abb. 49: Box-Plot-Diagramm der Biegefestigkeit [MPa] der Prüfkörper bei 1,00 mm Schichtstärke

Die Abb. 47, Abb. 48 und Abb. 49 zeigen die Biegefestigkeitswerte der einzelnen Materialien für die Schichtstärken von 0,50 mm, 0,75 mm und 1,00 mm. Das Zirkoniumdioxid priti Extra Translucent weist die höchste Biegefestigkeit bei allen drei Schichtstärken auf. Die Mittelwerte liegen bei 666 MPa für 0,50 mm, 671 MPa für 0,75 mm und 715 MPa für 1,00 mm Schichtstärke. Die niedrigste Biegefestigkeit der Zirkoniumdioxide hat Katana UTML (379 MPa für 0,50 mm, 381 MPa für 0,75 mm und 410 MPa für 1,00 mm). IPS e.max CAD LT weist insgesamt die niedrigste Biegefestigkeit (315 MPa für 0,50 mm, 326 MPa für 0,75 mm und 359 MPa für 1,00 mm) auf.

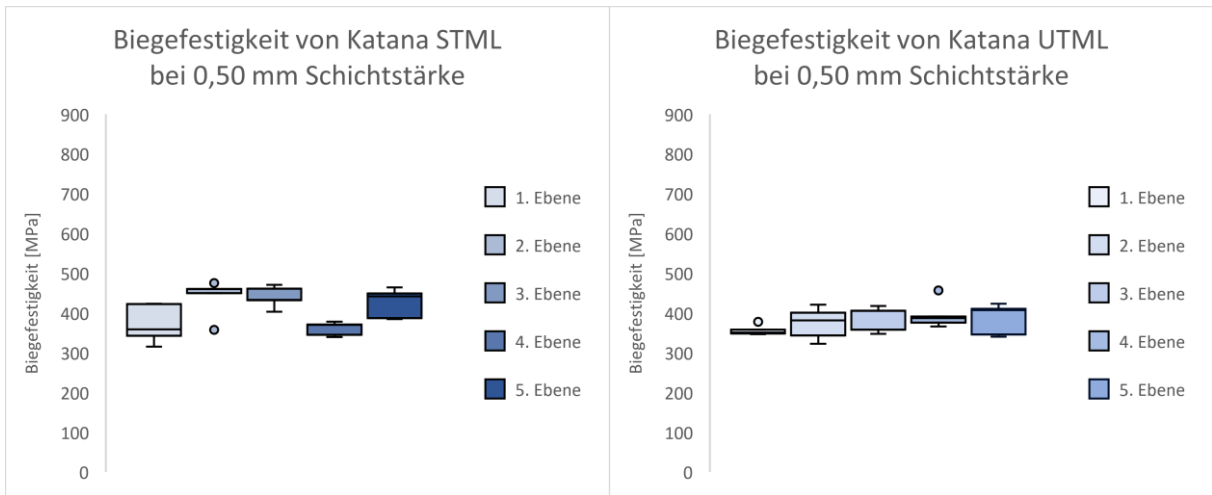


Abb. 50: Box-Plot-Diagramm der Biegefestigkeit [MPa] von Katana STML bei 0,50 mm Schichtstärke (links)

Abb. 51: Box-Plot-Diagramm der Biegefestigkeit [MPa] von Katana UTML bei 0,50 mm Schichtstärke (rechts)

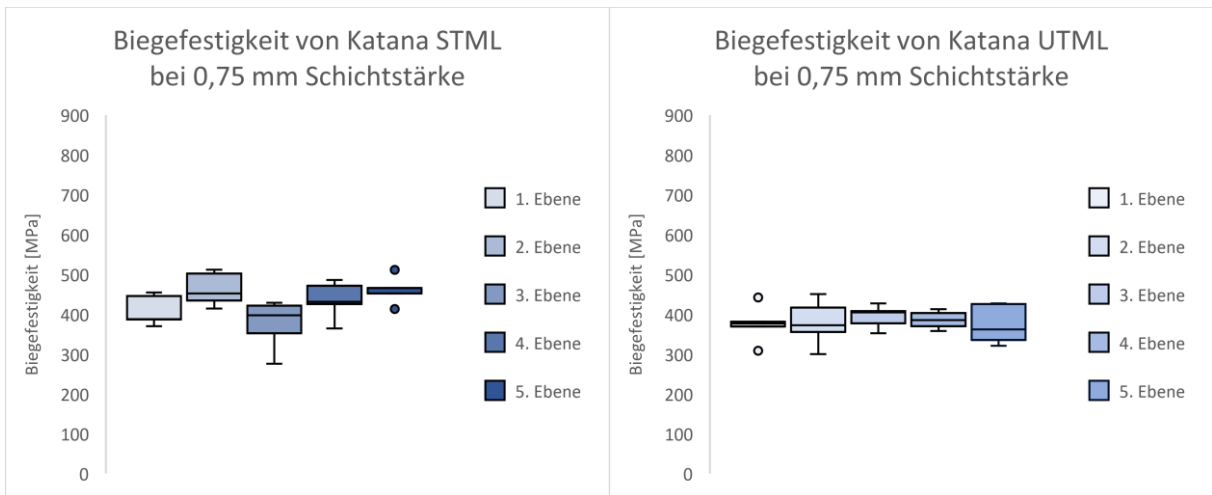


Abb. 52: Box-Plot-Diagramm der Biegefestigkeit [MPa] von Katana STML bei 0,75 mm Schichtstärke (links)

Abb. 53: Box-Plot-Diagramm der Biegefestigkeit [MPa] von Katana UTML bei 0,75 mm Schichtstärke (rechts)

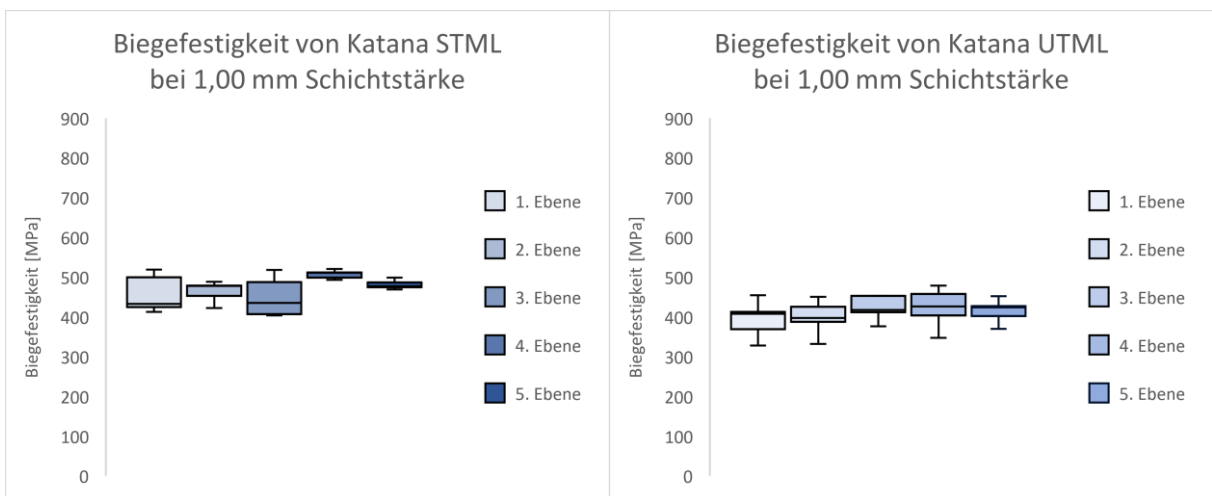


Abb. 54: Box-Plot-Diagramm der Biegefestigkeit [MPa] von Katana STML bei 1,00 mm Schichtstärke (links)

Abb. 55: Box-Plot-Diagramm der Biegefestigkeit [MPa] von Katana UTML bei 1,00 mm Schichtstärke (rechts)

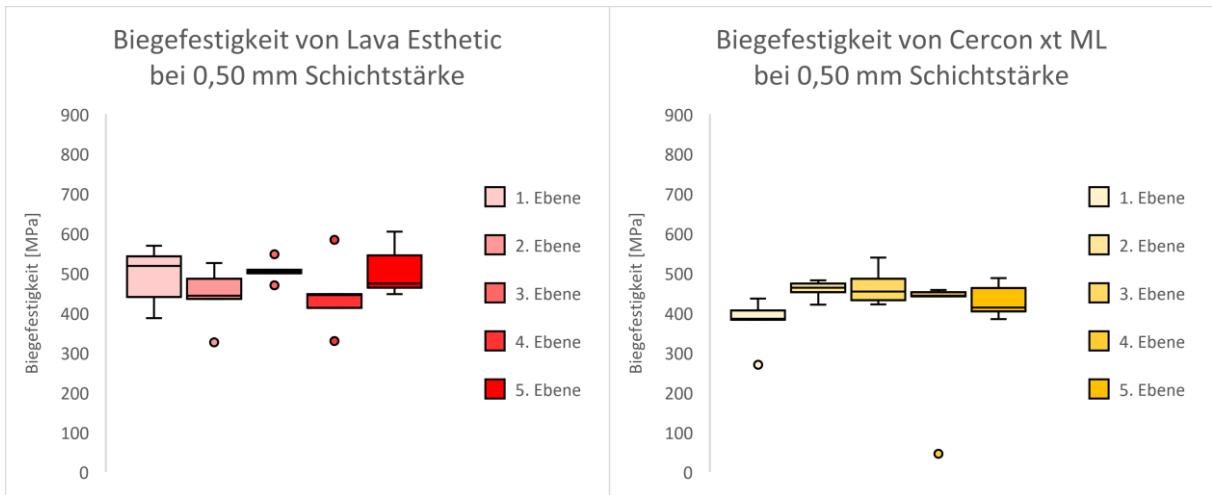


Abb. 56: Box-Plot-Diagramm der Biegefestigkeit [MPa] von Lava Esthetic bei 0,50 mm Schichtstärke (links)

Abb. 57: Box-Plot-Diagramm der Biegefestigkeit [MPa] von Cercon xt ML bei 0,50 mm Schichtstärke (rechts)

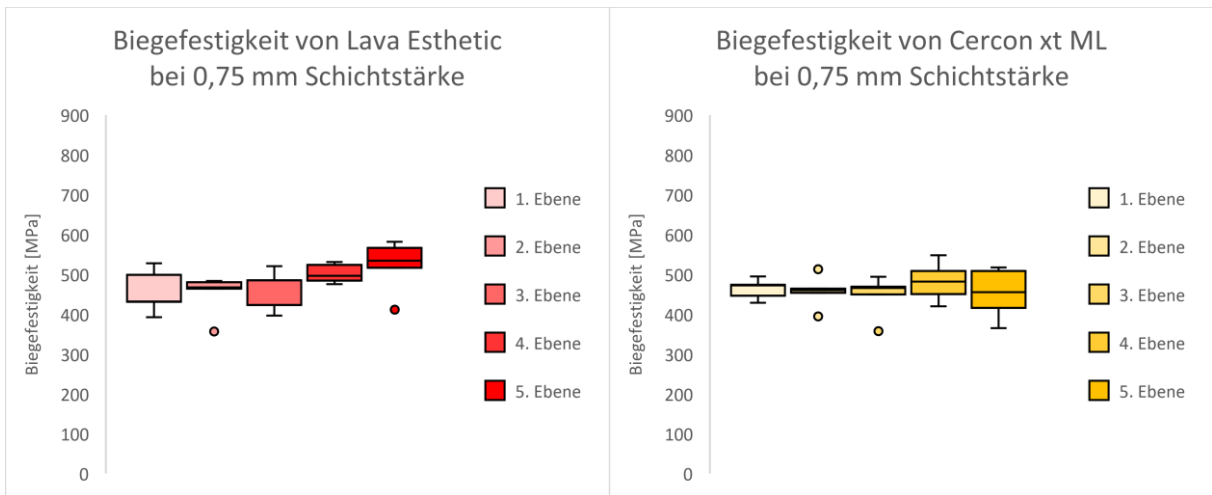


Abb. 58: Box-Plot-Diagramm der Biegefestigkeit [MPa] von Lava Esthetic bei 0,75 mm Schichtstärke (links)

Abb. 59: Box-Plot-Diagramm der Biegefestigkeit [MPa] von Cercon xt ML bei 0,75 mm Schichtstärke (rechts)

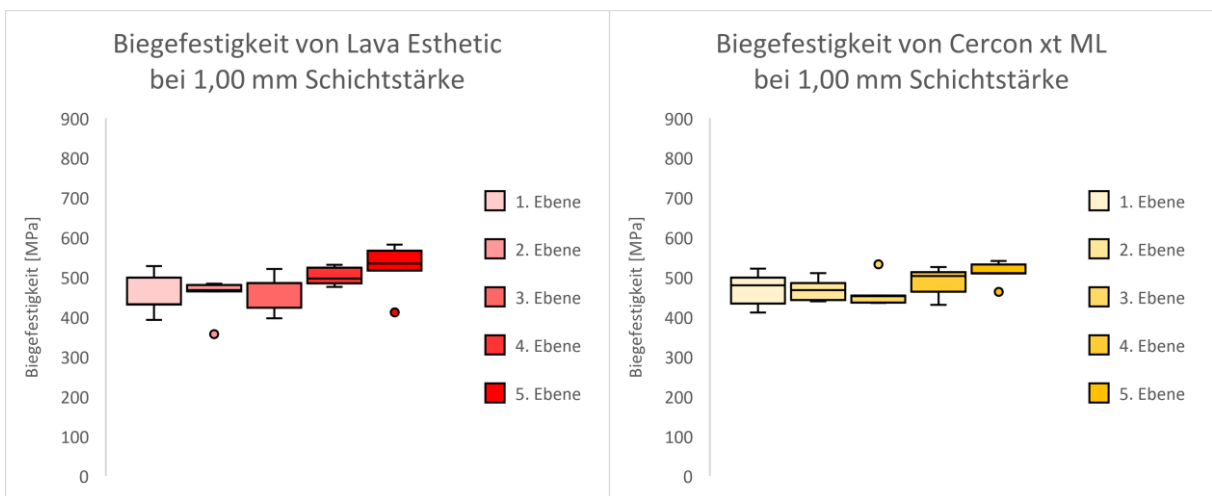


Abb. 60: Box-Plot-Diagramm der Biegefestigkeit [MPa] von Lava Esthetic bei 1,00 mm Schichtstärke (links)

Abb. 61: Box-Plot-Diagramm der Biegefestigkeit [MPa] von Cercon xt ML bei 1,00 mm Schichtstärke (rechts)

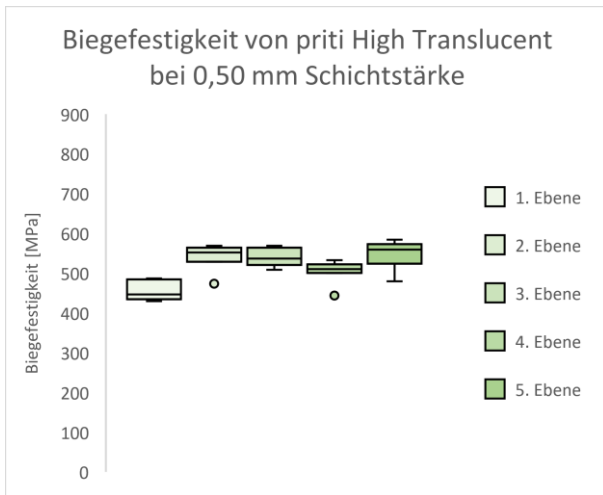


Abb. 62: Box-Plot-Diagramm der Biegefestigkeit [MPa] von priti High Translucent bei 0,50 mm Schichtstärke (links)

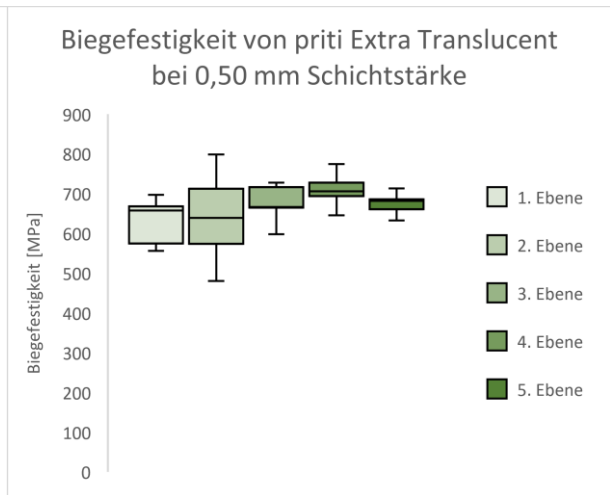


Abb. 63: Box-Plot-Diagramm der Biegefestigkeit [MPa] von priti Extra Translucent bei 0,50 mm Schichtstärke (rechts)

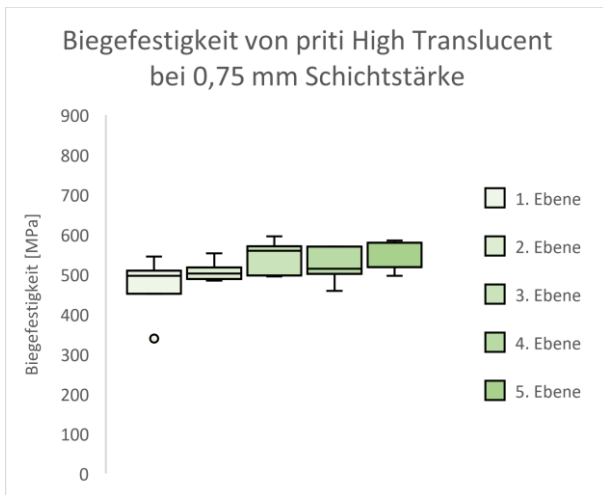


Abb. 64: Box-Plot-Diagramm der Biegefestigkeit [MPa] von priti High Translucent bei 0,75 mm Schichtstärke (links)

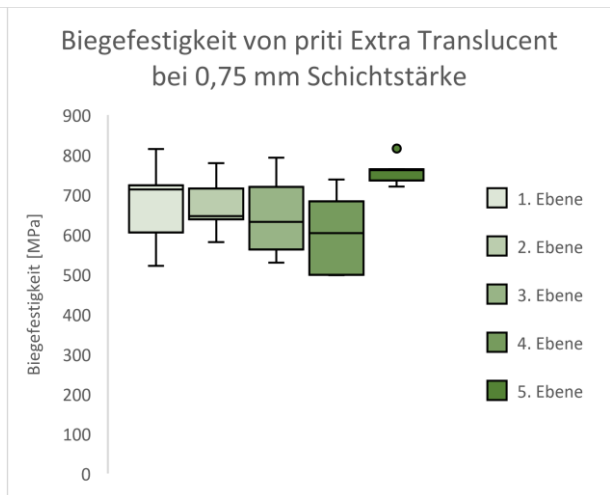


Abb. 65: Box-Plot-Diagramm der Biegefestigkeit [MPa] von priti Extra Translucent bei 0,75 mm Schichtstärke (rechts)

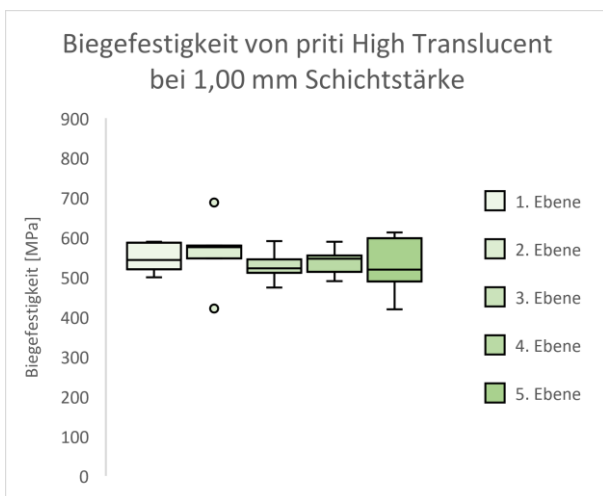


Abb. 66: Box-Plot-Diagramm der Biegefestigkeit [MPa] von priti High Translucent bei 1,00 mm Schichtstärke (links)

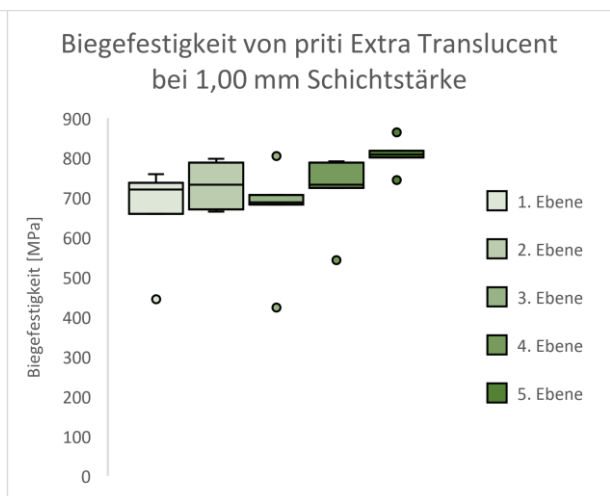


Abb. 67: Box-Plot-Diagramm der Biegefestigkeit [MPa] von priti Extra Translucent bei 1,00 mm Schichtstärke (rechts)

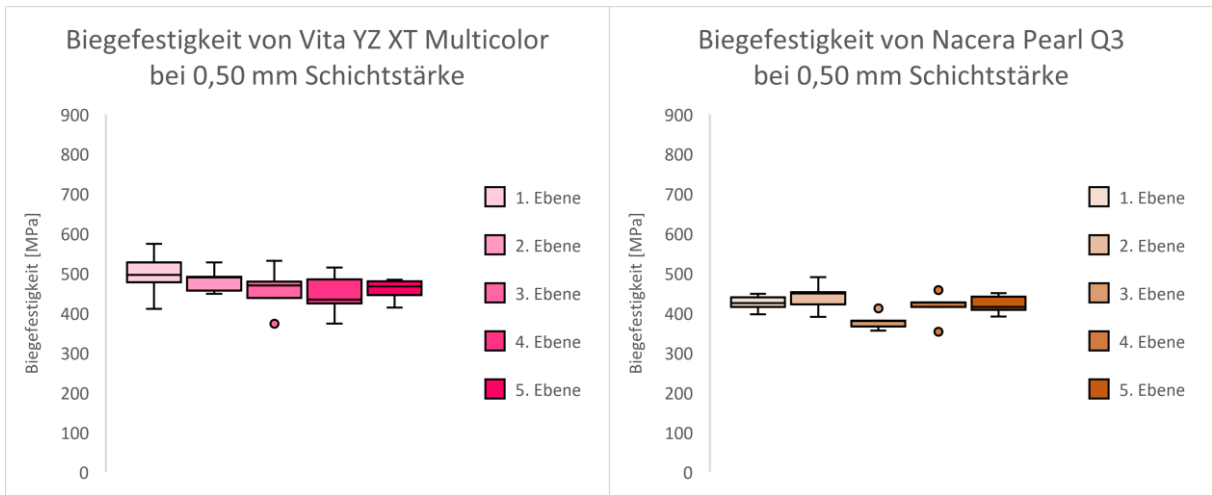


Abb. 68: Box-Plot-Diagramm der Biegefestigkeit [MPa] von Vita ZXT Multicolor bei 0,50 mm Schichtstärke (links)

Abb. 69: Box-Plot-Diagramm der Biegefestigkeit [MPa] von Nacera Pearl Q3 bei 0,50 mm Schichtstärke (rechts)

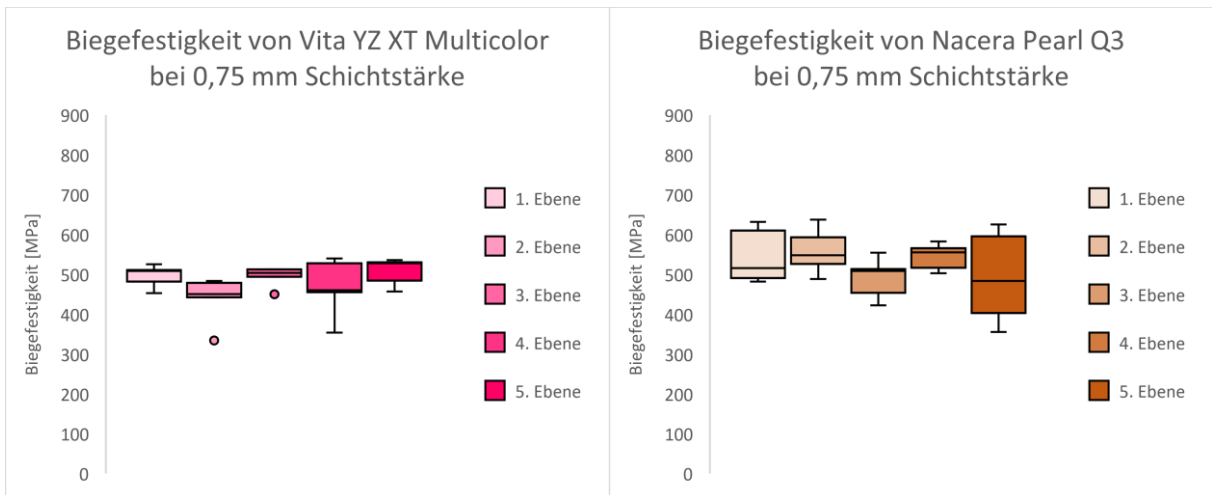


Abb. 70: Box-Plot-Diagramm der Biegefestigkeit [MPa] von Vita ZXT Multicolor bei 0,75 mm Schichtstärke (links)

Abb. 71: Box-Plot-Diagramm der Biegefestigkeit [MPa] von Nacera Pearl Q3 bei 0,75 mm Schichtstärke (rechts)

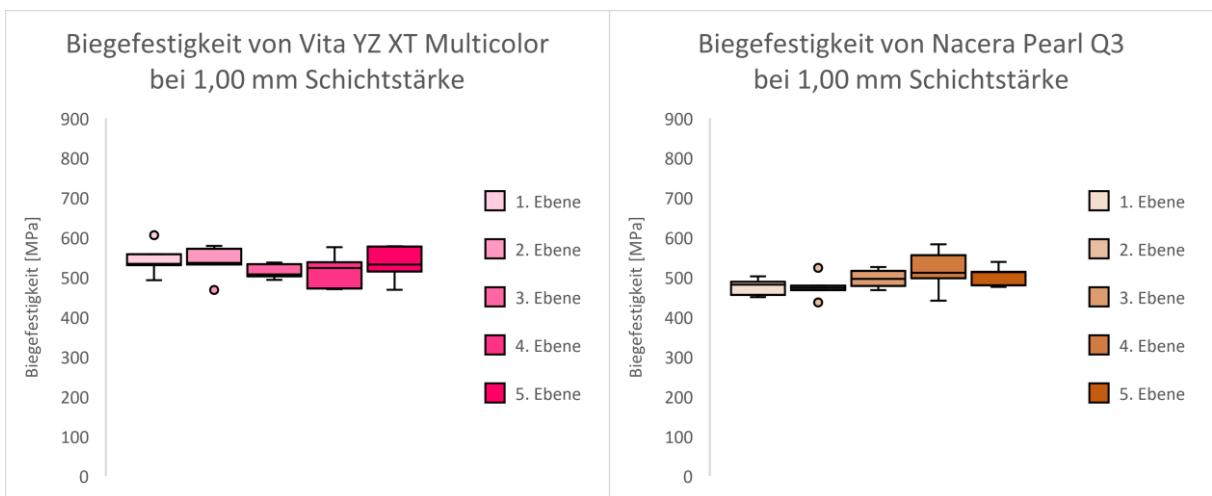


Abb. 72: Box-Plot-Diagramm der Biegefestigkeit [MPa] von Vita ZXT Multicolor bei 0,75 mm Schichtstärke (links)

Abb. 73: Box-Plot-Diagramm der Biegefestigkeit [MPa] von Nacera Pearl Q3 bei 0,75 mm Schichtstärke (rechts)

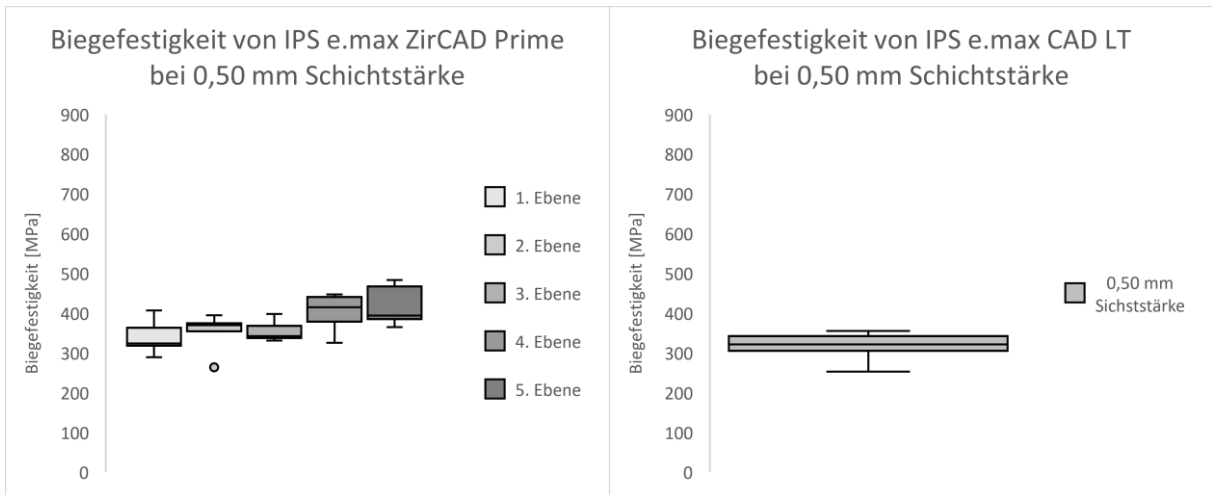


Abb. 74: Box-Plot-Diagramm der Biegefestigkeit [MPa] von IPS e.max ZirCAD Prime bei 0,50 mm Schichtstärke (links)

Abb. 75: Box-Plot-Diagramm der Biegefestigkeit [MPa] von IPS e.max CAD LT bei 0,50 mm Schichtstärke (rechts)

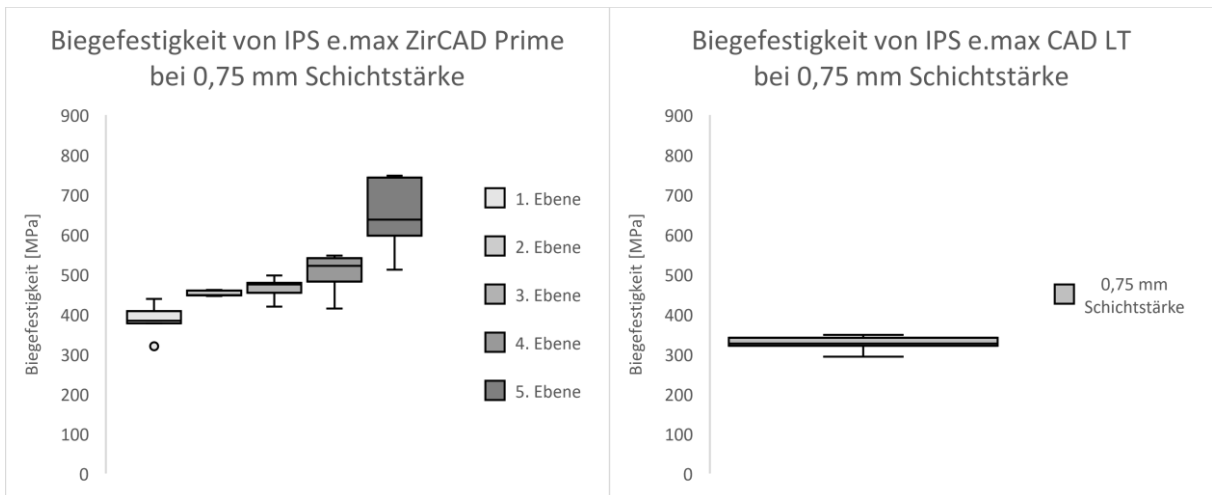


Abb. 76: Box-Plot-Diagramm der Biegefestigkeit [MPa] von IPS e.max ZirCAD Prime bei 0,75 mm Schichtstärke (links)

Abb. 77: Box-Plot-Diagramm der Biegefestigkeit [MPa] von IPS e.max CAD LT bei 0,75 mm Schichtstärke (rechts)

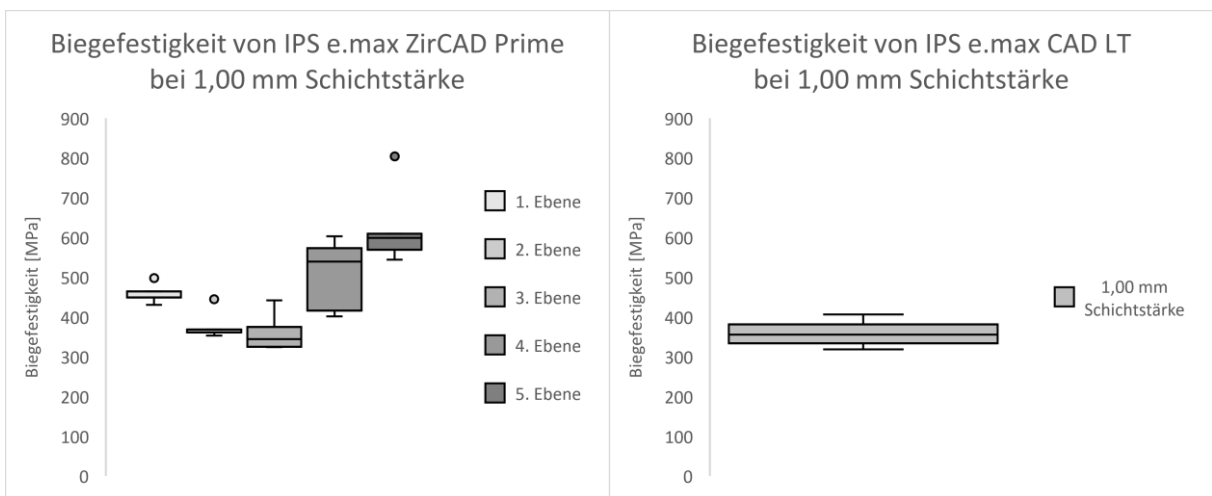


Abb. 78: Box-Plot-Diagramm der Biegefestigkeit [MPa] von IPS e.max ZirCAD Prime bei 1,00 mm Schichtstärke (links)

Abb. 79: Box-Plot-Diagramm der Biegefestigkeit [MPa] von IPS e.max CAD LT bei 1,00 mm Schichtstärke (rechts)



In Abb. 50 bis Abb. 79 kann festgestellt werden, dass lediglich IPS e.max ZirCAD Prime in den untersuchten Schichtstärken 0,75 mm (Abb. 76) und 1,00 mm (Abb. 78), einen Anstieg der Biegefestigkeit zwischen den Ebenen aufweisen kann. Dieser Unterschied ist mit jeweils einem  $p < 0,001$  statistisch signifikant. Des Weiteren liegen die Mittelwerte der Biegefestigkeit der zweiten und dritten Ebenen von IPS e.max ZirCAD Prime bei 1,00 mm Schichtstärke (377 MPa für Ebene 2 und 362 MPa für Ebene 3) im Größenbereich des Mittelwertes der Biegefestigkeit von IPS e.max CAD LT bei 1,00 mm Schichtstärke (359 MPa).

Die erhobenen Daten weisen darauf hin, dass lediglich bei IPS e.max ZirCAD Prime (Abb. 74, Abb. 76, Abb. 78) ein Unterschied der Biegefestigkeit innerhalb der Ronde vorliegt. Bei Lava Esthetic (Abb. 56, Abb. 58, Abb. 60) und priti Extra Translucent (Abb. 63, Abb. 65, Abb. 67) kann die Tendenz eines Verlaufes der Biegefestigkeit über die Ebenen erkannt werden.

Während bei der Opazität IPS e.max CAD LT deutlich geringere Werte aufweisen konnte, erreicht IPS e.max CAD LT bei der Biegefestigkeit fast die Werte der schwächsten Zirkoniumdioxide.

### 5.3 Ergebnisse des Zusammenhangs der Opazität und der Biegefestigkeit

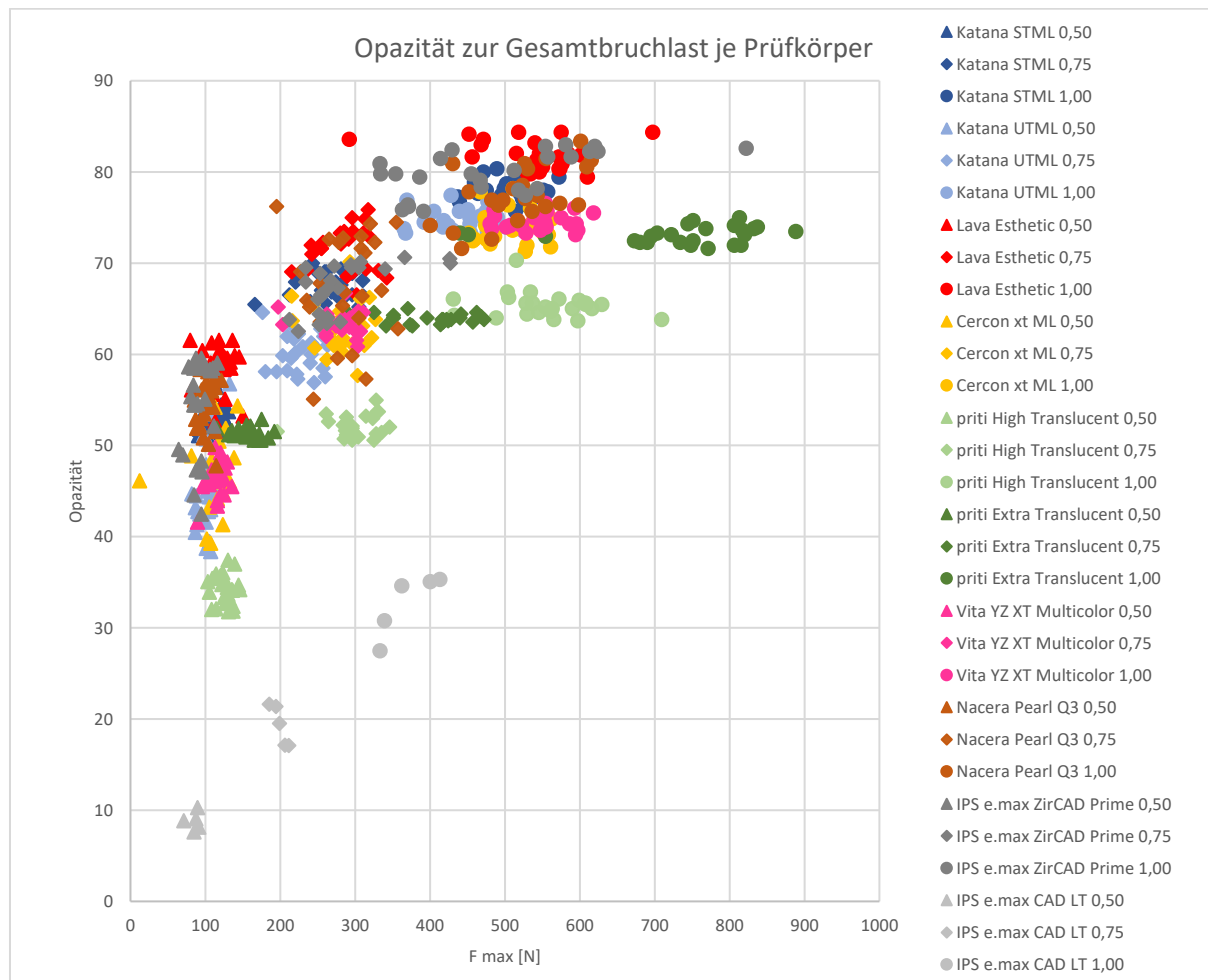


Abb. 80: Zusammenhang zwischen Opazität und Gesamtbruchlast [N] bei jedem Prüfkörper

In Abb. 80 sind von jedem Prüfkörper die Opazitätswerte und die dazugehörigen Gesamtbruchlasten dargestellt. Im Anhang ist für jedes Material ein eigenes Diagramm aufgeführt (Abb. 85 bis Abb. 94).

Beim Vergleich der beiden Materialklassen Zirkoniumdioxid und Lithiumdisilikat fällt auf, dass Lithiumdisilikat geringere Opazitätswerte aufweist. Zum Beispiel liegen im Bereich der Gesamtbruchlast zwischen 200 N und 400 N die Opazitätswerte der Zirkoniumdioxide zwischen 50 und 85. Wohingegen die Opazität von Lithiumdisilikat im gleichen Gesamtbruchlastbereich zwischen 25 und 40 liegt. Es wird hierbei Lithiumdisilikat einer Schichtstärke von 1,00 mm mit Zirkoniumdioxiden einer Schichtstärke von 0,75 mm verglichen. Selbst bei einer Reduktion der Schichtstärke des Zirkoniumdioxides auf 0,50 mm werden mit Ausnahme von priti High Translucent noch höhere Opazitätswerte gemessen. Die höhere Biegefestigkeit des Zirkoniumdioxides kann also folglich den Nachteil der höheren Opazität durch Minimierung der Schichtstärke nicht ausgleichen.

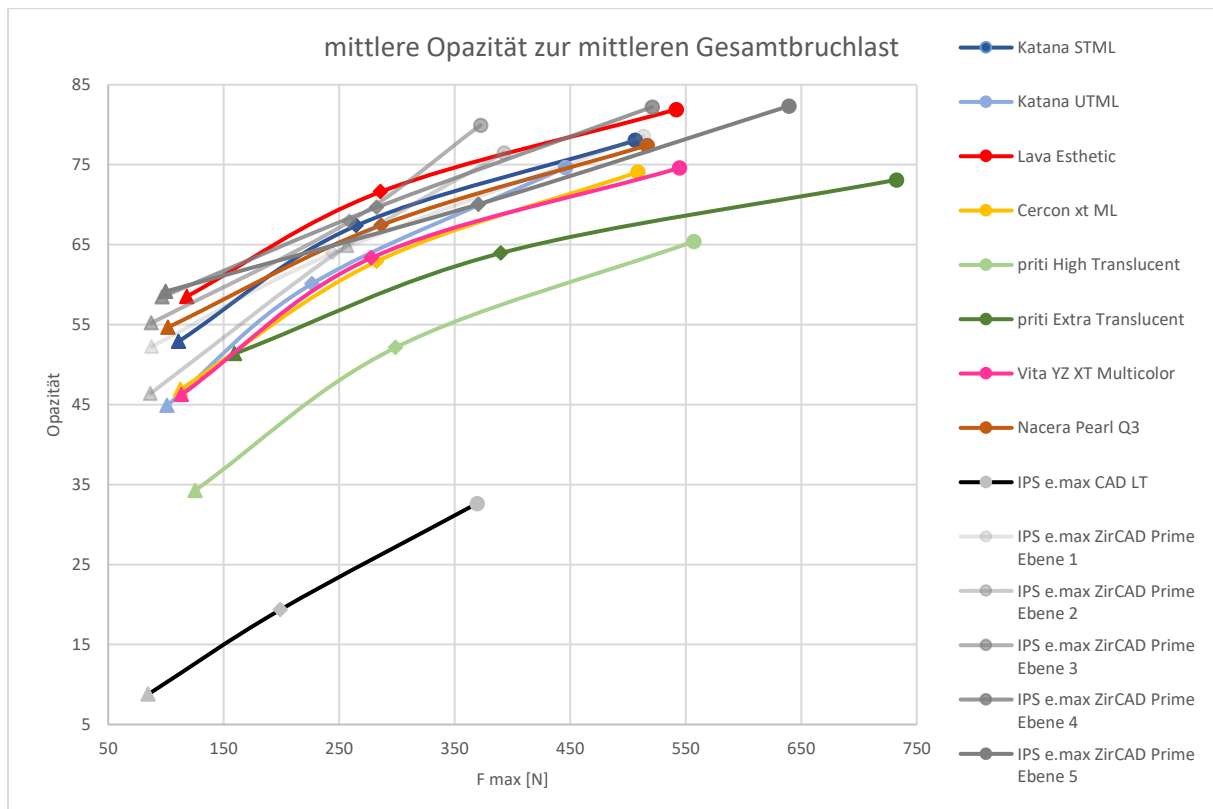


Abb. 81: Zusammenhang zwischen mittlerer Opazität und mittlerer Gesamtbruchlast [N] bei 0,50 mm Schichtstärke ( $\Delta$ ), 0,75 mm Schichtstärke ( $\diamond$ ) und 1,00 mm Schichtstärke ( $\circ$ )

Um eine bessere Übersicht zu erlangen, werden die Mittelwerte der Opazitätswerte und der Gesamtbruchlasten pro Material und Schichtstärke gebildet. Da bei IPS e.max ZirCAD Prime der Schichtungsgradient der Ronde einen größeren Einfluss auf die Werte zeigt, werden hier die Mittelwerte pro Ebene gebildet. In Abb. 81 ist zu erkennen, dass mit steigender Schichtstärke sowohl die Gesamtbruchlast als auch die Opazität steigt.

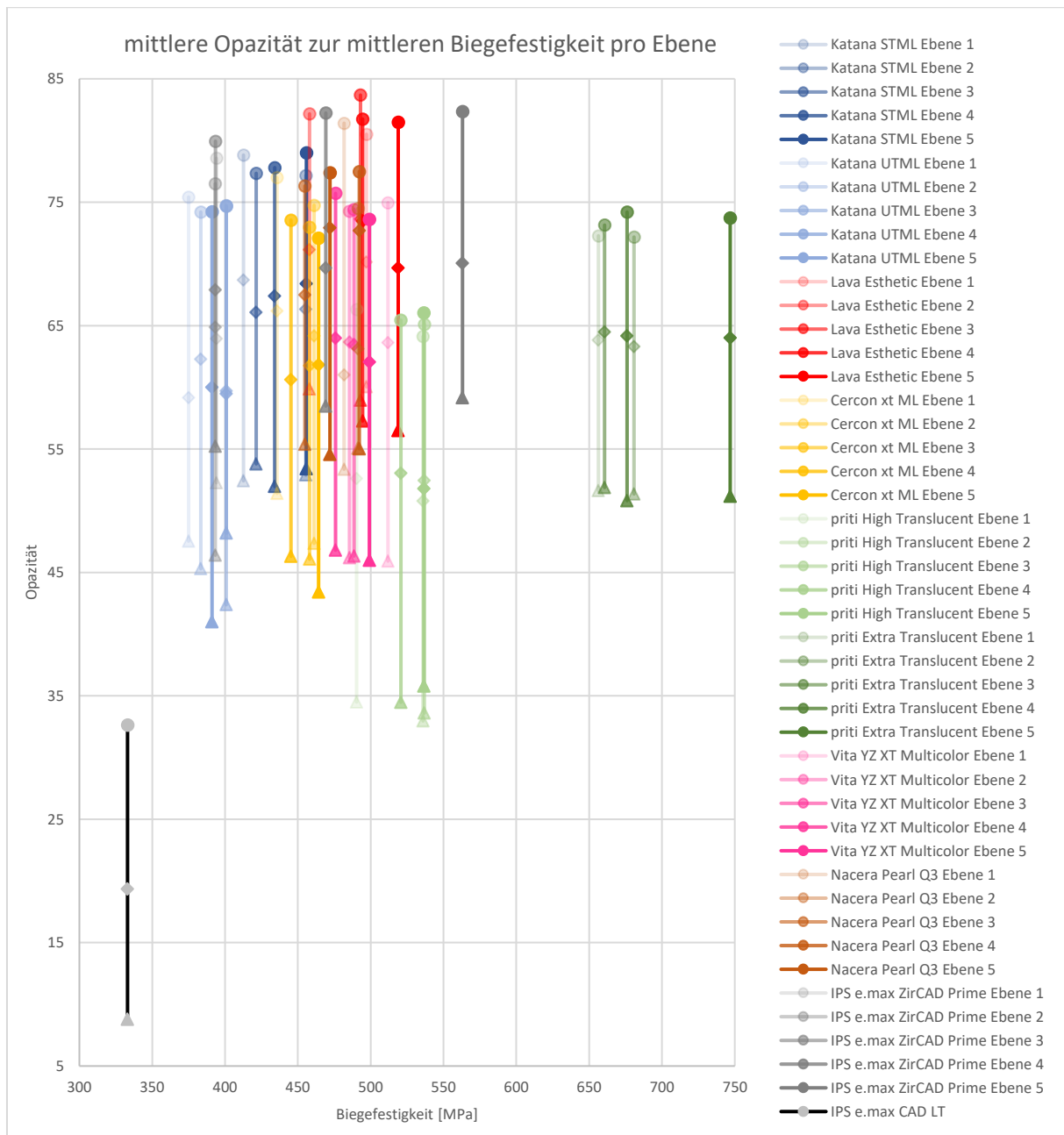


Abb. 82: Zusammenhang zwischen mittlerer Opazität und mittlerer Biegefestigkeit [MPa] pro Ebene bei 0,50 mm Schichtstärke (Δ), 0,75 mm Schichtstärke (◊) und 1,00 mm Schichtstärke (○)

In Abb. 82 sind die mittleren Opazitätswerte und die mittleren Biegefestigkeiten der Materialien pro Ebene dargestellt. Im Anhang ist für jedes Material ein eigenes Diagramm aufgeführt (Abb. 95 bis Abb. 104). Da sich die Opazitätswerte und Biegefestigkeiten innerhalb eines Materials mit Ausnahme von IPS e.max ZirCAD Prime nicht sehr stark unterscheiden, wird pro Material ein Mittelwert der Opazität und Biegefestigkeit berechnet und in Abb. 83 dargestellt.

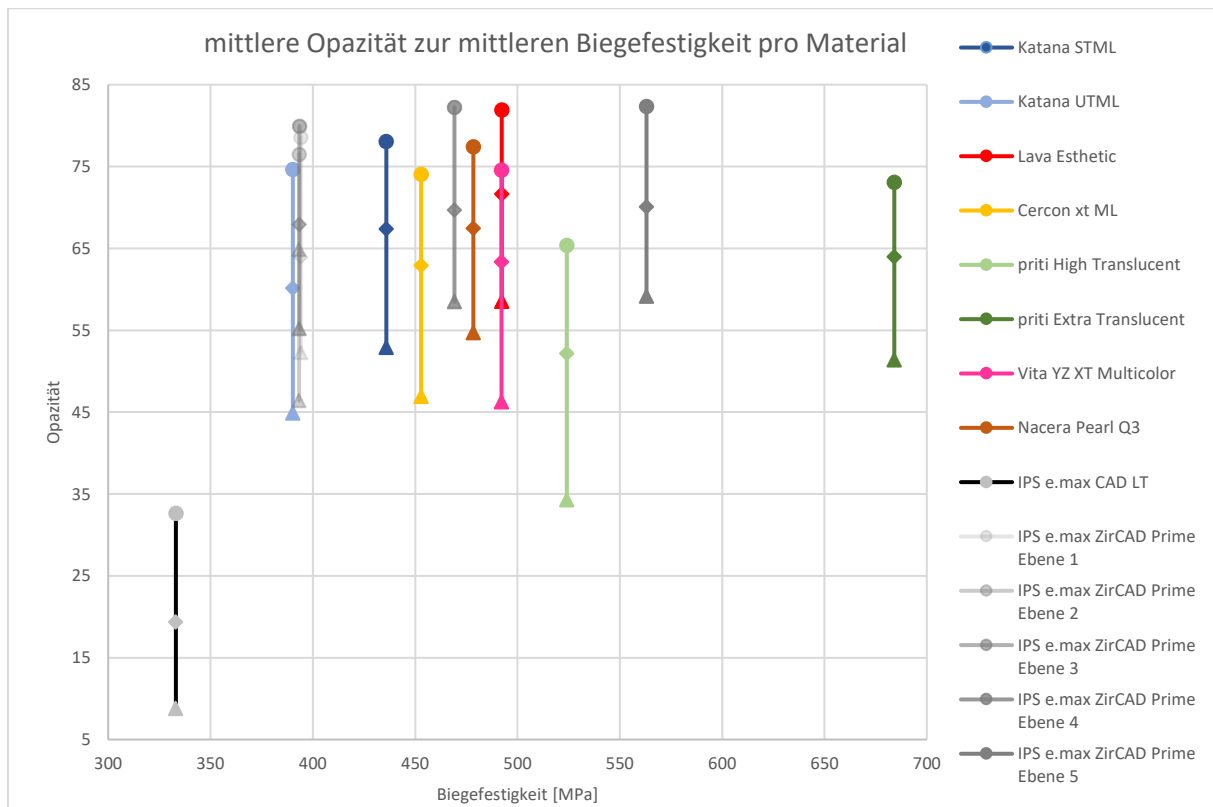


Abb. 83: Zusammenhang zwischen mittlerer Opazität und mittlerer Biegefestigkeit [MPa] pro Material bei 0,50 mm Schichtstärke (Δ), 0,75 mm Schichtstärke (◊) und 1,00 mm Schichtstärke (○)

In Abb. 83 ist zu erkennen, dass sich die Zirkoniumdioxide in einer Ballung anordnen. Lithiumdisilikat grenzt sich von den Zirkoniumdioxiden zum einen durch eine niedrige Opazität und zum anderen durch einen geringeren Biegefestigkeitswert ab. Des Weiteren grenzen sich die beiden Materialien priti High Translucent und priti Extra Translucent von den restlichen Zirkoniumdioxiden ab. Priti High Translucent weist eine vergleichsweise niedrige Opazität bei hoher Biegefestigkeit auf. Priti Extra Translucent fällt durch den hohen Biegefestigkeitswert auf. Bei IPS e.max ZirCAD Prime weisen die ersten drei Ebenen vergleichbare Eigenschaften auf. Die vierte und fünfte Ebene von IPS e.max ZirCAD Prime zeigen höhere Opazitäts- und höhere Biegefestigkeitswerte als die ersten drei Ebenen.

Es ist die Tendenz zu erkennen, dass bei steigenden Biegefestigkeitswerten ebenso die Opazität ansteigt. Dieser Effekt ist noch deutlicher bei der Betrachtung der Materialien eines Herstellers, Katana STML und Katana UTML beziehungsweise priti Extra Translucent und priti High Translucent zu erkennen. Ebenso tritt dieser Effekt innerhalb der Reihe IPS e.max ZirCAD Prime im Vergleich der einzelnen Ebenen auf. Jedoch stellt priti mit seinen beiden Produkten priti High Translucent und priti Extra Translucent eine Ausnahme dar. Die beiden Materialien besitzen verhältnismäßig niedrige Opazitätswerte.

## 5.4 Ergebnisse Rauheit

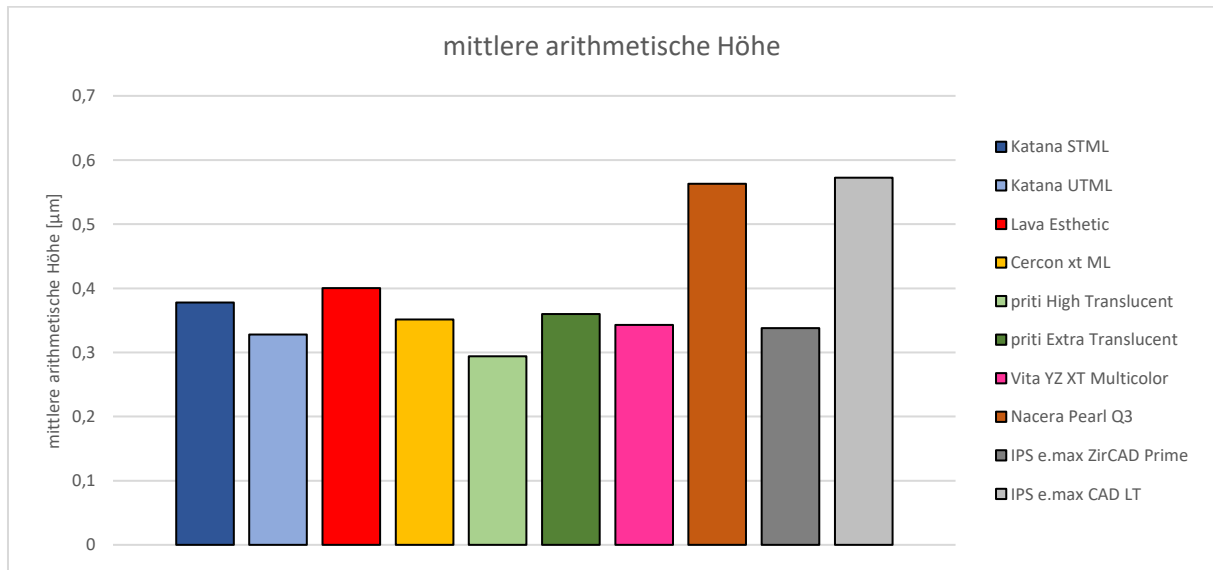


Abb. 84: Mittlere arithmetische Höhe [ $\mu\text{m}$ ] der verschiedenen Materialien

Der Mittelwert der mittleren arithmetischen Höhe ( $S_a$ ) erstreckt sich bei den meisten Materialien zwischen 0,294  $\mu\text{m}$  und 0,400  $\mu\text{m}$ . Lediglich Nacera Pearl Q3 (0,563  $\mu\text{m}$ ) und IPS e.max CAD LT (0,572  $\mu\text{m}$ ) liegen darüber (Abb. 84).

Da die Prüfkörper alle gleich hergestellt wurden, muss der Unterschied der Rauheit von IPS e.max CAD LT und Nacera Pearl Q3 materialspezifisch bedingt sein. Dennoch zeigt Abb. 84, dass alle Werte der mittleren arithmetischen Höhe ( $S_a$ ) im selben Größenbereich liegen und somit ein Vergleich der Materialien möglich ist.

## 6 Diskussion

Ein wichtiger Parameter für den Langzeiterfolg keramischer Restaurationen stellt die Biegefestigkeit dar. Für die Zufriedenheit des Patienten spielt die ästhetische Erscheinungsform eine weitere Rolle. In vitro-Untersuchungen erwiesen sich dabei als nützlich bei der Interpretation von in-vivo-Untersuchungen (Wendler et al., 2018).

### 6.1 Diskussion der Prüfkörperherstellung

Die Probenherstellung sollte möglichst nah dem klinischen Herstellungsprozess entsprechen. Folglich wurden eine CAD/CAM Schleifmaschine und ein Sinterofen verwendet, welche auch im klinischen Alltag Anwendung finden. Im klinischen Gebrauch ist eine Bearbeitung der Restauration im Grünkörperstadium mit Diamantschleifern nicht vorgesehen. Jedoch musste für das Schneiden der Prüfkörperrohlinge ein Sägemikrotom mit einem Diamantblatt verwendet werden. Dieses Gerät ermöglichte die Herstellung planparalleler Prüfkörper mit einer Parallelitätstoleranz von  $\pm 0,025$  mm. Die Toleranz wurde halb so groß wie in der ISO-Norm beschrieben gewählt, da die Prüfkörper ebenfalls nur halb so groß wie beschrieben waren. Während kronenförmige Prüfkörper der in-vivo-Anwendung eher entsprechen, sind scheibenförmige Prüfkörper leichter und standardisiert herstellbar.

Im Gegensatz zu den Vorgaben der ISO-Norm wurde auf eine Politur beziehungsweise Glasur verzichtet. Zum einen werden Restaurationen von ihrer Innenseite im klinischen Alltag nicht poliert, um die Befestigung am Zahnstumpf nicht negativ zu beeinflussen, zum anderen würde eine Glasur einen nur schwer zu reproduzierenden Prozess in der Herstellung darstellen, der die Messergebnisse ungleich beeinflussen könnte. Die Prüfkörpergröße ist etwa halb so groß wie die in der ISO-Norm beschriebene Größe. Die kleinere Größe wurde gewählt, um die Prüfkörper vor der Biegefestigkeitsmessung mit einem Mikrotiterplatten-Lesegerät vermessen zu können. Die oben genannten Umstände lassen einen direkten Vergleich der Ergebnisse mit in der Literatur angegebenen Parametern nicht zu. Dennoch können Verhältnisse und Beziehungen zwischen den Materialien erkannt werden.

Die in der ISO-Norm beschriebene beidseitige Politur und Verwendung der Farbe A2 resultiert in einer zur klinischen Anwendung vergleichsweise niedrigeren Opazität. In der hier durchgeführten Untersuchung wurde deshalb die häufig verwendete Farbe A3 gewählt (Smith & Wilson, 1998). Um eine hohe Reproduzierbarkeit und geringere Fehleranfälligkeit der

Methode zu gewährleisten, wurden die Prüfkörper so wenig wie möglich bearbeitet und auf eine beidseitige Politur der Prüfkörper verzichtet. Hierbei ist zu beachten, dass eine Politur beziehungsweise eine Glasur die Biegefestigkeit beeinflusst (Kosmač et al., 2000; Kosmač et al., 1999; Lohbauer et al., 2008; Fischer et al., 2003). Ebenso wird die Opazität beeinflusst. Durch eine höhere Rauheit wird mehr Licht gebrochen und reflektiert, sodass weniger Licht durch den Prüfkörper scheinen kann (Marxkors & Meiners, 2001).

Die Materialstärken von 0,50 mm, 0,75 mm und 1,00 mm wurden in einem Bereich gewählt, der die Mindestschichtstärken (Nacera Pearl Q3, priti High Translucent, priti Extra Translucent: 0,4 mm; Cercon xt ML, VITA YZ XT Multicolor: 0,7 mm; Katana UTML, Katana STML, Lava Esthetic: 0,8 mm; IPS e.max CAD LT, IPS e.max ZirCAD Prime: 1,0 mm) der Materialien abdeckt. Es wurden immer aus der gleichen Höhe der Ronden die Prüfkörper hergestellt. Es gibt keine Norm für den Schichtungsgradienten innerhalb einer Ronde. Ein unterschiedlich steiler Farbverlauf kann die Opazitäts-Werte beeinflussen (Ueda et al., 2015). Für das Schneiden der Prüfkörperrohlinge musste zuerst in einem Vorversuch der optimale Vorschub des Sägemikrotoms ermittelt werden. Bei einem zu großen Vorschub wäre jeweils der Prüfkörper am Ende eines Schnittes ausgebrochen. Durch makroskopische Kontrolle wurden beschädigte Prüfkörper aussortiert und der Schnitt wiederholt. Dennoch könnten mikroskopische Risse die Messwerte beeinflussen.

Es konnten pro Schneidevorgang fünf Prüfkörper gleichzeitig geschnitten werden. Dies hat sich positiv auf eine gleichmäßige Schichtstärke ausgewirkt. Dennoch konnte beobachtet werden, dass trotz größter Sorgfalt die Schichtstärken der einzelnen Schnitte leicht variierten. Aus der ersten Ebene sind Prüfkörper oft nicht so plan und gleichmäßig stark wie die Prüfkörper aus den tieferen Ebenen. Dies kann mit der Befestigung der Prüfkörperrohlinge auf der Technovit-Basis erklärt werden. Das starre Befestigen durch das Umgießen der Prüfkörperrohlinge mit Technovit war nicht möglich. In einem Vorversuch wurden die Prüfkörper durch die Kontraktion des abbindenden Technovits zerstört. Für die Befestigung wurde deshalb bei dieser Untersuchung ein Thermoplast aus einer Heißklebepistole verwendet. Dieser Thermoplast weist bei Raumtemperatur eine gewisse Elastizität auf. Diese Elastizität könnte eine Abknickung der Prüfkörperrohlinge durch den Druck des Sägemikrotoms ermöglicht haben. Letztendlich muss bei der Auswertung der Ergebnisse der ersten Ebene auf die Schichtstärke geachtet werden (Abb. 105, Abb. 106, Abb. 107, Abb. 108, Abb. 109, Abb. 110). Ein weiterer Nachteil der Befestigungsart war, dass die Prüfkörper



ungefähr bis zur Hälfte ihrer Höhe mit dem Thermoplast gefasst werden mussten, um eine ausreichende Stabilität beim Schneiden zu gewährleisten. Folglich konnten nur aus den oberen Hälften der Prüfkörperrohlinge Proben gewonnen werden. Das Sägen beeinflusst die Rauheit kaum. Die ermittelten Rauheitswerte sind mit den Rauheitswerten unbearbeiteter Oberflächen des Materials IPS e.max CAD LT aus der Literatur vergleichbar (Alao et al., 2017). Um eine gleichmäßige Verteilung der Prüfkörper auf dem Brennträger zu gewährleisten, wurden pro Sintervorgang 45 Prüfkörper gesintert. Folglich mussten für die jeweils 75 Proben eines Materials zwei Sintervorgänge durchgeführt werden. Die Herstellerangaben wurden genau eingehalten, sodass ein Fehler seitens des Sintervorgangs weitgehend ausgeschlossen werden kann (Klinke et al., 2018).

## **6.2 Diskussion der Methoden**

Bei der vorliegenden Arbeit handelt es sich um eine in- vitro- Untersuchung. Folglich wurde durch die Auswahl der Prüfmethode ein Verfahren gewählt, welches reproduzierbar für den Vergleich der Materialien und übertragbar auf den klinischen Alltag für die Interpretation ist.

Beim Messen der Schichtstärken wurde ein Probenhalter eingesetzt. Es war notwendig, die Proben durch Umspannen zu drehen, um an fünf Stellen messen zu können. Durch eine Markierung mit einem Filzstift wurde sichergestellt, dass die Probe um exakt 90° gedreht wurde.

Durch das standardisierte Mikrotiterplatten-Lesegerät wird eine zuverlässige, reproduzierbare Messung gewährleistet. Bei der optischen Dichtemessung werden nur die tatsächlich direkt transmittierten Lichtstrahlen gemessen. Farbunterschiede, reflektiertes oder gestreutes Licht finden in dieser Untersuchung keine Berücksichtigung. Beeinflusst werden die Ergebnisse durch den Leerwert der Titerplatte. Bei der Auswertung kann dieser Leerwert von den Ergebnissen subtrahiert werden. Gegen den Einsatz des Mikrotiterplatten-Lesegeräts spricht, dass normalerweise keine Festkörper mit dem Gerät vermessen werden. Im Vorversuch hat sich aber eine gute Reliabilität der Methode gezeigt. Zudem konnten die Materialien gut voneinander abgegrenzt werden. Andere Untersuchungen verwenden für die Lichtdurchlässigkeitsmessung ein Spektralphotometer (Sen & Us, 2018; Awad et al., 2015; Barizon et al., 2013; Beuer et al., 2012; Erdelt et al., 2019; Heffernan et al., 2002; Ueda et al., 2015; Vichi et al., 2014; Zhang et al., 2011).

Der Dreipunkt-Biegeversuch, Vierpunkt-Biegeversuch und biaxiale Biegeversuch liefern unterschiedliche Ergebnisse für die Biegefestigkeiten (Fischer et al., 2008; Jin et al., 2004). Der biaxiale Biegeversuch hat den Vorteil, dass Kantendefekte weniger zum Tragen kommen (Fischer, 2009). Durch die kleinere Prüfkörpergröße musste ein spezielles Prüfwerkzeug hergestellt werden. Dieses wurde entsprechend dem Prüfwerkzeug der ISO-Norm verkleinert hergestellt. Durch den Größenunterschied ist ein Vergleich der absoluten Werte zur Literatur nur eingeschränkt möglich. Wie sich die Biegefestigkeit bei unterschiedlichen Prüfkörpergrößen verhält, müsste noch untersucht werden.

Ein Vorteil der optischen Rauheitsmessung ist, dass die Oberfläche als dreidimensionale Fläche betrachtet werden kann und nicht wie bei der taktilen Messung als zweidimensionale Spur auf der Oberfläche. Die optische Rauheitsmessung hat die weiteren Vorteile, dass die Oberfläche schnell erfasst wird, kein Verschleiß des Messtasters vorliegt, empfindliche Proben nicht beschädigt werden und auch weiche beziehungsweise elastische Oberflächen vermessen werden können (Tan, 2016). In einem Vorversuch wurde geprüft, dass die getesteten Materialien genügend Licht reflektieren und die optische Rauheitsmessung zuverlässig durchgeführt werden kann. Hierfür wurden die erhobenen Daten mit den Ergebnissen einer taktilen Rauheitsmessung verglichen. Auch die Literatur bestätigt, dass die Ergebnisse der optischen Rauheitsmessung mit denen der taktilen Rauheitsmessung vergleichbar sind (Ströer et al., 2014).

### **6.3 Diskussion der Ergebnisse**

In dieser Arbeit sollte der Zusammenhang zwischen der Opazität und der Biegefestigkeit von multilayer Zirkoniumdioxiden untersucht werden. Dies ist von Interesse bei der Herstellung von monolithischem Zahnersatz. Monolithischer Zahnersatz hat den Vorteil, dass er stabiler als verblendeter Zahnersatz ist (Schmitter, 2012; Beuer et al., 2012). Zusätzlich können in der Digitalen Zahnmedizin komplexe funktionelle Aspekte berücksichtigt werden. Mit Hilfe virtueller Artikulatoren werden neben gelenkgeführten auch physiologische Kieferbewegungen simuliert. Dies ist wichtig, da die neuen stabilen Materialien nur schwer manuell eingeschliffen werden können (Kordaß & Ruge, 2019b, 2019a).

Wie auch in anderer Literatur beschrieben, weist Lithiumdisilikatkeramik eine niedrigere Opazität als multilayer Zirkoniumdioxid auf (Baldissara et al., 2010). Ausschließlich bei IPS e.max ZirCAD Prime wird vom Hersteller mit einem Transluzenz-Verlauf geworben. Die anderen Hersteller geben nur einen Farbverlauf an. Ein Opazitätsverlauf von Katana UTML und Katana STML konnte mit der hier verwendeten Messmethode nicht nachgewiesen werden. Im Gegensatz dazu wird in der Literatur beim Messen der Lichtdurchlässigkeit mit Hilfe eines Spektralphotometers ein Unterschied der Schichtungsebenen beschrieben (Erdelt et al., 2019; Ueda et al., 2015). Dies könnte daran liegen, dass bei dieser Untersuchung nur aus der oberen Hälfte der Runde Prüfkörper hergestellt wurden. Zum anderen fallen die Unterschiede der Lichtdurchlässigkeit bei einer Wellenlänge um 620 nm bei den anderen Studien ebenfalls geringer aus (Erdelt et al., 2019; Ueda et al., 2015).

Geringe Schwankungen der Opazität (Ausnahme IPS e.max ZirCAD Prime) könnten mit der unterschiedlichen Verteilung von Farbpartikeln in den fünf Ebenen erklärt werden (Kolakarnprasert et al., 2019; Ueda et al., 2015). Diese Farbpartikel streuen Licht und erhöhen somit die Opazität. Des Weiteren müsste die Farb-Echtheit der Proben kontrolliert werden, um sicherzustellen, dass die gleichen Farben miteinander verglichen werden, da die Farbe einen Einfluss auf die Transluzenz und somit auch auf die Opazität hat (Zhang et al., 2011; Ilie & Stawarczyk, 2014). Um die Ergebnisse der Opazitätsmessung vergleichbarer zu gestalten, sollten Messungen eines Materials mit einem Spektralphotometer und einem Mikrotiterplatten-Lesegerät durchgeführt und verglichen werden.

Multilayer Zirkoniumdioxid ist bezüglich der Biegefestigkeit Lithiumdisilikat überlegen (Kwon et al., 2018). Die hier vorliegende Untersuchung bestätigt diese Aussage. Die Mittelwerte der Biegefestigkeiten der Zirkoniumdioxide lagen alle über 350 MPa. Der Mittelwert der Lithiumdisilikatkeramik lag bei 333 MPa. Diese Werte sind geringer als von den Herstellern angegeben. Dies war zu erwarten, da eine abweichende Prüfkörperherstellung zur ISO-Norm gewählt wurde. Die rauere Oberfläche der Prüfkörper im Vergleich zur polierten Oberfläche der Prüfkörper laut ISO-Norm hat einen Einfluss auf die Biegefestigkeit (Kosmač et al., 2000; Kosmač et al., 1999; Fischer et al., 2003; Lohbauer et al., 2008). Dennoch können die Materialien untereinander verglichen werden.

Die statistische Auswertung der Ergebnisse kann hinsichtlich der Normalverteilung der Opazitätswerte durch eine andere Quelle belegt werden (Erdelt et al., 2019). Abweichungen gibt es dagegen bei der Verteilung der Biegefestigkeit. Die Biegefestigkeit ist laut Literatur

nicht normalverteilt, sondern folgt einem komplexen Verteilungsmuster, der sogenannten Weibullverteilung (Bankoğlu Güngör et al., 2015; Fischer, 2009; Rösler et al., 2016; Wallodi Weibull, 1951). Wie im Allgemeinen bei keramischen Werkstoffprüfungen zeigt sich auch bei dieser Studie eine große Streuung der gemessenen Biegefestigkeiten. Die Weibull-Statistik wurde jedoch nicht angewendet, da sich für ein verlässliches Ergebnis zu wenige Proben in einer Gruppe befinden. In der Literatur wird eine Mindestanzahl von 30 Proben empfohlen (Carter & Norton, 2007). Die geringe Anzahl pro Prüfkörpergruppe könnte auch ein Grund dafür sein, dass die Annahme der Nullhypothese einer Normalverteilung nicht widerlegt werden konnte.

Theoretisch sollte die Biegefestigkeit unabhängig von der Schichtstärke der Prüfkörper sein. Jedoch wurden unterschiedliche Ergebnisse der Biegefestigkeit für die drei Schichtstärken eines Materials errechnet. Grund hierfür könnte sein, dass in der Theorie keine elastische Verformung berücksichtigt wird. In dieser Studie wurden jedoch sehr dünne Prüfkörper vermessen, welche sich eventuell plastisch verformen konnten. Das Verhältnis zwischen Durchmesser und Schichtstärke variierte und somit auch die elastische Verformung des Prüfkörpers. Der Unterschied zwischen den Materialien hinsichtlich der Biegefestigkeit ist bei 1,00 mm Schichtstärke am größten. Dies könnte mit den höheren absoluten Werten der Biegefestigkeit erklärt werden. Die Tendenz eines Verlaufes der Biegefestigkeit über die Ebenen bei Lava Esthetic und priti Extra Translucent könnte mit der unterschiedlichen Verteilung der Farbpartikel erklärt werden. Die Farbpartikel müssten dann die Struktur des Zirkoniumdioxids beeinflussen. Hierzu müssen weitere Untersuchungen durchgeführt werden.

Eine vergleichbare Untersuchung, welche den Zusammenhang zwischen Opazität und Biegefestigkeit von CAD/CAM Materialien betrachtet, kam zu dem Ergebnis, dass die Transluzenz und Biegefestigkeit von der chemischen und strukturellen Zusammensetzung des Materials abhängig ist (Sen & Us, 2018). Eine Studie, welche sich mit den beiden Eigenschaften von multilayer Zirkoniumdioxiden und Lithiumdisilikat beschäftigt, kam zu ähnlichen Ergebnissen. Die multilayer Zirkoniumdioxide zeigen bessere mechanische Eigenschaften, während Lithiumdisilikat bessere optische Eigenschaften aufweisen kann (Michailova et al., 2020). Für den Beleg des Zusammenhangs zwischen der Opazität und Biegefestigkeit müssen weitere Studien durchgeführt werden.

In dieser Arbeit wurde festgestellt, dass die Rauheit der Oberfläche unter anderem vom Material abhängt. Dieses Ergebnis lässt sich auch in der Literatur finden (Awad et al., 2015). Diese in vitro Studie kann nicht die klinischen Bedingungen simulieren. Um definitive Empfehlungen für die Klinik geben zu können, sind weitere Untersuchungen notwendig, welche die intraoralen Bedingungen, die Langzeitbeständigkeit und das Abrasionsverhalten berücksichtigen. Des Weiteren stellen die beiden Parameter Opazität und Biegefestigkeit nur einen Anteil der Anforderungen dar, welchen die Restaurationen im gesamten gerecht werden müssen.

## 7 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde der Zusammenhang zwischen der Opazität und der biaxialen Biegefestigkeit von multilayer Zirkoniumdioxiden untersucht. Diese Materialwerte sind für die Indikationseinschätzung der Werkstoffe von großer Bedeutung.

Für die Untersuchung wurden neun Zirkoniumdioxide und als Vergleich ein Lithiumdisilikat ausgewählt. Insgesamt wurden 690 Prüfkörper im CAD/CAM Verfahren und mit einem Sägemikrotom hergestellt. Nachdem die Proben gesintert waren, wurden sie auf ihre Schichtstärke vermessen. Zur Messung wurde ein selbst entworfener und dreidimensional gedruckter Probenhalter eingesetzt. Zur Untersuchung der Probenoberfläche wurde das optische Rauheitsmessgerät Profilm 3D Optical Profiler (Filmetrics, San Diego, CA, USA) eingesetzt. Die Opazität wurde mit Hilfe des Mikrotiterplatten-Lesegerätes Synergy HTX (BioTek Instruments, Winooski, Vermont, Vereinigte Staaten) bestimmt. Für die eingesetzte Universalprüfmaschine Z050 (Zwick/Roell, Ulm, Deutschland) musste zunächst ein Prüfwerkzeug konstruiert und gefertigt werden. Zur Festigkeitsbestimmung wurde ein biaxialer Biegeversuch durchgeführt. Die Messwerte wurden in Form einer Excel-Tabelle gespeichert, auf ihre Normalverteilung überprüft und anschließend mit Hilfe der einfaktoriellen Varianzanalyse (ANOVA) ausgewertet.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Rauheiten der Prüfkörper dank der standardisierten Herstellung im selben Größenbereich liegen. Geringe Abweichungen können auf materialspezifische Einflussfaktoren zurückgeführt werden.

Bei den Materialien IPS e.max ZirCAD Prime und Nacera Pearl Q3 ist eine signifikant ( $p < 0,001$ ) vom Schichtungsgradienten abhängige Änderung der Opazität festzustellen. Zusätzlich zum Opazitätsverlauf weist das Material IPS e.max ZirCAD Prime eine statistisch signifikante ( $p < 0,001$ ) Änderung der Biegefestigkeit in Abhängigkeit der vertikalen Richtung auf. Bezüglich des Zusammenhanges zwischen der Opazität und der Biegefestigkeit verhalten sich die getesteten multilayer Zirkoniumdioxide ähnlich. Das Material Lithiumdisilikat grenzt sich durch eine geringere Opazität und geringere Biegefestigkeit von den Zirkoniumdioxiden ab. Des Weiteren hebt sich das Material priti Extra Translucent durch eine hohe Biegefestigkeit ab. Von den Firmen Kuraray Noritake Dental, pridentia und Ivoclar Vivadent wurden jeweils zwei Materialien getestet. Beim Vergleich der beiden Materialien der drei oben genannten Hersteller ist zu erkennen, dass eine größere Biegefestigkeit mit einer größeren Opazität

einhergeht. Die Materialien Cercon xt ML und Vita YZ XT Multicolor liegen hinsichtlich ihrer Biegefestigkeit und Opazität im Mittelfeld der getesteten Materialien. Das Material Lava Esthetic befindet sich im oberen Mittelfeld bezüglich der Biegefestigkeit.

Die Ergebnisse lassen schlussfolgern, dass multilayer Zirkoniumdioxide im Hinblick auf die Lichtdurchlässigkeit Lithiumdisilikat unterlegen sind. Der Nachteil einer geringeren Festigkeit von Lithiumdisilikat kann durch eine Erhöhung der Schichtstärke ausgeglichen werden, ohne große Verschlechterung der Lichtdurchlässigkeit hinnehmen zu müssen. Multilayer Zirkoniumdioxide haben ihren Vorteil in der Stabilität, wohingegen Lithiumdisilikat bei ästhetischen Indikationen ein besseres Ergebnis aufweist. Zusammenfassend ist zu sagen, dass multilayer Zirkoniumdioxide den Indikationsbereich zwischen den ästhetischen Lithiumdisilikaten und den stabileren, aber lichtundurchlässigeren Zirkoniumdioxiden schließen.

Verfärbte Stümpfe und die menschliche Wahrnehmung der Farben stellen im klinischen Alltag einen hier nicht berücksichtigten Einflussfaktor dar. In klinischen Studien ist zu klären, inwieweit eine erhöhte Lichtdurchlässigkeit die Ästhetik positiv beeinflussen kann. Des Weiteren spielt die Langzeitfestigkeit für das klinische Überleben einer Restauration eine weitere Rolle, die untersucht werden sollte. Zur genaueren Einschätzung und zum Vergleich der Ergebnisse wäre es interessant, einen direkten Vergleich der Opazitätsmessung mit Hilfe eines Mikrotiterplatten-Lesegerätes und eines Spektralphotometers durchzuführen.

## 8 Literaturverzeichnis

- Alao, A.-R., Stoll, R., Song, X.-F., Abbott, J. R., Zhang, Y., Abduo, J., & Yin, L. (2017). Fracture, roughness and phase transformation in CAD/CAM milling and subsequent surface treatments of lithium metasilicate/disilicate glass-ceramics. *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, *74*, 251–260.
- Arnold, B. (2019). *Zirkon, Zirkonium, Zirkonia - ähnliche Namen, verschiedene Materialien*. (1. Auflage 2019). Berlin: Springer Berlin; Springer Spektrum.
- Awad, D., Stawarczyk, B., Liebermann, A., & Ilie, N. (2015). Translucency of esthetic dental restorative CAD/CAM materials and composite resins with respect to thickness and surface roughness. *The Journal of prosthetic dentistry*, *113*(6), 534–540.
- Baldissara, P., Llukacej, A., Ciocca, L., Valandro, F. L., & Scotti, R. (2010). Translucency of zirconia copings made with different CAD/CAM systems. *The Journal of prosthetic dentistry*, *104*(1), 6–12.
- Bankoğlu Güngör, M., Yılmaz, H., Karakoca Nemli, S., Turhan Bal, B., & Aydın, C. (2015). Effect of surface treatments on the biaxial flexural strength, phase transformation, and surface roughness of bilayered porcelain/zirconia dental ceramics. *The Journal of prosthetic dentistry*, *113*(6), 585–595.
- Bargel, H.-J., & Schulze, G. (2018). *Werkstoffkunde*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Barizon, K. T. L., Bergeron, C., Vargas, M. A., Qian, F., Cobb, D. S., Gratton, D. G., & Geraldeli, S. (2013). Ceramic materials for porcelain veneers. Part I: Correlation between translucency parameters and contrast ratio. *The Journal of prosthetic dentistry*, *110*(5), 397–401.
- Barizon, K. T. L., Bergeron, C., Vargas, M. A., Qian, F., Cobb, D. S., Gratton, D. G., & Geraldeli, S. (2014). Ceramic materials for porcelain veneers: part II. Effect of material, shade, and thickness on translucency. *The Journal of prosthetic dentistry*, *112*(4), 864–870.
- Beuer, F., Stimmelmayer, M., Gueth, J.-F., Edelhoff, D., & Naumann, M. (2012). In vitro performance of full-contour zirconia single crowns. *Dental materials official publication of the Academy of Dental Materials*, *28*(4), 449–456.
- Brodgelt, R. H., O'Brien, W. J., & Fan, P. L. (1980). Translucency of dental porcelains. *Journal of dental research*, *59*(1), 70–75.



- Carter, C. B., & Norton, M. G. (2007). *Ceramic materials: Science and engineering*. New York, NY: Springer.
- Covacci, V., Bruzzese, N., Maccauro, G., Andreassi, C., Ricci, G. A., Piconi, C., Marmo, E., Burger, W., & Cittadini, A. (1999). In vitro evaluation of the mutagenic and carcinogenic power of high purity zirconia ceramic. *Biomaterials*, *20*(4), 371–376.
- Czichos, H., Skrotzki, B., & Simon, F.-G. (2014). *Das Ingenieurwissen: Werkstoffe*. SpringerLink. Berlin: Springer Vieweg.
- Della Bona, A., Pecho, O. E., & Alessandretti, R. (2015). Zirconia as a Dental Biomaterial. *Materials (Basel, Switzerland)*, *8*(8), 4978–4991.
- Deutsches Institut für Normung e. V. (Hrsg.) (1998). *DIN EN ISO 6872 – Dentalkeramik*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- Deutsches Institut für Normung e. V. (Hrsg.) (2016). *DIN EN ISO 25178-1: Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft - Teil 1: Angabe von Oberflächenbeschaffenheit*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- Erdelt, K., Pinheiro Dias Engler, M. L., Beuer, F., Güth, J.-F., Liebermann, A., & Schweiger, J. (2019). Computable translucency as a function of thickness in a multi-layered zirconia. *The Journal of prosthetic dentistry*, *121*(4), 683–689.
- Fischer, H., Schäfer, M., & Marx, R. (2003). Effect of surface roughness on flexural strength of veneer ceramics. *Journal of dental research*, *82*(12), 972–975.
- Fischer, J. (2009). *Mechanische Eigenschaften metallischer und keramischer Werkstoffe*: Quintessence Publishing.
- Fischer, J., Stawarczyk, B., & Hämmerle, C. H. F. (2008). Biegefestigkeit von Verblendkeramiken für Zirkoniumdioxid: hat die Prüfmethode einen Einfluss auf die Werte? *Quintessenz Zahntechnik*(34(9)).
- Gautam, C., Joyner, J., Gautam, A., Rao, J., & Vajtai, R. (2016). Zirconia based dental ceramics: structure, mechanical properties, biocompatibility and applications. *Dalton transactions (Cambridge, England 2003)*, *45*(48), 19194–19215.
- Heffernan, M. J., Aquilino, S. A., Diaz-Arnold, A. M., Haselton, D. R., Stanford, C. M., & Vargas, M. A. (2002). Relative translucency of six all-ceramic systems. Part I: Core materials. *The Journal of prosthetic dentistry*, *88*(1), 4–9.
- Hornbogen, E., Eggeler, G., & Werner, E. (2017). *Werkstoffe*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

- Ilie, N., & Stawarczyk, B. (2014). Quantification of the amount of light passing through zirconia: the effect of material shade, thickness, and curing conditions. *Journal of dentistry*, 42(6), 684–690.
- Jin, J., Takahashi, H., & Iwasaki, N. (2004). Effect of test method on flexural strength of recent dental ceramics. *Dental materials journal*, 23(4), 490–496.
- Johannes Boldt, Frank A. Spitznagel (2017). Lithiumdisilikat: Indikation und wissenschaftliche Evidenz: Deutscher Ärzteverlag | DZZ | Deutsche Zahnärztliche Zeitschrift | 2017; 72 (4). *Deutsche Zahnärztliche Zeitschrift*, 04/2017(72), 319–325.
- Johnston, W. M., Ma, T., & Kienle, B. H. (1995). Translucency parameter of colorants for maxillofacial prostheses. *The International journal of prosthodontics*, 8(1), 79–86.
- Kieschnick, A., Stawarczyk, B., & Rosentritt, M. (2019). Dentale Glaskeramiken: Kleine Werkstoffkunde für Zahnärzte - Teil 2. *Zahnärztliche Mitteilungen*, 04/2019(4), 1–2.
- Klinke, T., Bölter, H., & Biffar, R. (2018). Einfluss der Aufheizquotienten und der Haltezeit auf die Qualität der keramischen Sinterung. *Quintessenz Zahntechnik*, 44(6), 808–818.
- Kolakarnprasert, N., Kaizer, M. R., Kim, D. K., & Zhang, Y. (2019). New multi-layered zirconias: Composition, microstructure and translucency. *Dental materials official publication of the Academy of Dental Materials*, 35(5), 797–806.
- Kordaß, B., & Ruge, S. (2019a). Instrumentelle Okklusionsanalyse digital und analog - Aufgaben und Herausforderungen. *Teamwork Interdisziplinäres Journal für Prothetische Zahnheilkunde*(1), 30–39.
- Kordaß, B., & Ruge, S. (2019b). Lösungsansätze für einen virtuellen Artikulator. *wissen kompakt*, 13(1), 21–33.
- Kosmač, T., Oblak, C., Jevnikar, P., Funduk, N., & Marion, L. (1999). The effect of surface grinding and sandblasting on flexural strength and reliability of Y-TZP zirconia ceramic. *Dental Materials*, 15(6), 426–433.
- Kosmač, T., Oblak, č., Jevnikar, P., Funduk, N., & Marion, L. (2000). Strength and reliability of surface treated Y-TZP dental ceramics. *Journal of Biomedical Materials Research*, 53(4), 304–313.
- Kurtulmus-Yilmaz, S., & Ulusoy, M. (2014). Comparison of the translucency of shaded zirconia all-ceramic systems. *The journal of advanced prosthodontics*, 6(5), 415–422.

- Kwon, S. J., Lawson, N. C., McLaren, E. E., Nejat, A. H., & Burgess, J. O. (2018). Comparison of the mechanical properties of translucent zirconia and lithium disilicate. *The Journal of prosthetic dentistry*, *120*(1), 132–137.
- Lohbauer, U., Müller, F. A., & Petschelt, A. (2008). Influence of surface roughness on mechanical strength of resin composite versus glass ceramic materials. *Dental Materials*, *24*(2), 250–256.
- Ludwig, K., & Biffar, R. (Eds.) (2005). *Lexikon der zahnmedizinischen Werkstoffkunde*. Quintessenz-Bibliothek. Berlin: Quintessenz-Verl.
- Marxkors, R., & Meiners, H. (2001). *Taschenbuch der zahnärztlichen Werkstoffkunde*. (5., neu bearb. Aufl.). Köln: Dt. Zahnärzte-Verl. DÄV-Hanser.
- Michailova, M., Elsayed, A., Fabel, G., Edelhoff, D., Zylla, I.-M., & Stawarczyk, B. (2020). Comparison between novel strength-gradient and color-gradient multilayered zirconia using conventional and high-speed sintering. *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, *111*, 1–8.
- Miyagawa, Y., Powers, J. M., & O'Brien, W. J. (1981). Optical properties of direct restorative materials. *Journal of dental research*, *60*(5), 890–894.
- Nevarez-Rascon, A., González-Lopez, S., Acosta-Torres, L. S., Nevarez-Rascon, M. M., & Orrantia-Borunda, E. (2016). Synthesis, biocompatibility and mechanical properties of ZrO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramics composites. *Dental materials journal*, *35*(3), 392–398.
- O'Neil, M. J. (Ed.) (2006). *The Merck index: An encyclopedia of chemicals, drugs, and biologicals*. (14. ed.). Merck handbooks. Whitehouse Station, NJ: Merck.
- P. Pospiech (2014). Materialien für die CAD/CAM-Technik: Die Qual der Wahl Fachgebiete. *ZMK*, *05/2014*(30), 250–256.
- Rösler, J., Harders, H., & Bäker, M. (2016). *Mechanisches Verhalten der Werkstoffe*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Schmitter, M. (2012). Lösung des Chippingproblems durch CAD/CAM-Technologie. [https://www.zmk-aktuell.de/fachgebiete/digitale-praxis/story/loesung-des-chippingproblems-durch-cadcam-technologie\\_\\_753.html](https://www.zmk-aktuell.de/fachgebiete/digitale-praxis/story/loesung-des-chippingproblems-durch-cadcam-technologie__753.html). Accessed 06.08.2020.
- Sen, N., & Us, Y. O. (2018). Mechanical and optical properties of monolithic CAD-CAM restorative materials. *The Journal of prosthetic dentistry*, *119*(4), 593–599.

- Smith, P. W., & Wilson, N. H. (1998). Shade selection for single-unit anterior metal ceramic crowns: a 5-year retrospective study of 2,500 cases. *The International journal of prosthodontics*, 11(4), 302–306.
- Stawarczyk, B. (2018). Werkstoffkunde-Update: Zirkonoxid und seine Generationen – von verblendet bis monolithisch - Quintessence News: Zirkonoxid-Keramik: Gegenwart und Zukunft. <https://www.quintessenz-news.de/werkstoffkunde-update-zirkonoxid-und-seine-generationen-von-verblendet-bis-monolithisch/>. Accessed 25.06.2020.
- Stawarczyk, B., Keul, C., Eichberger, M., Figge, D., Edelhoff, D., & Lümke, N. (2017). Three generations of zirconia: From veneered to monolithic. Part I. *Quintessence international (Berlin, Germany 1985)*, 48(5), 369–380.
- Ströer, F., Seewig, J., & Depiereux, F. (2014). Rauheitsmessung taktil oder optisch?: Vergleichbare Ergebnisse. *Qualität und Zuverlässigkeit*, 05/2014(5), 70–72.
- Tan, Ö. (2016). Rauheit berührungslos messen. *JOT Journal für Oberflächentechnik*, 56(12), 50–52.
- Ueda, K., Güth, J.-F., Erdelt, K., Stimmelmayer, M., Kappert, H., & Beuer, F. (2015). Light transmittance by a multi-coloured zirconia material. *Dental materials journal*, 34(3), 310–314.
- Vichi, A., Carrabba, M., Paravina, R., & Ferrari, M. (2014). Translucency of ceramic materials for CEREC CAD/CAM system. *Journal of esthetic and restorative dentistry official publication of the American Academy of Esthetic Dentistry ... [et al.]*, 26(4), 224–231.
- Wallodi Weibull (1951). A Statistical Distribution Function of Wide Applicability. *ASME Journal of Applied Mechanics*, 1951(18), 293–297.
- Wendler, M., Belli, R., Valladares, D., Petschelt, A., & Lohbauer, U. (2018). Chairside CAD/CAM materials. Part 3: Cyclic fatigue parameters and lifetime predictions. *Dental materials official publication of the Academy of Dental Materials*, 34(6), 910–921.
- Werling, G., & Werling, U. (2011). Lithiumdisilikat, die unbemerkte Revolution in der Vollkeramik? Teil 2. *Zahnheilkunde Management Kultur*, 05/2011, 1–9.
- Zhang, H., Kim, B.-N., Morita, K., Keijiro Hiraga, H. Y., & Sakka, Y. (2011). Effect of sintering temperature on optical properties and microstructure of translucent zirconia prepared by high-pressure spark plasma sintering. *Science and technology of advanced materials*, 12(5), 55003.

## 9 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Chemische Einteilung der dentalen Keramiken (P. Pospiech, 2014).....	2
Abb. 2: Profilometer auf aktivem Schwingungsisolationsystem .....	10
Abb. 3: 96-Well Mikrotiterplatte mit den Prüfkörpern eines Materials (links) .....	11
Abb. 4: Mikrotiterplatten-Lesegerät (rechts).....	11
Abb. 5: Universalprüfmaschine mit eingespanntem Prüfwerkzeug .....	11
Abb. 6: Aufteilung der Prüfkörper .....	13
Abb. 7: Schematische Darstellung einer Ronde mit den Prüfkörperrohlingen und den darin enthaltenen Prüfkörpern von seitlicher Ansicht .....	14
Abb. 8: Brennträger mit ungesinterten Prüfkörpern .....	15
Abb. 9: Probenhalter mit eingespannter Probe, welche markiert wurde, um sie um 90° drehen zu können. ....	16
Abb. 10: Bauplan des Prüftisches, alle Angaben in mm, A: Schnittebene der Seitenaufsicht. ....	17
Abb. 11: 3D Modell des Stempels .....	18
Abb. 12: Prüftisch mit Zentrierring und Probe.....	18
Abb. 13: Erklärung des Box-Plot Diagramms .....	19
Abb. 14: Box-Plot-Diagramm der Opazität der Prüfkörper bei 0,50 mm Schichtstärke .....	20
Abb. 15: Box-Plot-Diagramm der Opazität der Prüfkörper bei 0,75 mm Schichtstärke .....	20
Abb. 16: Box-Plot-Diagramm der Opazität der Prüfkörper bei 1,00 mm Schichtstärke .....	21
Abb. 17: Box-Plot-Diagramm der Opazität von Katana STML bei 0,50 mm Schichtstärke (links) .....	22
Abb. 18: Box-Plot-Diagramm der Opazität von Katana UTML bei 0,50 mm Schichtstärke (rechts) .....	22
Abb. 19: Box-Plot-Diagramm der Opazität von Katana STML bei 0,75 mm Schichtstärke (links) .....	22
Abb. 20: Box-Plot-Diagramm der Opazität von Katana UTML bei 0,50 mm Schichtstärke (rechts) .....	22
Abb. 21: Box-Plot-Diagramm der Opazität von Katana STML bei 1,00 mm Schichtstärke (links) .....	22
Abb. 22: Box-Plot-Diagramm der Opazität von Katana UTML bei 1,00 mm Schichtstärke (rechts) .....	22

Abb. 23: Box-Plot-Diagramm der Opazität von Lava Esthetic bei 0,50 mm Schichtstärke (links)	23
Abb. 24: Box-Plot-Diagramm der Opazität von Cercon xt ML bei 0,50 mm Schichtstärke (rechts)	23
Abb. 25: Box-Plot-Diagramm der Opazität von Lava Esthetic bei 0,75 mm Schichtstärke (links)	23
Abb. 26: Box-Plot-Diagramm der Opazität von Cercon xt ML bei 0,75 mm Schichtstärke (rechts)	23
Abb. 27: Box-Plot-Diagramm der Opazität von Lava Esthetic bei 1,00 mm Schichtstärke (links)	23
Abb. 28: Box-Plot-Diagramm der Opazität von Cercon xt ML bei 1,00 mm Schichtstärke (rechts)	23
Abb. 29: Box-Plot-Diagramm der Opazität von priti High Translucent bei 0,50 mm Schichtstärke (links)	24
Abb. 30: Box-Plot-Diagramm der Opazität von priti Extra Translucent bei 0,50 mm Schichtstärke (rechts)	24
Abb. 31: Box-Plot-Diagramm der Opazität von priti High Translucent bei 0,75 mm Schichtstärke (links)	24
Abb. 32: Box-Plot-Diagramm der Opazität von priti Extra Translucent bei 0,75 mm Schichtstärke (rechts)	24
Abb. 33: Box-Plot-Diagramm der Opazität von priti High Translucent bei 1,00 mm Schichtstärke (links)	24
Abb. 34: Box-Plot-Diagramm der Opazität von priti Extra Translucent bei 1,00 mm Schichtstärke (rechts)	24
Abb. 35: Box-Plot-Diagramm der Opazität von Vita YZ XT Multicolor bei 0,50 mm Schichtstärke (links)	25
Abb. 36: Box-Plot-Diagramm der Opazität von Nacera Pearl Q3 bei 0,50 mm Schichtstärke (rechts)	25
Abb. 37: Box-Plot-Diagramm der Opazität von Vita YZ XT Multicolor bei 0,75 mm Schichtstärke (links)	25
Abb. 38: Box-Plot-Diagramm der Opazität von Nacera Pearl Q3 bei 0,75 mm Schichtstärke (rechts)	25

Abb. 39: Box-Plot-Diagramm der Opazität von Vita YZ XT Multicolor bei 1,00 mm Schichtstärke (links) .....	25
Abb. 40: Box-Plot-Diagramm der Opazität von Nacera Pearl Q3 bei 1,00 mm Schichtstärke (rechts) .....	25
Abb. 41: Box-Plot-Diagramm der Opazität von IPS e.max ZirCAD Prime bei 0,50 mm Schichtstärke (links).....	26
Abb. 42: Box-Plot-Diagramm der Opazität von IPS e.max CAD LT bei 0,50 mm Schichtstärke (rechts) .....	26
Abb. 43: Box-Plot-Diagramm der Opazität von IPS e.max ZirCAD Prime bei 0,75 mm Schichtstärke (links).....	26
Abb. 44: Box-Plot-Diagramm der Opazität von IPS e.max CAD LT bei 0,75 mm Schichtstärke (rechts) .....	26
Abb. 45: Box-Plot-Diagramm der Opazität von IPS e.max ZirCAD Prime bei 1,00 mm Schichtstärke (links).....	26
Abb. 46: Box-Plot-Diagramm der Opazität von IPS e.max CAD LT bei 1,00 mm Schichtstärke (rechts) .....	26
Abb. 47: Box-Plot-Diagramm der Biegefestigkeit [MPa] der Prüfkörper bei 0,50 mm Schichtstärke .....	28
Abb. 48: Box-Plot-Diagramm der Biegefestigkeit [MPa] der Prüfkörper bei 0,75 mm Schichtstärke .....	28
Abb. 49: Box-Plot-Diagramm der Biegefestigkeit [MPa] der Prüfkörper bei 1,00 mm Schichtstärke .....	29
Abb. 50: Box-Plot-Diagramm der Biegefestigkeit [MPa] von Katana STML bei 0,50 mm Schichtstärke (links).....	30
Abb. 51: Box-Plot-Diagramm der Biegefestigkeit [MPa] von Katana UTML bei 0,50 mm Schichtstärke (rechts).....	30
Abb. 52: Box-Plot-Diagramm der Biegefestigkeit [MPa] von Katana STML bei 0,75 mm Schichtstärke (links).....	30
Abb. 53: Box-Plot-Diagramm der Biegefestigkeit [MPa] von Katana UTML bei 0,75 mm Schichtstärke (rechts).....	30
Abb. 54: Box-Plot-Diagramm der Biegefestigkeit [MPa] von Katana STML bei 1,00 mm Schichtstärke (links).....	30

Abb. 55: Box-Plot-Diagramm der Biegefestigkeit [MPa] von Katana UTML bei 1,00 mm Schichtstärke (rechts).....	30
Abb. 56: Box-Plot-Diagramm der Biegefestigkeit [MPa] von Lava Esthetic bei 0,50 mm Schichtstärke (links).....	31
Abb. 57: Box-Plot-Diagramm der Biegefestigkeit [MPa] von Cercon xt ML bei 0,50 mm Schichtstärke (rechts).....	31
Abb. 58: Box-Plot-Diagramm der Biegefestigkeit [MPa] von Lava Esthetic bei 0,75 mm Schichtstärke (links).....	31
Abb. 59: Box-Plot-Diagramm der Biegefestigkeit [MPa] von Cercon xt ML bei 0,75 mm Schichtstärke (rechts).....	31
Abb. 60: Box-Plot-Diagramm der Biegefestigkeit [MPa] von Lava Esthetic bei 1,00 mm Schichtstärke (links).....	31
Abb. 61: Box-Plot-Diagramm der Biegefestigkeit [MPa] von Cercon xt ML bei 1,00 mm Schichtstärke (rechts).....	31
Abb. 62: Box-Plot-Diagramm der Biegefestigkeit [MPa] von priti High Translucent bei 0,50 mm Schichtstärke (links).....	32
Abb. 63: Box-Plot-Diagramm der Biegefestigkeit [MPa] von priti Extra Translucent bei 0,50 mm Schichtstärke (rechts).....	32
Abb. 64: Box-Plot-Diagramm der Biegefestigkeit [MPa] von priti High Translucent bei 0,75 mm Schichtstärke (links).....	32
Abb. 65: Box-Plot-Diagramm der Biegefestigkeit [MPa] von priti Extra Translucent bei 0,75 mm Schichtstärke (rechts).....	32
Abb. 66: Box-Plot-Diagramm der Biegefestigkeit [MPa] von priti High Translucent bei 1,00 mm Schichtstärke (links).....	32
Abb. 67: Box-Plot-Diagramm der Biegefestigkeit [MPa] von priti Extra Translucent bei 1,00 mm Schichtstärke (rechts).....	32
Abb. 68: Box-Plot-Diagramm der Biegefestigkeit [MPa] von Vita YZ XT Multicolor bei 0,50 mm Schichtstärke (links).....	33
Abb. 69: Box-Plot-Diagramm der Biegefestigkeit [MPa] von Nacera Pearl Q3 bei 0,50 mm Schichtstärke (rechts).....	33
Abb. 70: Box-Plot-Diagramm der Biegefestigkeit [MPa] von Vita YZ XT Multicolor bei 0,75 mm Schichtstärke (links).....	33



Abb. 71: Box-Plot-Diagramm der Biegefestigkeit [MPa] von Nacera Pearl Q3 bei 0,75 mm Schichtstärke (rechts).....	33
Abb. 72: Box-Plot-Diagramm der Biegefestigkeit [MPa] von Vita YZ XT Multicolor bei 0,75 mm Schichtstärke (links).....	33
Abb. 73: Box-Plot-Diagramm der Biegefestigkeit [MPa] von Nacera Pearl Q3 bei 0,75 mm Schichtstärke (rechts).....	33
Abb. 74: Box-Plot-Diagramm der Biegefestigkeit [MPa] von IPS e.max ZirCAD Prime bei 0,50 mm Schichtstärke (links) .....	34
Abb. 75: Box-Plot-Diagramm der Biegefestigkeit [MPa] von IPS e.max CAD LT bei 0,50 mm Schichtstärke (rechts).....	34
Abb. 76: Box-Plot-Diagramm der Biegefestigkeit [MPa] von IPS e.max ZirCAD Prime bei 0,75 mm Schichtstärke (links) .....	34
Abb. 77: Box-Plot-Diagramm der Biegefestigkeit [MPa] von IPS e.max CAD LT bei 0,75 mm Schichtstärke (rechts).....	34
Abb. 78: Box-Plot-Diagramm der Biegefestigkeit [MPa] von IPS e.max ZirCAD Prime bei 1,00 mm Schichtstärke (links) .....	34
Abb. 79: Box-Plot-Diagramm der Biegefestigkeit [MPa] von IPS e.max CAD LT bei 1,00 mm Schichtstärke (rechts).....	34
Abb. 80: Zusammenhang zwischen Opazität und Gesamtbruchlast [N] bei jedem Prüfkörper .....	36
Abb. 81: Zusammenhang zwischen mittlerer Opazität und mittlerer Gesamtbruchlast [N] bei 0,50 mm Schichtstärke ( $\Delta$ ), 0,75 mm Schichtstärke ( $\diamond$ ) und 1,00 mm Schichtstärke (o) .....	37
Abb. 82: Zusammenhang zwischen mittlerer Opazität und mittlerer Biegefestigkeit [MPa] pro Ebene bei 0,50 mm Schichtstärke ( $\Delta$ ), 0,75 mm Schichtstärke ( $\diamond$ ) und 1,00 mm Schichtstärke (o) .....	38
Abb. 83: Zusammenhang zwischen mittlerer Opazität und mittlerer Biegefestigkeit [MPa] pro Material bei 0,50 mm Schichtstärke ( $\Delta$ ), 0,75 mm Schichtstärke ( $\diamond$ ) und 1,00 mm Schichtstärke (o) .....	39
Abb. 84: Mittlere arithmetische Höhe [ $\mu\text{m}$ ] der verschiedenen Materialien.....	40
Abb. 85: Zusammenhang zwischen Opazität und Gesamtbruchlast [N] von Katana STML bei jedem Prüfkörper .....	62

Abb. 86: Zusammenhang zwischen Opazität und Gesamtbruchlast [N] von Katana UTML bei jedem Prüfkörper .....	62
Abb. 87: Zusammenhang zwischen Opazität und Gesamtbruchlast [N] von Lava Esthetic bei jedem Prüfkörper .....	63
Abb. 88: Zusammenhang zwischen Opazität und Gesamtbruchlast [N] von Cercon xt ML bei jedem Prüfkörper .....	63
Abb. 89: Zusammenhang zwischen Opazität und Gesamtbruchlast [N] von priti High Translucent bei jedem Prüfkörper .....	64
Abb. 90: Zusammenhang zwischen Opazität und Gesamtbruchlast [N] von priti Extra Translucent bei jedem Prüfkörper .....	64
Abb. 91: Zusammenhang zwischen Opazität und Gesamtbruchlast [N] von Vita YZ XT Multicolor bei jedem Prüfkörper .....	65
Abb. 92: Zusammenhang zwischen Opazität und Gesamtbruchlast [N] von Nacera Pearl Q3 bei jedem Prüfkörper .....	65
Abb. 93: Zusammenhang zwischen Opazität und Gesamtbruchlast [N] von IPS e.max ZirCAD Prime bei jedem Prüfkörper .....	66
Abb. 94: Zusammenhang zwischen Opazität und Gesamtbruchlast [N] von IPS e.max CAD LT bei jedem Prüfkörper .....	66
Abb. 95: Zusammenhang zwischen mittlerer Opazität und mittlerer Biegefestigkeit [MPa] von Katana STML pro Ebene bei 0,50 mm Schichtstärke ( $\Delta$ ), 0,75 mm Schichtstärke ( $\diamond$ ) und 1,00 mm Schichtstärke ( $\circ$ ) .....	67
Abb. 96: Zusammenhang zwischen mittlerer Opazität und mittlerer Biegefestigkeit [MPa] von Katana UTML pro Ebene bei 0,50 mm Schichtstärke ( $\Delta$ ), 0,75 mm Schichtstärke ( $\diamond$ ) und 1,00 mm Schichtstärke ( $\circ$ ) .....	67
Abb. 97: Zusammenhang zwischen mittlerer Opazität und mittlerer Biegefestigkeit [MPa] von Lava Esthetic pro Ebene bei 0,50 mm Schichtstärke ( $\Delta$ ), 0,75 mm Schichtstärke ( $\diamond$ ) und 1,00 mm Schichtstärke ( $\circ$ ) .....	68
Abb. 98: Zusammenhang zwischen mittlerer Opazität und mittlerer Biegefestigkeit [MPa] von Cercon xt ML pro Ebene bei 0,50 mm Schichtstärke ( $\Delta$ ), 0,75 mm Schichtstärke ( $\diamond$ ) und 1,00 mm Schichtstärke ( $\circ$ ) .....	68

Abb. 99: Zusammenhang zwischen mittlerer Opazität und mittlerer Biegefestigkeit [MPa] von priti High Translucent pro Ebene bei 0,50 mm Schichtstärke ( $\Delta$ ), 0,75 mm Schichtstärke ( $\diamond$ ) und 1,00 mm Schichtstärke (o) .....	69
Abb. 100: Zusammenhang zwischen mittlerer Opazität und mittlerer Biegefestigkeit [MPa] von priti Extra Translucent pro Ebene bei 0,50 mm Schichtstärke ( $\Delta$ ), 0,75 mm Schichtstärke ( $\diamond$ ) und 1,00 mm Schichtstärke (o) .....	69
Abb. 101: Zusammenhang zwischen mittlerer Opazität und mittlerer Biegefestigkeit [MPa] von Vita YZ XT Multicolor pro Ebene bei 0,50 mm Schichtstärke ( $\Delta$ ), 0,75 mm Schichtstärke ( $\diamond$ ) und 1,00 mm Schichtstärke (o) .....	70
Abb. 102: Zusammenhang zwischen mittlerer Opazität und mittlerer Biegefestigkeit [MPa] von Nacera Pearl Q3 pro Ebene bei 0,50 mm Schichtstärke ( $\Delta$ ), 0,75 mm Schichtstärke ( $\diamond$ ) und 1,00 mm Schichtstärke (o) .....	70
Abb. 103: Zusammenhang zwischen mittlerer Opazität und mittlerer Biegefestigkeit [MPa] von IPS e.max ZirCAD pro Ebene bei 0,50 mm Schichtstärke ( $\Delta$ ), 0,75 mm Schichtstärke ( $\diamond$ ) und 1,00 mm Schichtstärke (o) .....	71
Abb. 104: Zusammenhang zwischen mittlerer Opazität und mittlerer Biegefestigkeit [MPa] von IPS e.max CAD LT pro Ebene bei 0,50 mm Schichtstärke ( $\Delta$ ), 0,75 mm Schichtstärke ( $\diamond$ ) und 1,00 mm Schichtstärke (o) .....	71
Abb. 105: Schichtstärke [mm] von IPS e.max ZirCAD Prime bei 0,50 mm Schichtstärke (links) .....	72
Abb. 106: Schichtstärke [mm] von Nacera Pearl Q3 bei 0,50 mm Schichtstärke (rechts).....	72
Abb. 107: Schichtstärke [mm] von IPS e.max ZirCAD Prime bei 0,75 mm Schichtstärke (links) .....	72
Abb. 108: Schichtstärke [mm] von Nacera Pearl Q3 bei 0,75 mm Schichtstärke (rechts).....	72
Abb. 109: Schichtstärke [mm] von IPS e.max ZirCAD Prime bei 1,00 mm Schichtstärke (links) .....	72
Abb. 110: Schichtstärke [mm] von Nacera Pearl Q3 bei 1,00 mm Schichtstärke (recht) .....	72

## 10 Anhang

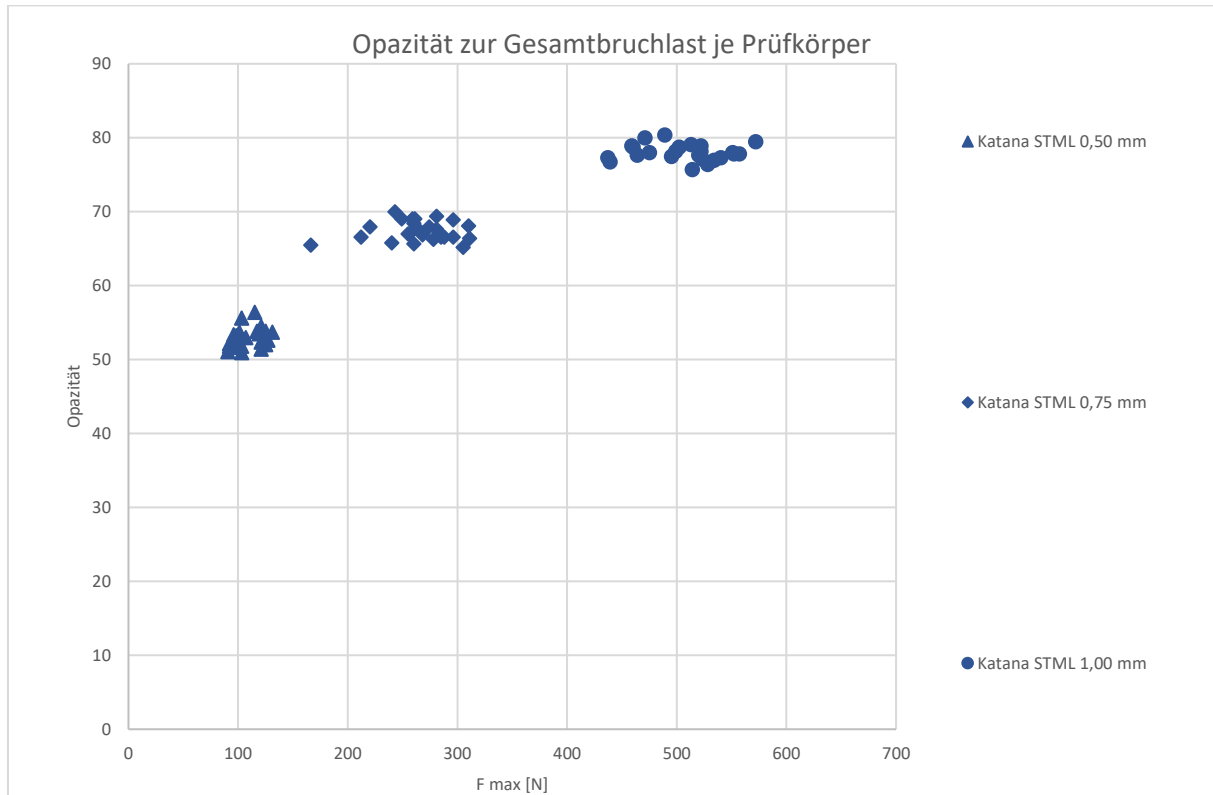


Abb. 85: Zusammenhang zwischen Opazität und Gesamtbruchlast [N] von Katana STML bei jedem Prüfkörper

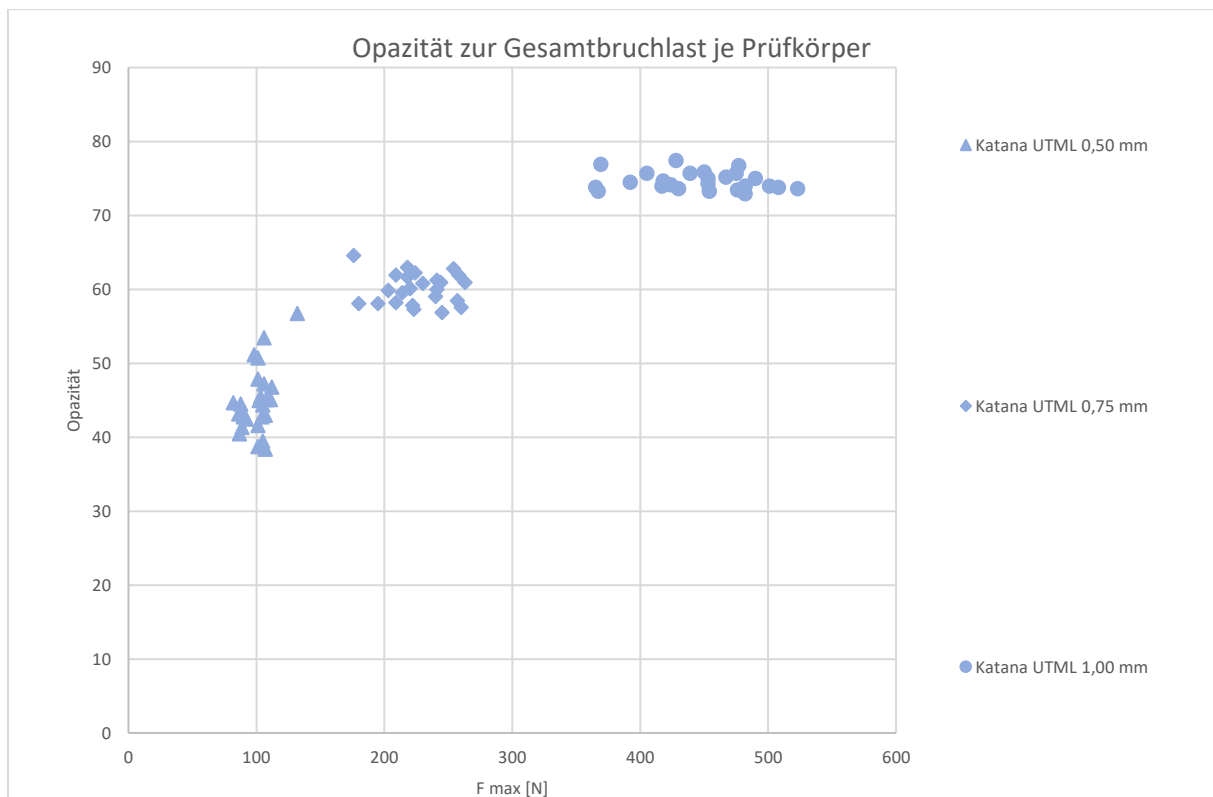


Abb. 86: Zusammenhang zwischen Opazität und Gesamtbruchlast [N] von Katana UTML bei jedem Prüfkörper

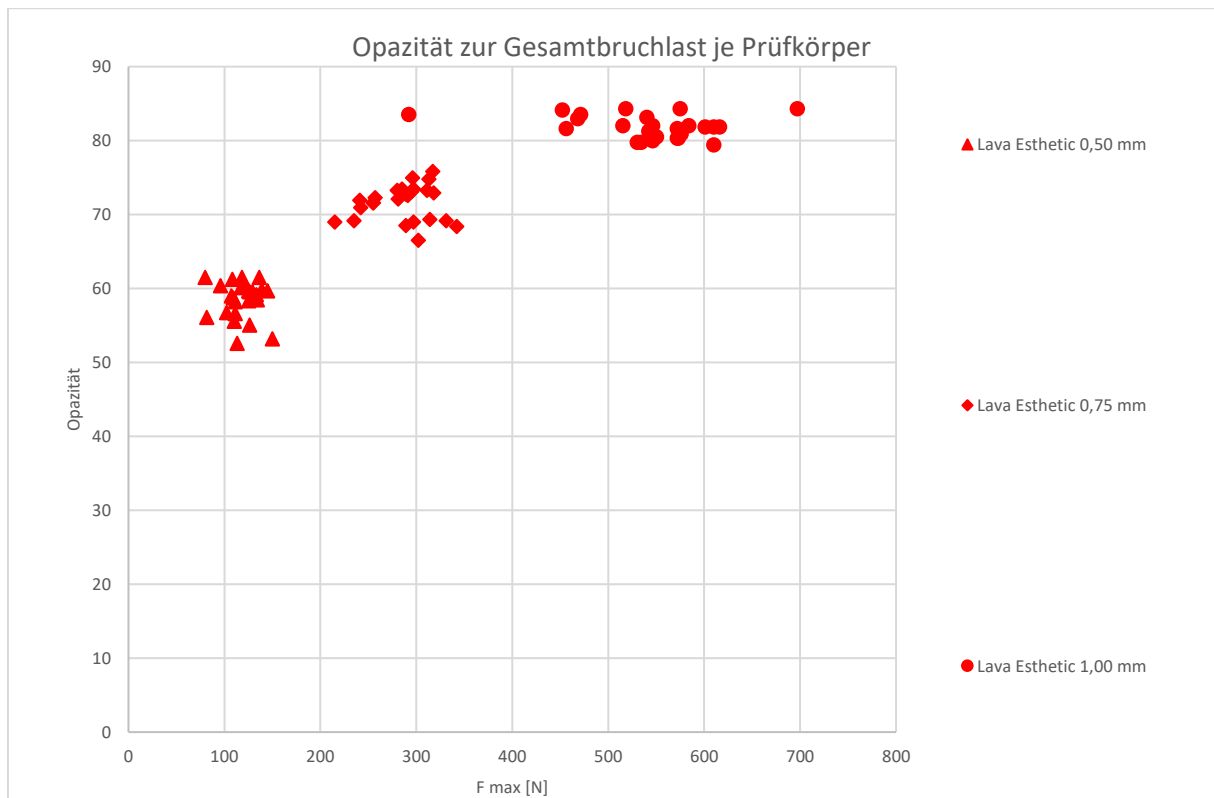


Abb. 87: Zusammenhang zwischen Opazität und Gesamtbruchlast [N] von Lava Esthetic bei jedem Prüfkörper

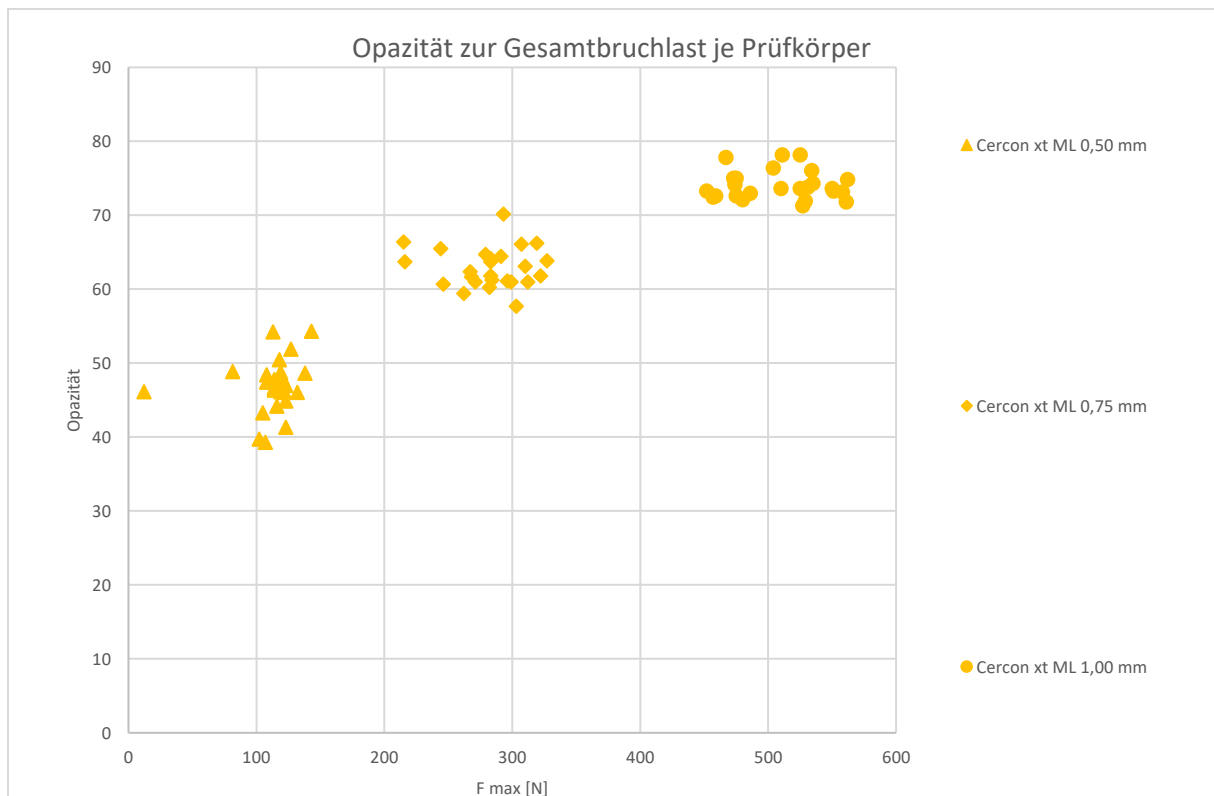


Abb. 88: Zusammenhang zwischen Opazität und Gesamtbruchlast [N] von Cercon xt ML bei jedem Prüfkörper

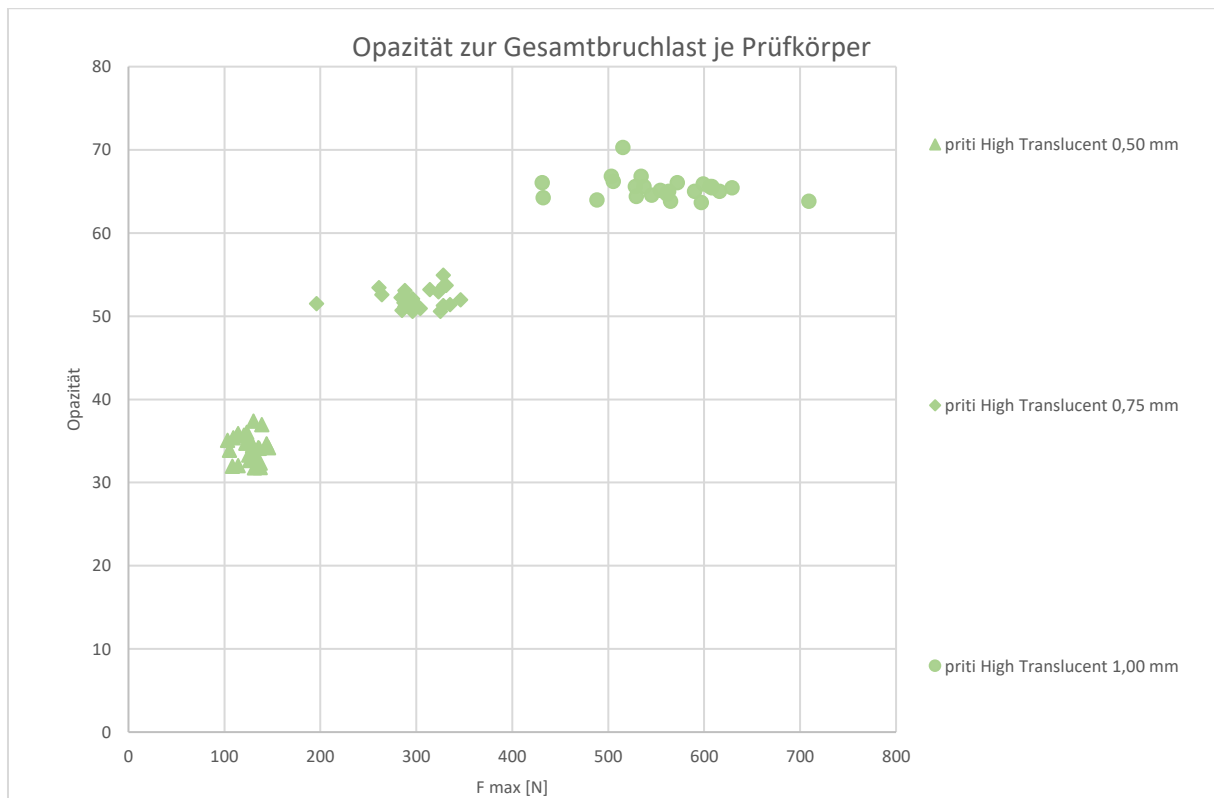


Abb. 89: Zusammenhang zwischen Opazität und Gesamtbruchlast [N] von priti High Translucent bei jedem Prüfkörper

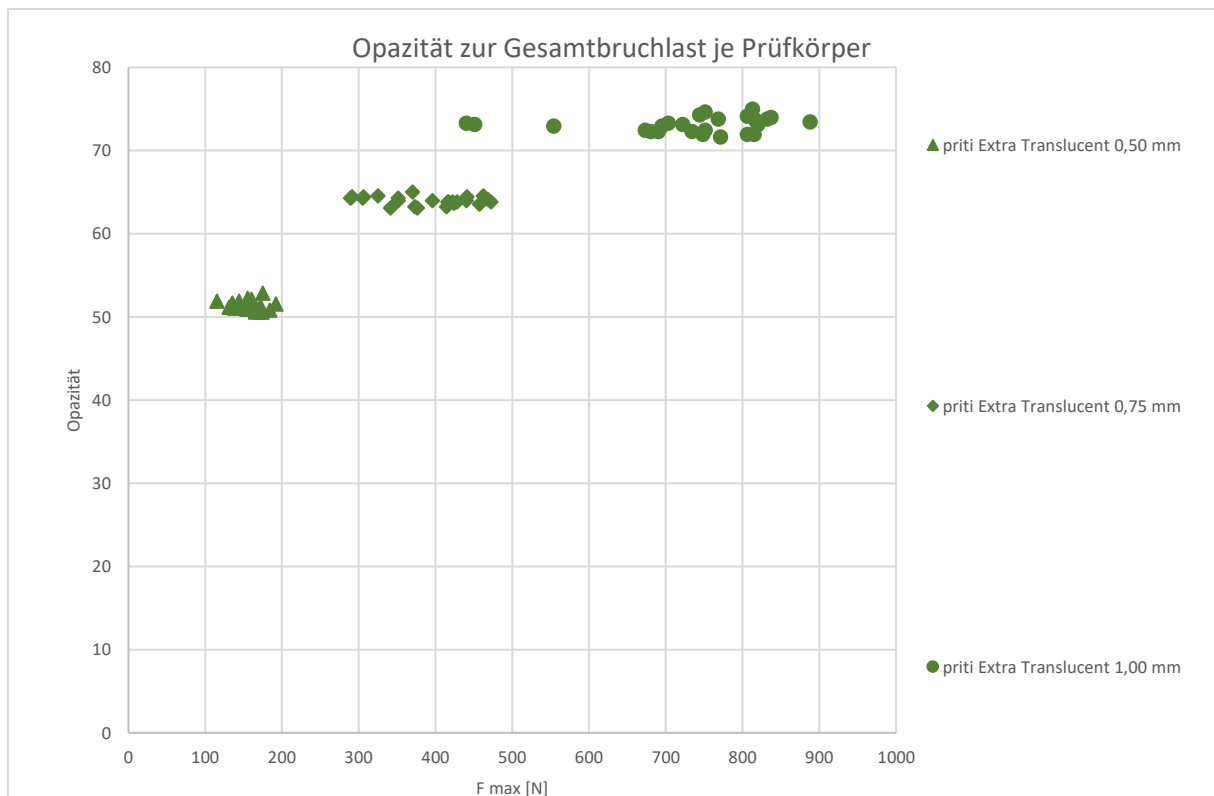


Abb. 90: Zusammenhang zwischen Opazität und Gesamtbruchlast [N] von priti Extra Translucent bei jedem Prüfkörper

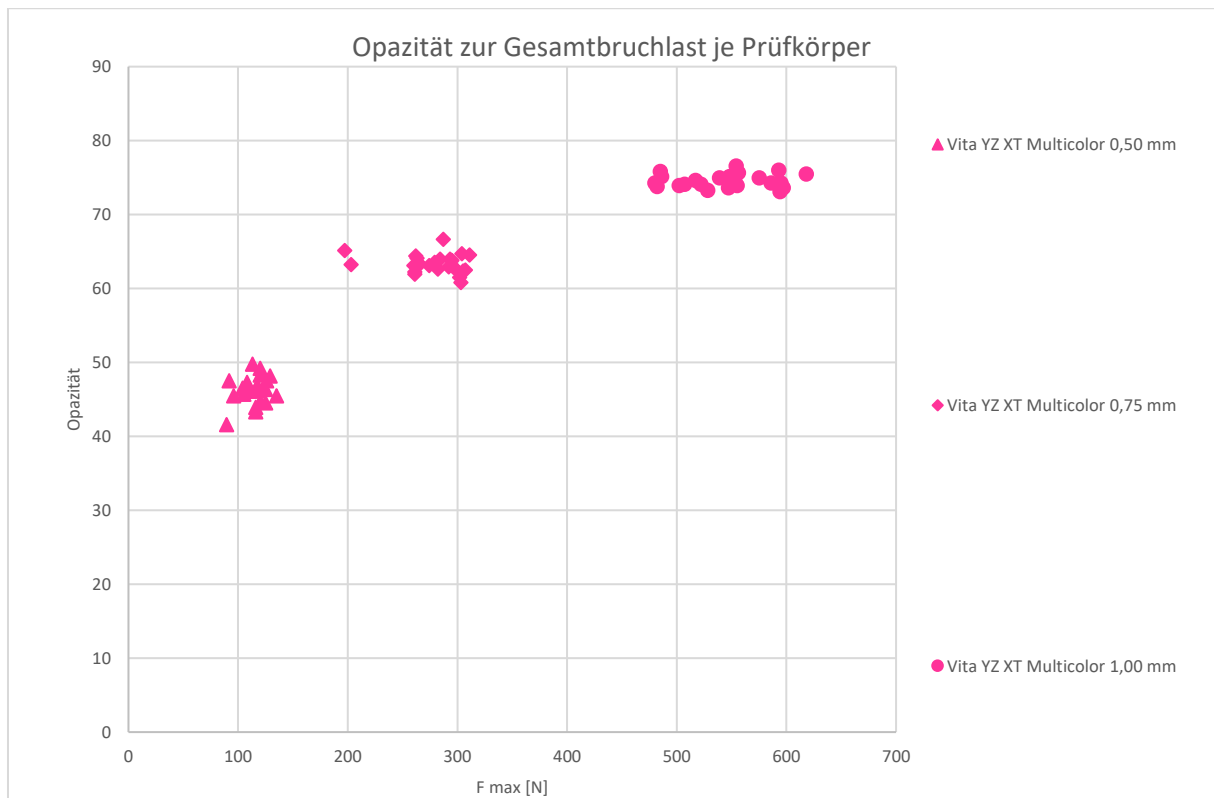


Abb. 91: Zusammenhang zwischen Opazität und Gesamtbruchlast [N] von Vita YZ XT Multicolor bei jedem Prüfkörper

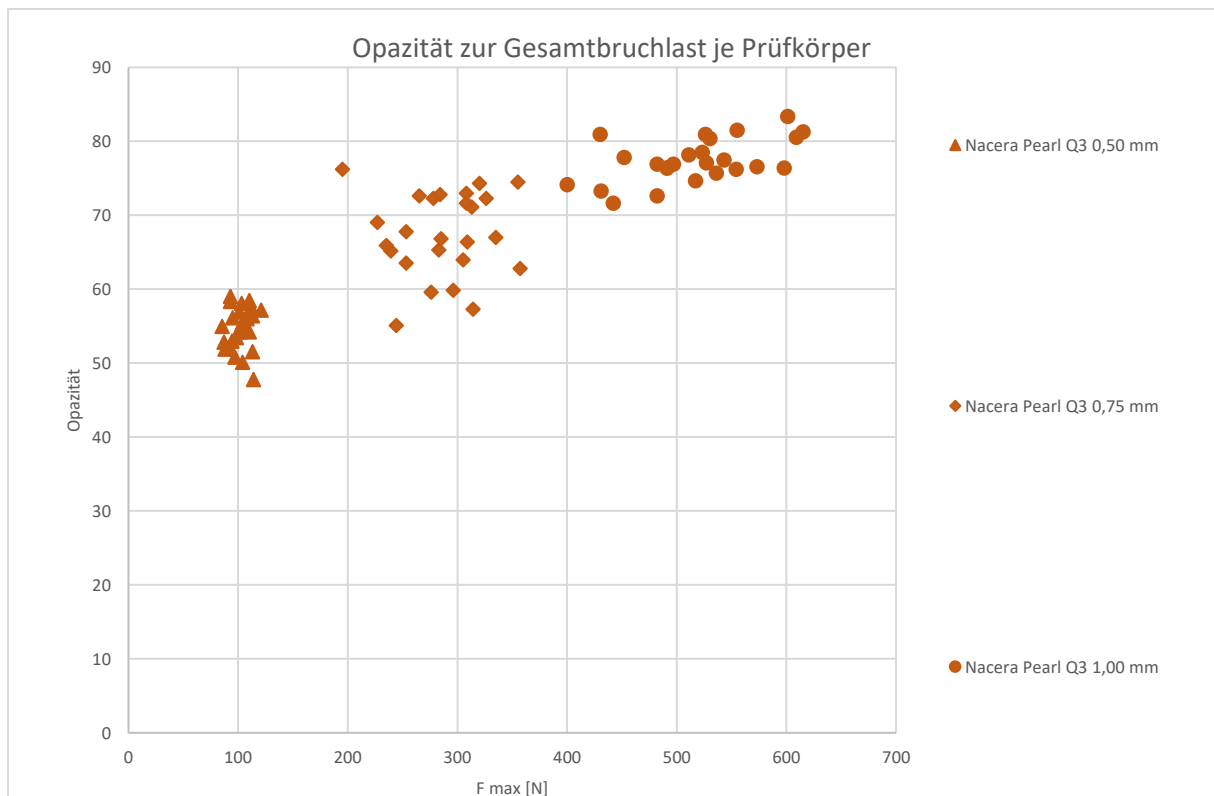


Abb. 92: Zusammenhang zwischen Opazität und Gesamtbruchlast [N] von Nacera Pearl Q3 bei jedem Prüfkörper

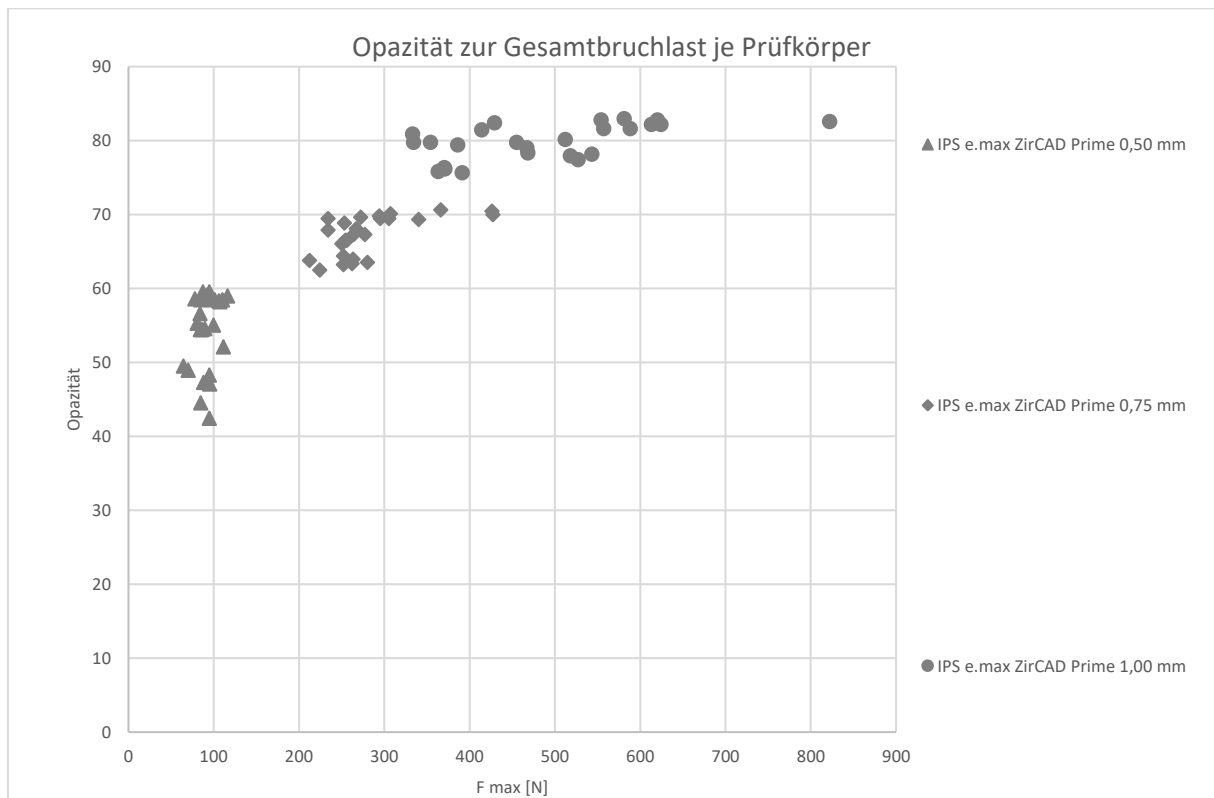


Abb. 93: Zusammenhang zwischen Opazität und Gesamtbruchlast [N] von IPS e.max ZirCAD Prime bei jedem Prüfkörper

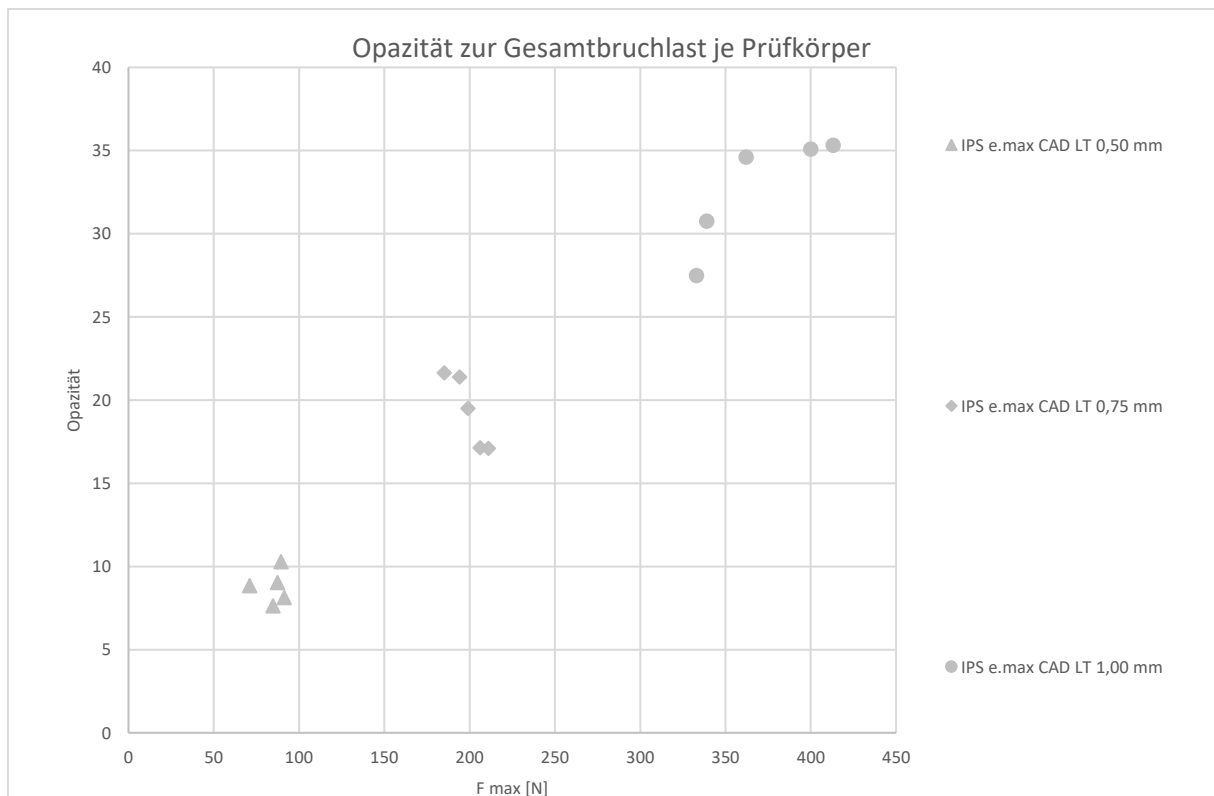


Abb. 94: Zusammenhang zwischen Opazität und Gesamtbruchlast [N] von IPS e.max CAD LT bei jedem Prüfkörper



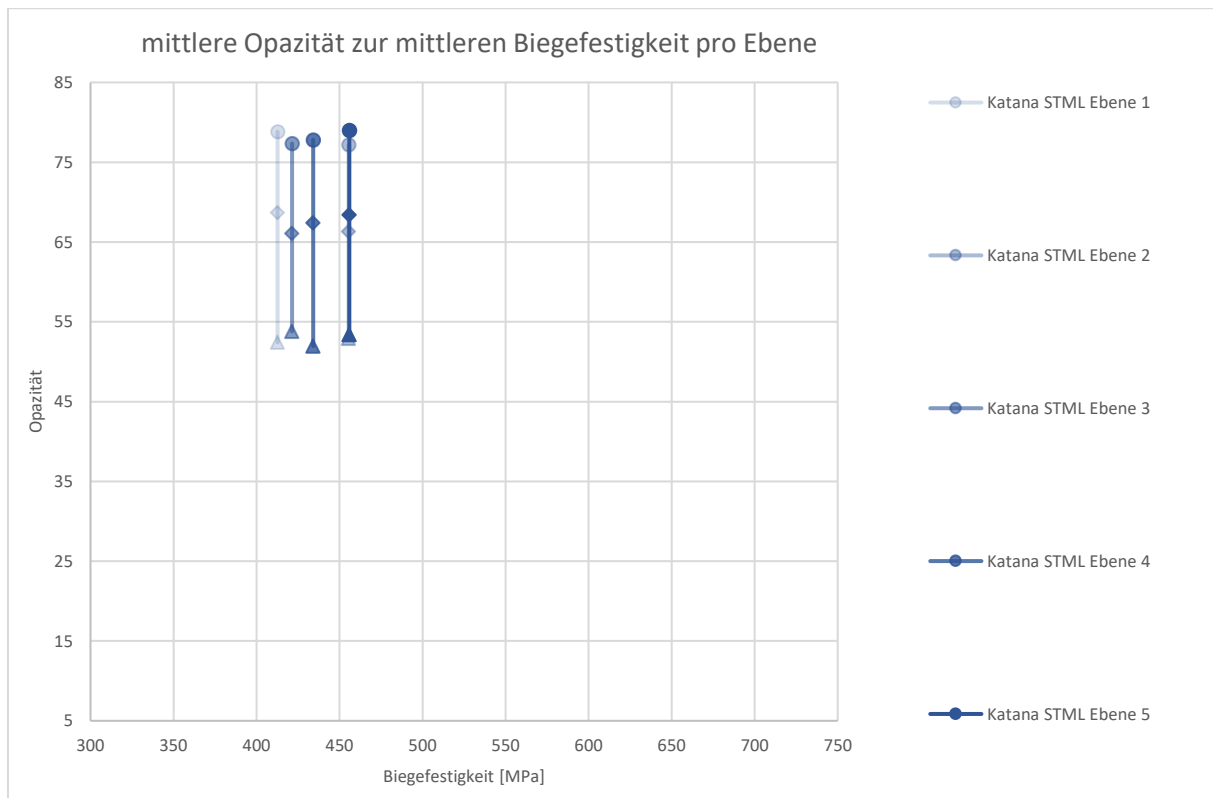


Abb. 95: Zusammenhang zwischen mittlerer Opazität und mittlerer Biegefestigkeit [MPa] von Katana STML pro Ebene bei 0,50 mm Schichtstärke (Δ), 0,75 mm Schichtstärke (◊) und 1,00 mm Schichtstärke (○)

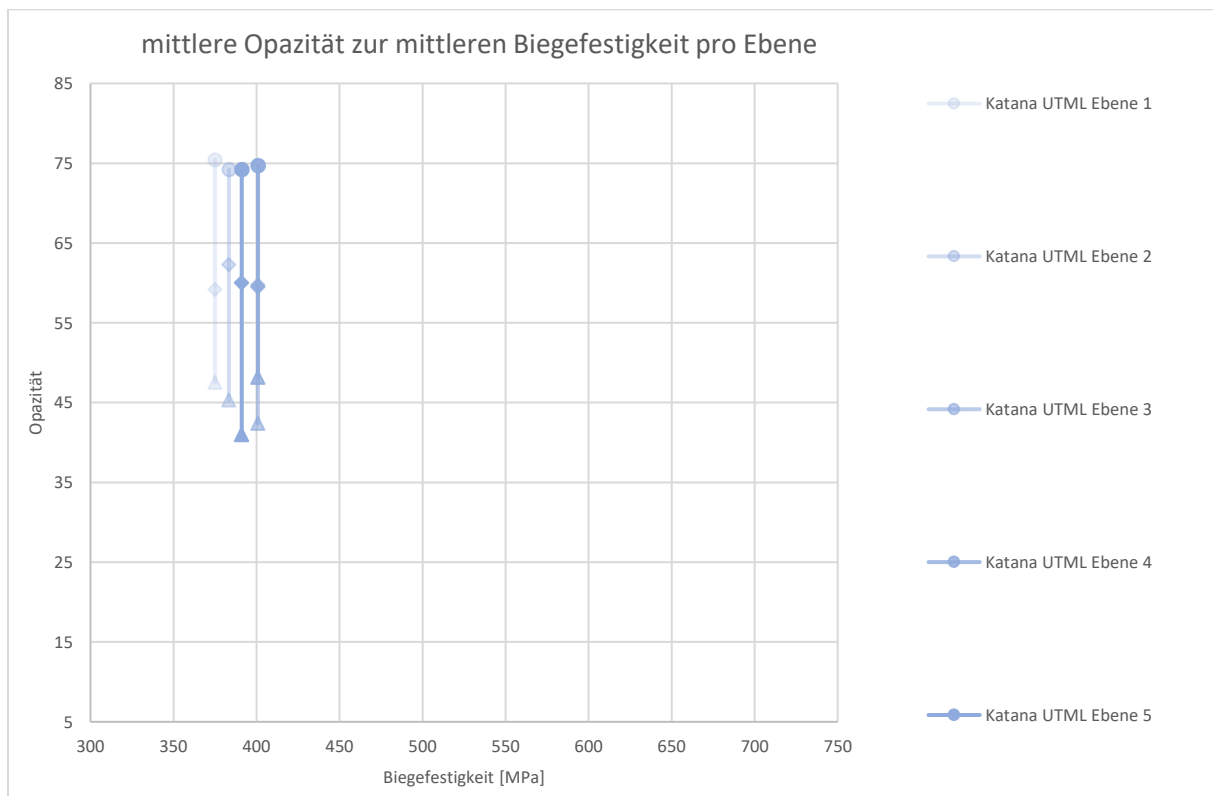


Abb. 96: Zusammenhang zwischen mittlerer Opazität und mittlerer Biegefestigkeit [MPa] von Katana UTML pro Ebene bei 0,50 mm Schichtstärke (Δ), 0,75 mm Schichtstärke (◊) und 1,00 mm Schichtstärke (○)

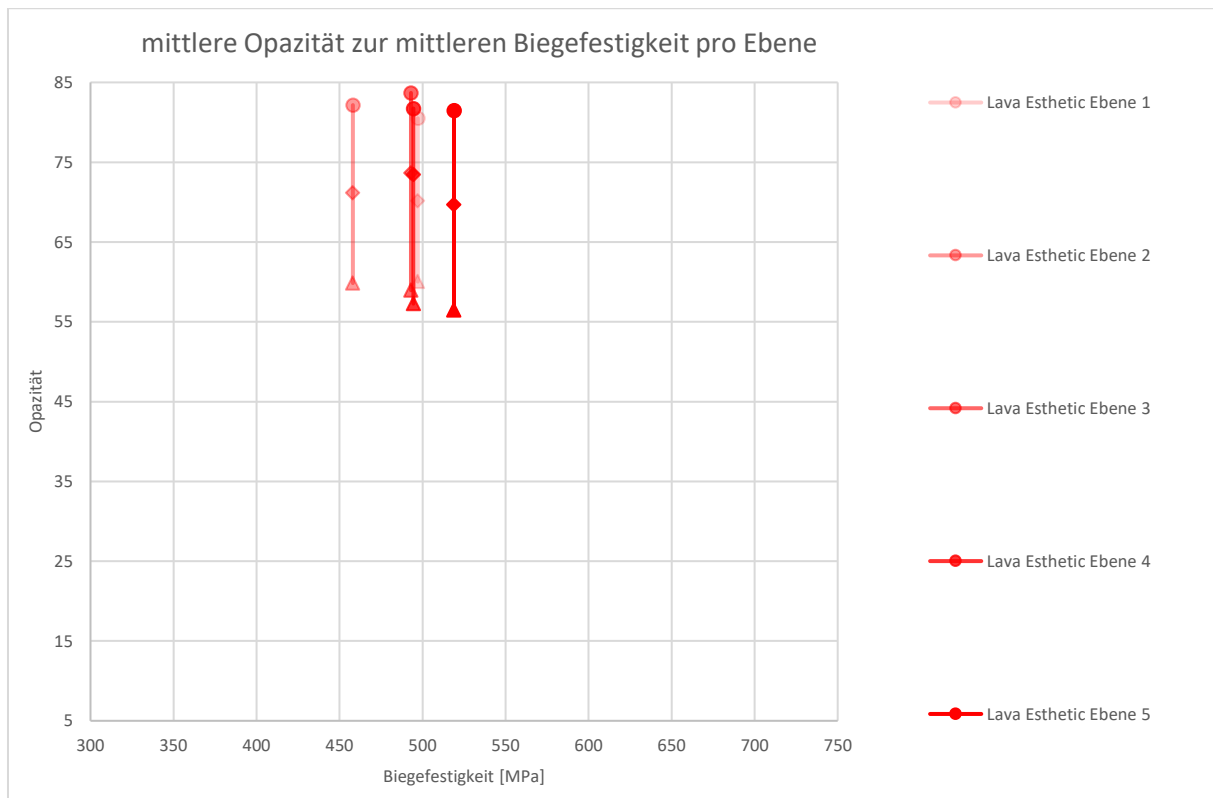


Abb. 97: Zusammenhang zwischen mittlerer Opazität und mittlerer Biegefestigkeit [MPa] von Lava Esthetic pro Ebene bei 0,50 mm Schichtstärke ( $\Delta$ ), 0,75 mm Schichtstärke ( $\diamond$ ) und 1,00 mm Schichtstärke ( $\circ$ )

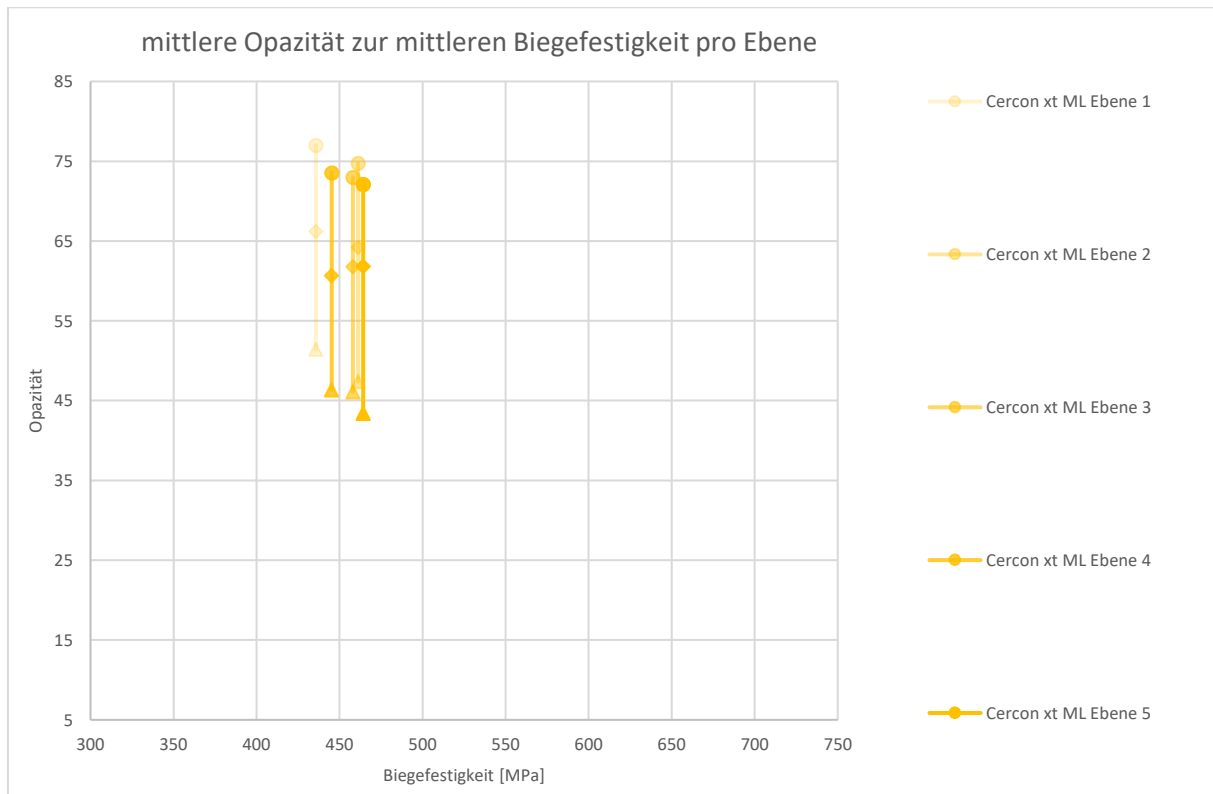


Abb. 98: Zusammenhang zwischen mittlerer Opazität und mittlerer Biegefestigkeit [MPa] von Cercon xt ML pro Ebene bei 0,50 mm Schichtstärke ( $\Delta$ ), 0,75 mm Schichtstärke ( $\diamond$ ) und 1,00 mm Schichtstärke ( $\circ$ )

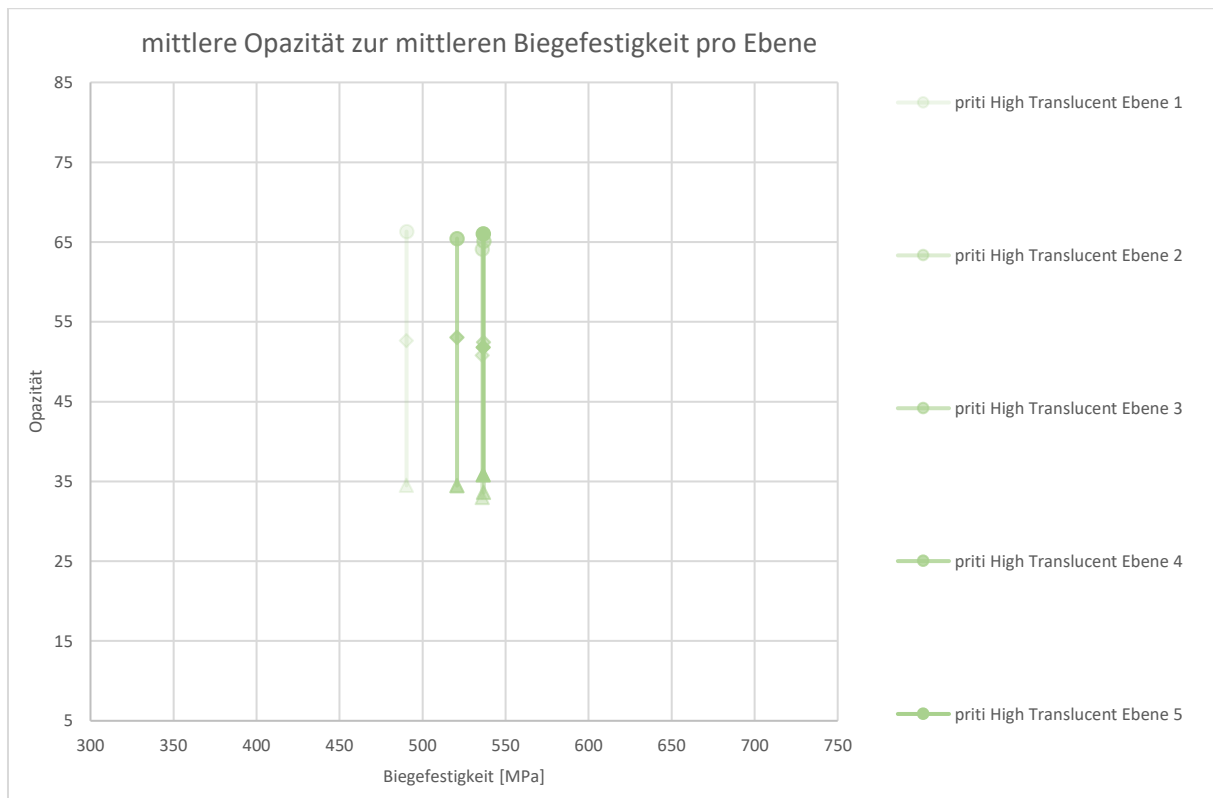


Abb. 99: Zusammenhang zwischen mittlerer Opazität und mittlerer Biegefestigkeit [MPa] von priti High Translucent pro Ebene bei 0,50 mm Schichtstärke (Δ), 0,75 mm Schichtstärke (◊) und 1,00 mm Schichtstärke (○)

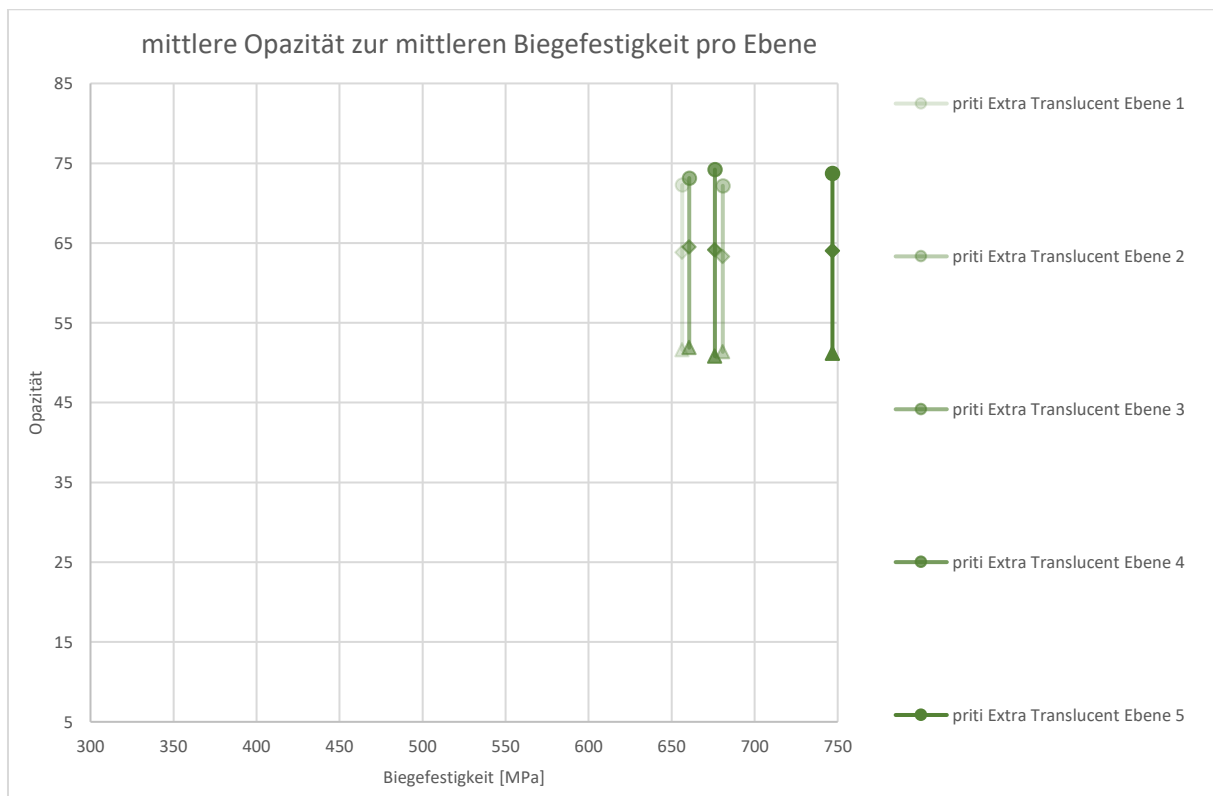


Abb. 100: Zusammenhang zwischen mittlerer Opazität und mittlerer Biegefestigkeit [MPa] von priti Extra Translucent pro Ebene bei 0,50 mm Schichtstärke (Δ), 0,75 mm Schichtstärke (◊) und 1,00 mm Schichtstärke (○)

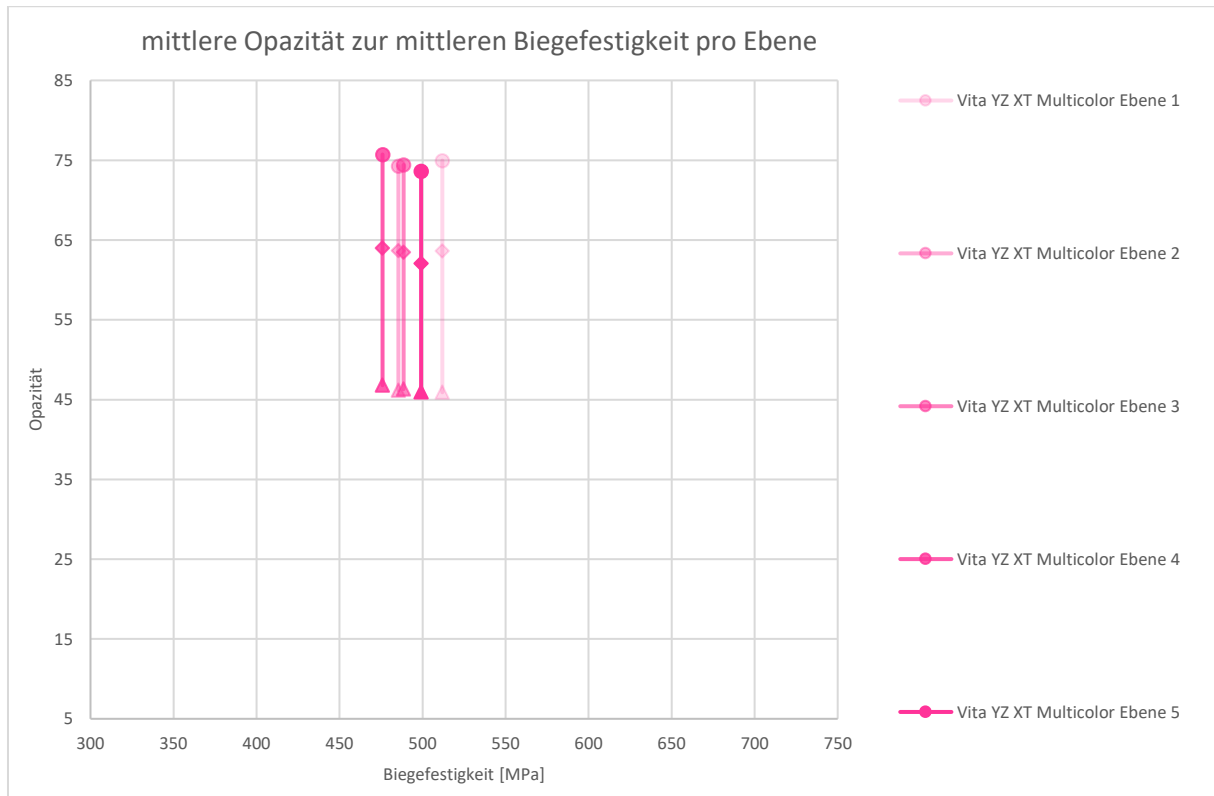


Abb. 101: Zusammenhang zwischen mittlerer Opazität und mittlerer Biegefestigkeit [MPa] von Vita YZ XT Multicolor pro Ebene bei 0,50 mm Schichtstärke ( $\Delta$ ), 0,75 mm Schichtstärke ( $\diamond$ ) und 1,00 mm Schichtstärke ( $\circ$ )

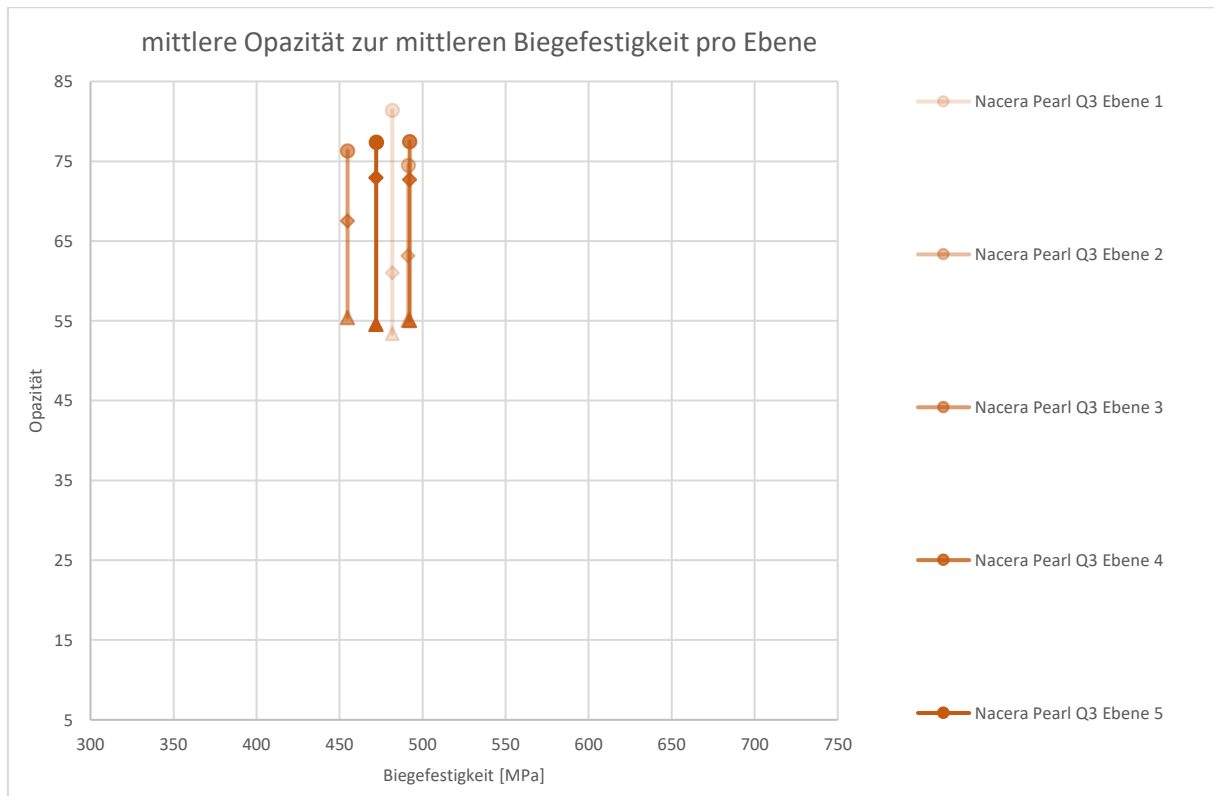


Abb. 102: Zusammenhang zwischen mittlerer Opazität und mittlerer Biegefestigkeit [MPa] von Nacera Pearl Q3 pro Ebene bei 0,50 mm Schichtstärke ( $\Delta$ ), 0,75 mm Schichtstärke ( $\diamond$ ) und 1,00 mm Schichtstärke ( $\circ$ )

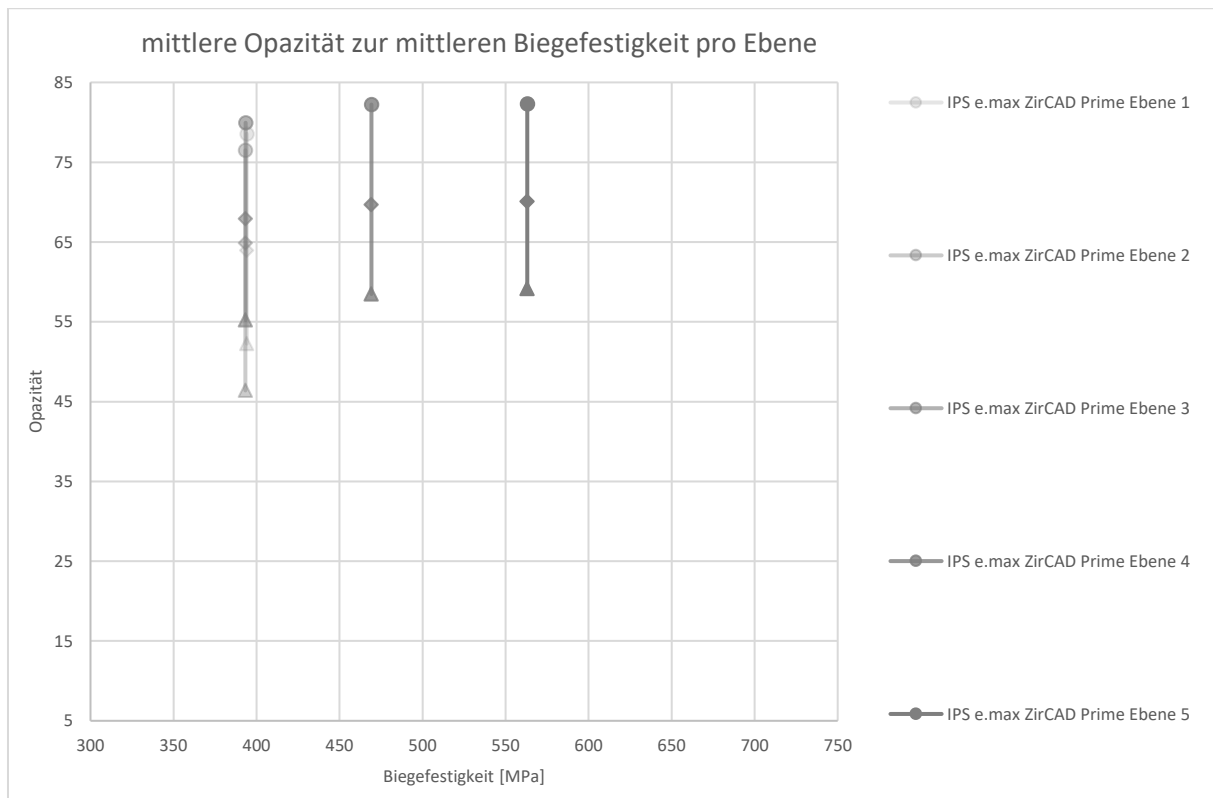


Abb. 103: Zusammenhang zwischen mittlerer Opazität und mittlerer Biegefestigkeit [MPa] von IPS e.max ZirCAD pro Ebene bei 0,50 mm Schichtstärke ( $\Delta$ ), 0,75 mm Schichtstärke ( $\diamond$ ) und 1,00 mm Schichtstärke ( $\circ$ )

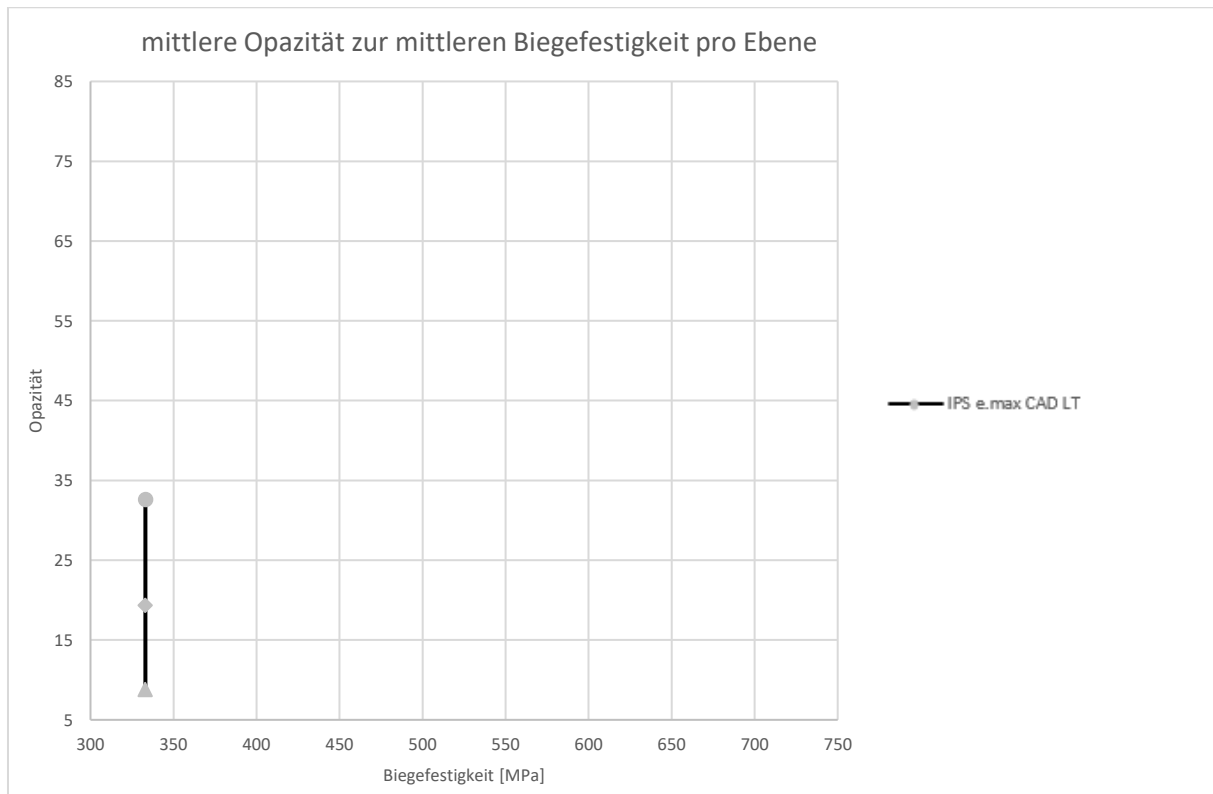


Abb. 104: Zusammenhang zwischen mittlerer Opazität und mittlerer Biegefestigkeit [MPa] von IPS e.max CAD LT pro Ebene bei 0,50 mm Schichtstärke ( $\Delta$ ), 0,75 mm Schichtstärke ( $\diamond$ ) und 1,00 mm Schichtstärke ( $\circ$ )

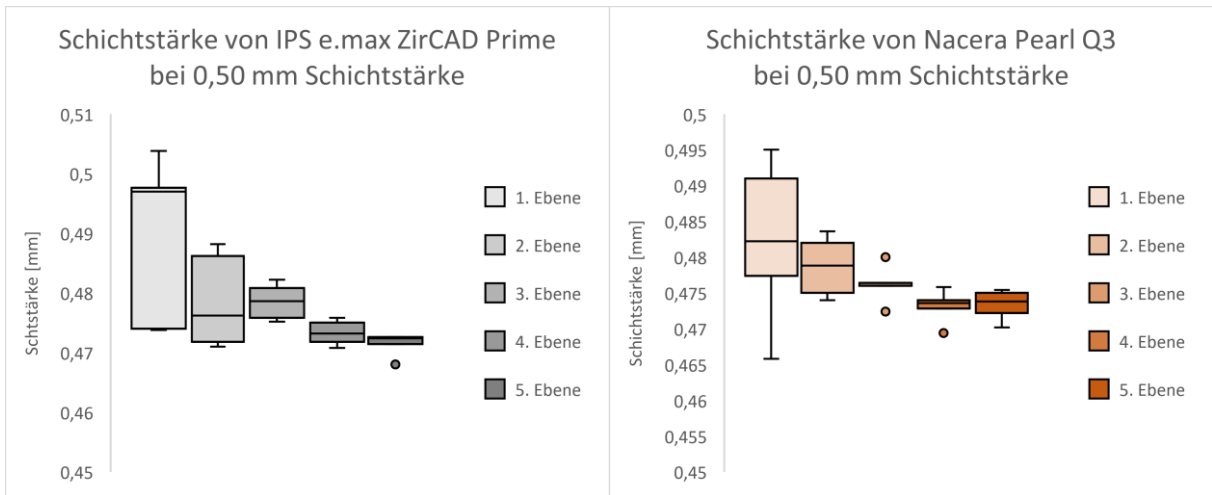


Abb. 105: Schichtstärke [mm] von IPS e.max ZirCAD Prime bei 0,50 mm Schichtstärke (links)

Abb. 106: Schichtstärke [mm] von Nacera Pearl Q3 bei 0,50 mm Schichtstärke (rechts)

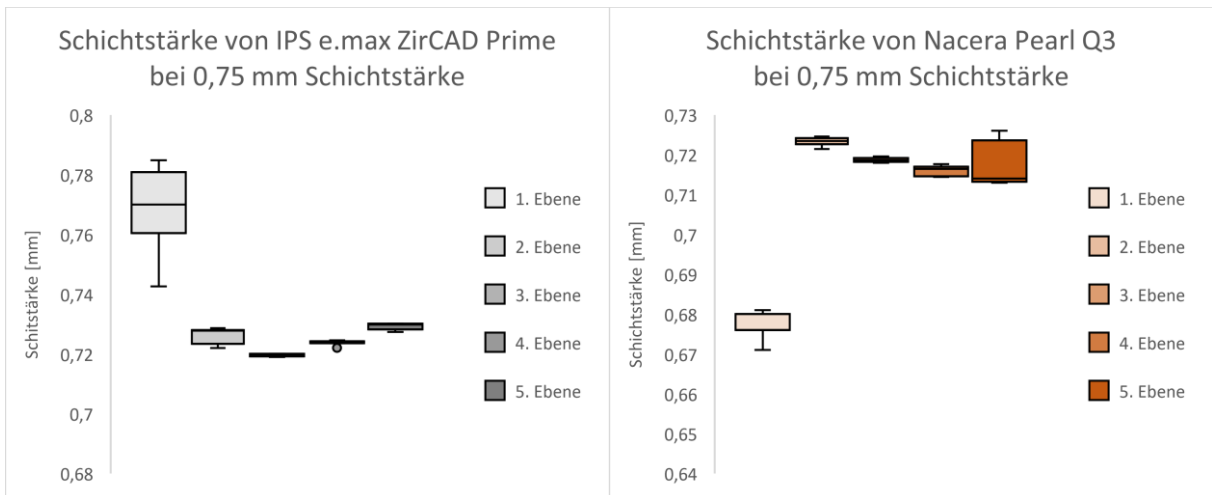


Abb. 107: Schichtstärke [mm] von IPS e.max ZirCAD Prime bei 0,75 mm Schichtstärke (links)

Abb. 108: Schichtstärke [mm] von Nacera Pearl Q3 bei 0,75 mm Schichtstärke (rechts)

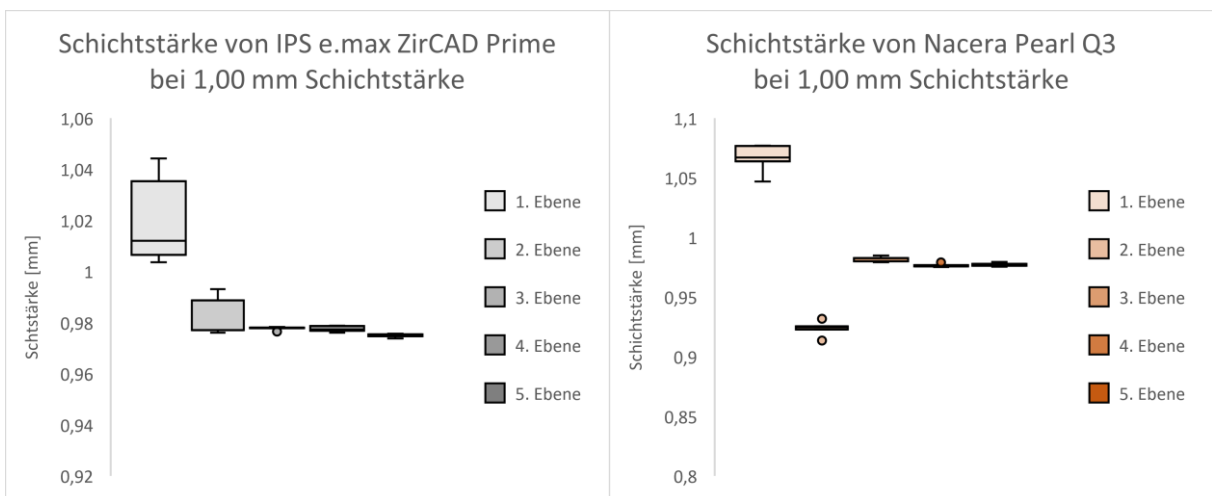


Abb. 109: Schichtstärke [mm] von IPS e.max ZirCAD Prime bei 1,00 mm Schichtstärke (links)

Abb. 110: Schichtstärke [mm] von Nacera Pearl Q3 bei 1,00 mm Schichtstärke (recht)

Tabelle 2: einfaktorielle Varianzanalysen (ANOVA) der Opazität und Biegefestigkeit sowie Kolmogorov-Smirnov-Tests bei  $\alpha=0,05$  mit einem kritischen Wert von 0,5633

Material	Stärke in mm	Ebene	Opazität					Biegefestigkeit						
			Normal- verteilung	Prüfgröße (F)	p-Wert	kritischer F- Wert	Unter- schied	Signi- fikanz	Normal- verteilung	Prüfgröße (F)	p-Wert	kritischer F-Wert	Unter- schied	Signi- fikanz
Katana STML	0,50	1	0,147154						0,248413					
		2	0,146454						0,380353					
		3	0,214023	1,701446	0,1892	2,8660814	nein	nein	0,184629	5,278214	0,0046	2,8660814	ja	ja
		4	0,184869						0,307643					
		5	0,134039						0,270959					
	0,75	1	0,355786						0,230604					
		2	0,247557						0,219903					
		3	0,176813	9,021243	0,0002	2,8660814	ja	ja	0,23599	3,249551	0,033	2,8660814	ja	ja
		4	0,200322						0,215448					
		5	0,199961						0,189404					
	1,00	1	0,145575						0,207713					
		2	0,193886						0,296476					
		3	0,122599	4,725723	0,0076	2,8660814	ja	ja	0,179208	2,205243	0,1051	2,8660814	nein	nein
		4	0,123342						0,230175					
		5	0,160512						0,147369					
Katana UTML	0,50	1	0,206951						0,231916					
		2	0,161306						0,176584					
		3	0,198893	3,463462	0,0264	2,8660814	ja	ja	0,318991	1,014322	0,4237	2,8660814	nein	nein
	0,75	4	0,263199						0,205328					
		5	0,201134						0,309183					
		1	0,209836	2,283668	0,0961	2,8660814	nein	nein	0,243425	0,180973	0,9456	2,8660814	nein	nein
2	0,19341						0,142641							

		3	0,14949							0,245005					
		4	0,324725							0,175686					
		5	0,225371							0,249093					
		1	0,226858							0,209527					
		2	0,243891							0,202429					
	1,00	3	0,199572	0,771021	0,5567	2,8660814	nein	nein		0,228672	0,509642	0,7293	2,8660814	nein	nein
		4	0,197457							0,154464					
		5	0,175876							0,213046					
<hr/>															
		1	0,136802							0,23941					
		2	0,163886							0,256776					
	0,50	3	0,220725	2,541462	0,0717	2,8660814	nein	nein		0,211408	1,045782	0,4086	2,8660814	nein	nein
		4	0,157909							0,168367					
		5	0,147663							0,184703					
		1	0,262484							0,177438					
		2	0,268844							0,401872					
Lava Esthetic	0,75	3	0,185064	5,034501	0,0057	2,8660814	ja	ja		0,27371	1,846918	0,1595	2,8660814	nein	nein
		4	0,157538							0,2111					
		5	0,120029							0,269599					
		1	0,146791							0,228454					
		2	0,172969							0,207358					
	1,00	3	0,327171	4,352156	0,0108	2,8660814	ja	ja		0,250602	0,553593	0,6987	2,8660814	nein	nein
		4	0,141405							0,232341					
		5	0,149389							0,186998					
<hr/>															
		1	0,223109							0,343874					
Cercon xt ML	0,50	2	0,126703	5,234176	0,0047	2,8660814	ja	ja		0,193514	1,264319	0,3168	2,8660814	nein	nein
		3	0,289007							0,171871					



	4	0,258092						0,457759						
	5	0,245863						0,17307						
	1	0,163804						0,23882						
	2	0,130412						0,264273						
0,75	3	0,238586	6,831918	0,0012	2,8660814	ja	ja	0,321377	0,379118	0,8208	2,8660814	nein	nein	
	4	0,137468						0,107652						
	5	0,192243						0,20924						
	1	0,304389						0,194004						
	2	0,18331						0,161352						
1,00	3	0,217573	18,86336	1E-06	2,8660814	ja	ja	0,256139	1,409522	0,267	2,8660814	nein	nein	
	4	0,152514						0,257536						
	5	0,147966						0,276719						
<hr/>														
	1	0,240885						0,245985						
	2	0,245256						0,245271						
0,50	3	0,176315	2,941215	0,0461	2,8660814	ja	ja	0,223817	5,807236	0,0029	2,8660814	ja	ja	
	4	0,1672						0,282467						
	5	0,201271						0,237542						
	1	0,304201						0,238115						
	2	0,203434						0,186959						
priti High Translucent	0,75	0,179557	5,320961	0,0044	2,8660814	ja	ja	0,234036	1,770297	0,1745	2,8660814	nein	nein	
	4	0,128545						0,237165						
	5	0,18767						0,239826						
	1	0,222622						0,235914						
	2	0,207813						0,237756						
1,00	3	0,352855	2,534743	0,0723	2,8660814	nein	nein	0,139259	0,257928	0,9014	2,8660814	nein	nein	
	4	0,201162						0,18173						

		5												
			0,234568						0,212008					
		1	0,165218						0,269223					
		2	0,21944						0,120166					
	0,50	3	0,157538	3,362373	0,0293	2,8660814	ja	ja	0,224933	0,997086	0,4321	2,8660814	nein	nein
		4	0,29955						0,169947					
		5	0,166861						0,191602					
		1	0,299063						0,228503					
		2	0,254335						0,129886					
priti Extra Translucent	0,75	3	0,243693	9,292742	0,0002	2,8660814	ja	ja	0,145672	1,838618	0,161	2,8660814	nein	nein
		4	0,286546						0,167211					
		5	0,127501						0,139902					
		1	0,130267						0,284004					
		2	0,272329						0,219773					
	1,00	3	0,230609	19,02312	1E-06	2,8660814	ja	ja	0,359629	1,693166	0,191	2,8660814	nein	nein
		4	0,263261						0,33341					
		5	0,236848						0,240241					
		1	0,195326						0,173805					
		2	0,279965						0,18416					
	0,50	3	0,22126	0,16634	0,953	2,8660814	nein	nein	0,175357	0,913183	0,4754	2,8660814	nein	nein
		4	0,259851						0,157473					
		5	0,128308						0,221216					
Vita YZ XT Multicolor		1	0,25259						0,263401					
		2	0,152035						0,328885					
	0,75	3	0,204675	2,316325	0,0926	2,8660814	nein	nein	0,291286	1,646387	0,2019	2,8660814	nein	nein
		4	0,197888						0,236642					
		5	0,18697						0,323449					

		1	0,186864						0,17222					
		2	0,334199						0,249851					
	1,00	3	0,183932	10,29656	0,0001	2,8660814	ja	ja	0,226756	0,543146	0,7059	2,8660814	nein	nein
		4	0,184289						0,163883					
		5	0,137214						0,224885					
<hr/>														
		1	0,189186						0,161377					
		2	0,276935						0,187543					
	0,50	3	0,222427	0,328789	0,8553	2,8660814	nein	nein	0,140263	3,041844	0,0413	2,8660814	ja	ja
		4	0,211989						0,293212					
		5	0,310756						0,19195					
		1	0,312253						0,220961					
		2	0,224034						0,124296					
Nacera Pearl Q3	0,75	3	0,190779	15,5227	6E-06	2,8660814	ja	ja	0,232207	1,010733	0,4254	2,8660814	nein	nein
		4	0,161593						0,227796					
		5	0,205695						0,209468					
		1	0,190261						0,209101					
		2	0,216619						0,195321					
	1,00	3	0,298783	7,502373	0,0007	2,8660814	ja	ja	0,185922	1,453614	0,2534	2,8660814	nein	nein
		4	0,229002						0,157672					
		5	0,275786						0,232143					
<hr/>														
		1	0,13209						0,132556					
		2	0,196775						0,325608					
IPS e.max ZirCAD Prime	0,50	3	0,189617	23,46532	3E-07	2,8660814	ja	ja	0,18791	2,75371	0,0566	2,8660814	nein	nein
		4	0,136217						0,206955					
		5	0,217612						0,220202					
	0,75	1	0,178344	38,72208	4E-09	2,8660814	ja	ja	0,225738	14,88525	9E-06	2,8660814	ja	ja

		2	0,2102							0,237015					
		3	0,180341							0,228348					
		4	0,281986							0,24681					
		5	0,191067							0,229506					
		1	0,147608							0,157114					
		2	0,223896							0,260008					
	1,00	3	0,195377	47,72803	6E-10	2,8660814	ja	ja	0,222521	12,02773	4E-05	2,8660814	ja	ja	
		4	0,217562							0,2383					
		5	0,208122							0,21633					
	0,50	0	0,131193	-	-	-	-	-	0,195038	-	-	-	-	-	
IPS e.max CAD LT	0,75	0	0,22253	-	-	-	-	-	0,204859	-	-	-	-	-	
	1,00	0	0,314946	-	-	-	-	-	0,134444	-	-	-	-	-	

## 11 Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Dissertation selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe.

Die Dissertation ist bisher keiner anderen Fakultät, keiner anderen wissenschaftlichen Einrichtung vorgelegt worden.

Ich erkläre, dass ich bisher kein Promotionsverfahren erfolglos beendet habe und dass eine Aberkennung eines bereits erworbenen Doktorgrades nicht vorliegt.

Datum

Unterschrift

## 12 Danksagung

Ich möchte mich bei Herrn Prof. Dr. Biffar, Direktor der Poliklinik für zahnärztliche Prothetik, Alterszahnheilkunde und medizinische Werkstoffkunde im Zentrum ZMK der Universität Greifswald und Herrn Prof. Dr. Kordaß, Leiter der Abteilung für Digitale Zahnmedizin – Okklusions- und Kaufunktionstherapie im Zentrum ZMK der Universität Greifswald, ganz herzlich dafür bedanken, dass sie mir dieses komplexe Thema anvertraut haben.

Mein besonderer Dank gilt Frau Dipl.-Ing. (FH) Amlang und Herrn Dipl.-Math., Dr. rer. med. Ruge für die fachliche Unterstützung und die hervorragende Betreuung im Verlauf der Arbeit.

Ebenso möchte ich mich bei Herrn Dr. rer. med. Matthes vom Werkstoffkundelabor sowie bei den Zahntechnikerinnen und den Zahntechnikern vom Zahntechniklabor der Zahnklinik Greifswald für die fachliche Unterstützung bedanken.

Vielen lieben Dank an Herrn Dr. Foest und Herrn Köpp vom Leibniz-Institut für Plasmaforschung und Technologie in Greifswald für die Ermöglichung der Rauheitsmessung.

Weiterhin richtet sich ein großes Dankeschön an die Unternehmensgruppe OPTIMA packaging group aus Schwäbisch Hall für die Herstellung und Spende des Prüfwerkzeugs.

Vielen Dank an die Firmen Doceram Medical Ceramics, Kuraray Noritake Dental, Ivoclar Vivadent, Dentsply Sirona, 3M, VITA Zahnfabrik und pritidenta für die Bereitstellung der Materialien.

Ganz herzlich bedanken möchte ich mich auch bei meiner Familie für die allumfassende Unterstützung.

