

**Aus der Universitätsklinik für Thorax-, Herz- und  
Gefäßchirurgie Tübingen  
Sektion Medizinische Werkstoffkunde und Technologie**

**Auswirkung einer Verblendkeramik auf den  
Haftverbund im vollkeramischen System 3Y-TZP  
zur Überprüfung des Einflusses der zahntechnischen  
Vorkenntnis an 5 Probanden im Rahmen eines  
Feldversuchs**

**Inaugural-Dissertation  
zur Erlangung des Doktorgrades  
der Zahnheilkunde**

**der Medizinischen Fakultät  
der Eberhard Karls Universität  
Tübingen**

**vorgelegt von**

**Angelis, Nina Maria**

**2018**

Dekan: Professor Dr. I. B. Autenrieth

1. Berichterstatter: Professor Dr. Geis-Gerstorfer

2. Berichterstatter: Privatdozent Dr. C. Meller

Tag der Disputation: 09.07.2018

*Meiner Familie gewidmet*

## Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einleitung</b>	<b>6</b>
1.1 Literaturübersicht	7
1.2 Das Gebiet der Verblendkeramik für Zirkoniumdioxid	10
1.3 Zirkoniumdioxid	13
1.4 Haftverbund zwischen Zirkoniumdioxid und Verblendkeramik	13
1.5 Prüfnormen	15
1.6 Ziel der Studie	17
<b>2 Material und Methoden</b>	<b>19</b>
2.1 Probenbezeichnung	19
2.2 Prüfkörperherstellung nach Gebrauchsanleitung	19
2.2.1 Sandstrahlvortest	20
2.2.2 Rauheitsmessung	21
2.2.3 Rasterelektronenmikroskop	23
2.3 Verblendung der Zirkoniumdioxidproben	24
2.4 Probandenvorgehen	29
2.4.1 Probandenvorstellung nach zahntechnischen Erfahrungen	29
2.4.2 Arbeitsanleitung	32
2.5 Probenvermessung	33
2.5.1 Mikroskopische Auswertung	35
2.5.2 Optische Bewertung der Verblendung und des Rissverlaufs	35
2.6 Schwickerath-Test nach ISO-Norm 9693	36
2.7 Akustisches Signal	37
2.8 Bruchmodus	38
2.9 Berechnung der Weibullfestigkeit	39
<b>3 Ergebnisse</b>	<b>40</b>
3.1 Rauheit	40
3.2 Darstellung der Kraftwerte	45
3.3 Berechnung der Verbundfestigkeit nach ISO 9693	49
3.3.1 Darstellung der Verbundfestigkeit für jeden Probanden	49
3.3.2 Darstellung der Verbundfestigkeit aller Probanden	53
3.4 Optische und mikroskopische Bewertung der Verblendung und des Rissverlaufs	54
3.4.1 Optische Bewertung der Verblendung	54
3.4.2 Mikroskopische Auswertung der Verblendgüte	55
3.4.3 Mikroskopische Auswertung der Verblendfläche	56
3.4.4 Auswertung der Probenvermessung mittels digitaler Schieblehre	59
3.5 Zusammenfassung aller geometrischer Probanddaten	62
3.6 Auswertung des akustischen Signals	63
3.7 Mikroskopische Auswertung der Proben mit akustischem Signal vor $F_{max}$	70
3.8 Einteilung der Proben nach dem Bruchmodus in adhäsiv und kohäsiv	73
3.9 Berechnung der Weibullfestigkeit der Proben 11 - 30 aller Probanden	73
<b>4 Diskussion</b>	<b>80</b>
4.1 Probenherstellung	81
4.1.1 Arbeitshaltung	82

4.2 Messwerte .....	85
4.2.1 Krafteinzelwerte .....	88
4.2.2 Verbundfestigkeit .....	89
4.2.3 Probengeometrie .....	91
4.2.4 Akustisches Signal .....	93
4.2.5 Bruchmodus .....	95
4.3 Weibull-Berechnung .....	96
4.4 Bewertung der Gebrauchsanleitung .....	98
4.5 Vorgehensweise zur Verarbeitung der Verblendkeramik .....	99
<b>5 Zusammenfassung .....</b>	<b>103</b>
<b>6 Schlussfolgerung .....</b>	<b>105</b>
<b>7 Literaturverzeichnis.....</b>	<b>106</b>
<b>8 Tabellen- und Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>111</b>
<b>9 Anhang .....</b>	<b>114</b>
<b>10 Danksagung .....</b>	<b>125</b>

## 1 Einleitung

Schon Platon (428/427 - 348/347 v. Chr.) setzte die Gesundheit mit der Harmonie des Leibes und der Seele gleich und brachte in seinem Werk „Politeia“ sittliche Tugend mit der „Gesundheit der Seele“ in Verbindung. Auch der römische Dichter Juvenal (60 - 127 n. Chr.) war der Meinung, dass „mens sana in corpore sano“, also ein gesunder Geist in einem gesunden Körper wohnt. Die World Health Organisation (WHO) definiert Gesundheit als einen „Zustand vollständigen physischen, psychischen und sozialen Wohlbefindens und nicht nur der Abwesenheit von Krankheit und Schwäche“. Dazu gehört natürlich auch die Mund- und Zahngesundheit.

Ein blendendes Lächeln mit perfekten weißen Zähnen ist heute immer häufiger zu sehen.

Es bedeutet für den Menschen seit jeher nicht nur den Wunsch nach einem gepflegten Äußeren, sondern steht auch für Erfolg und ein sicheres Auftreten in der modernen Gesellschaft. Den stetig wachsenden Ansprüchen der Patienten an ästhetischem Zahnersatz gerecht werdend, etablierte sich die Dentalkeramik als Werkstoff der Wahl. In den letzten Jahren wurde sie nach jahrzehntelanger Verarbeitung als Verblendkeramik auf Metallgerüste in Form von unterschiedlichen Vollkeramiksystemen neu definiert. Therapielösungen aus Vollkeramik erreichen nicht nur ein natürlicheres Erscheinungsbild durch den Wegfall einer metallbedingten Schattenbildung im Kernchroma, sondern auch am Übergang zum Zahnfleisch.

Nach dem Vorbild der Natur können Lichtdurchlässigkeit und Farbdynamik künstlerisch und individuell nachempfunden werden [1].

## 1.1 Literaturübersicht

Zirkoniumdioxid stellt als der „weiße Stahl“ eine extrem stabile, ästhetisch hochwertig und metallfreie Innovation in der Zahnheilkunde dar.

Dieser Werkstoff aus der Weltraumtechnik hat in den Zahnarztpraxen Einzug gefunden und bringt mit einer Vielzahl an unterschiedlichen Herstellungsverfahren Vorprodukte für Kronen und Brücken und damit für die ästhetische Dentalmedizin hervor.

Um hochwertig optische Ergebnisse zu erzielen, wird die opake Gerüstoxidkeramik mit Leuzit-/Feldspatkeramik nach der klassischen Verblendmethode komplettiert.

Diese Verblendkeramiken gehören in die Kategorie Silikat-/Glaskeramik und besitzen durch ihre höhere Glasphase im Gefüge eine optimale Transluzenz und Opaleszenz, Eigenschaften, mit welchen sie sich den natürlichen Zähnen mit dem sogenannten „Chamäleoneffekt“ bei richtigem zahntechnischen Schichtvorgehen hervorragend anpassen können [2].

Seit einigen Jahren wird das Zirkoniumdioxid als der zukunftsweisende Ersatzwerkstoff für Metalle in der Zahnersatzkunde gesehen.

Ein Problem stellt allerdings die Grenzstelle zur obligaten Verblendkeramik dar [3].

Immer häufiger werden Zahnärzte mit Abplatzungen der Verblendkeramik vom Zirkoniumdioxidgerüst konfrontiert. Der glashaltige Verblendwerkstoff ist der glasphasefreien Oxidkeramik in Bezug auf die Bruchfestigkeit unterlegen [4].

Mit einer Optimierung der Gerüsterstellung mithilfe des CAD/CAM- Verfahrens in Richtung anatomischer Form konnten eine gleichmäßige Schichtstärke und damit weniger Spannung in der Verblendkeramik erzielt werden. Dennoch

kommt bei diesen Zirkoniumdioxidrestaurationen ein größerer Anteil von Chipping vor [5].

Der Verbundverlust zwischen Gerüst und Verblendmaterial kann auf unterschiedliche Wärmeausdehnungskoeffizienten (WAK), auf eine erhöhte Brandschrumpfung der Verblendung, auf eine Phasenumwandlung des Zirkoniumdioxids durch thermischen Einfluss zurückzuführen sein, oder er kann auch durch verschiedene Oberflächenbearbeitung des Gerüsts vor dem Brand entstehen [6].

Der Haftverbund zwischen Verblendkeramik und Zirkoniumdioxid-TZP (tetragonale Zirkonia Polykristalle) ist die Voraussetzung für eine sichere klinische Anwendung. Die altbewährte Verblendmetallkeramik-Technik (VMK) ähnelt der Verblendtechnik auf Zirkoniumdioxid sehr und es ist somit ein gleicher Haftverbund im vollkeramischen System zu fordern.

Da es für das vollkeramische System bis 2016 keine standardisierte Prüfnorm gab, führten verschiedene Studien Verbundfestigkeitsprüfungen mit dem 3-Punkt-Biegetest nach Schwickerath in Anlehnung an die ISO-Norm 9693 durch [7], die für das Metallkeramiksystem standardisiert war [8], [9], [21], [31], [32].

Auch andere Prüfverfahren fanden in Studien Anwendung, um den Haftverbund im Vollkeramiksystem zu untersuchen, wie z. B. der Mikrozugtest [10], der Abschertest nach Schmitz-Schulmeyer [8] oder der Schertest [3].

Solche Testverfahren, wie oben exemplarisch aufgezählt, müssen durchgeführt werden, um einen langfristig sicheren Erfolg einer vollkeramischen Restauration für den Patienten zu gewährleisten [11] (siehe Abschnitt 1.5).

In der vorliegenden Arbeit kam der 3-Punkt-Biegetest nach Schwickerath zum Einsatz, da sich durch die von der ISO-Norm 9693 festgelegte Haftverbund-Mindestgrenze von 25 MPa die Ergebnisse der verschiedenen Testpersonen einfach vergleichen lassen.

Gegenstand einer Studie ist die Untersuchung zum Haftverbund zwischen einem Zirkoniumdioxid-TZP-Gerüst und verschiedenen Verblendkeramiken, die nach den zugehörigen Herstellerangaben verarbeitet wurden [8]. Die Auswertungen liefern für einige gängige Verblendkeramiken das Ergebnis einer sicheren klinischen Anwendbarkeit [8].

Die Oberflächenbearbeitung von Y-TZP (Yttrium-TZP, s. u.) vor der Verblendung in Form von Abstrahlen mit Aluminiumoxid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) stellt für einige Hersteller von Verblendkeramiken einen wichtigen Parameter für den Verbund zwischen beiden Materialien dar.

Wie in der vorliegenden Arbeit (s. 3.1) ist in einer anderen Studie ebenso eine kaum erhöhte Oberflächenrauigkeit durch Abstrahlen mit  $\text{Al}_2\text{O}_3$  erreicht worden [9]. Die Oberfläche des Zirkoniumdioxids setzt den  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Partikeln eine zu große Härte entgegen (Vickershärte HV 1300). Dementsprechend ist auch keine stärkere Verbundfestigkeit durch höhere Rauheit zu erreichen, wie es bei der Metallkeramik der Fall ist. Es wird sogar ein geringerer Haftverbund mit Abstrahlen des Zirkoniumdioxidgerüsts beobachtet: Durch das Sandstrahlen können Risse und Sprünge in der Oberfläche des Zirkoniumdioxids entstehen, welche dann in der kritischen Kontaktzone zur Schichtkeramik liegen und auch bei hohen Brenntemperaturen nicht verschmelzen [9]. Der Brennprozess im Keramikofen kann eine umgekehrte Phasenumwandlung des Zirkoniumdioxids von monoklin nach tetragonal (s. 1.3) hervorrufen, als Folge ein Risswachstum begünstigen und den Haftverbund schwächen [12]. Andere Untersuchungen hingegen haben ergeben, dass der Haftverbund im vollkeramischen System durch Oberflächenbearbeitung des Zirkoniumdioxids mittels Sandstrahlen erhöht war [13]. Sie fanden heraus, dass der Sandstrahlvorgang einerseits einen erosiven Abrieb auf der Substratoberfläche hinterlässt. Diese Oberflächenveränderungen führen dann zu einer Phasenumwandlung von tetragonal nach monoklin (t/m-Umwandlung) (s. 1.3). Durch eine Druckspannungszunahme an der Risspitze wirken diese Oberflächendefekte zusammen mit einer Volumenzunahme der Festigkeitsminderung an der

Materialoberfläche entgegen. Das Risswachstum wird eingedämmt, sofern dem Sandstrahlvorgang kein Regenerationsbrand bei hohen Brenntemperaturen (900-1000 °C) folgt, der den gegenteiligen Effekt zur Folge hat im Sinne einer geringeren Langzeitverlässlichkeit der Restauration [14],[15].

Durch eine Wärmebehandlung wird die Druckspannung in der Zirkoniumdioxidoberfläche (hervorgerufen durch den Sandstrahlprozess) mit der Rückumwandlung der t/m-Phasentransformation wieder aufgehoben. So können sich Risse ungehindert ausbreiten [16].

## 1.2 Das Gebiet der Verblendkeramik für Zirkoniumdioxid

Im Jahre 1887 begann man dank Charles Henry Land Keramikmassen auf Platinfolie aufzubrennen und schuf in der Zahnersatzkunde, wenn auch bruchanfällig, die ersten ästhetisch ansprechenden Porzellan-Jacketkronen.

128 Jahre später ist man nun in der Lage, Zahnersatz in Vollkeramik naturgetreu computergestützt zu entwerfen, und mit Hilfe von Fräsmaschinen herzustellen. Dieser dreidimensionale, digitale Workflow wird Computer-Aided-Design-/Manufacturing genannt, dessen Gründervater im Dentalkeramikbereich François Duret Anfang der 1970er Jahre war.

Das erste System der Weiterentwicklung auf diesem Gebiet stellte das Cerec<sup>®</sup>-System von Sirona<sup>®</sup> seit Beginn der 1990er Jahre dar, welches chair side Anwendung findet und kleinere Restaurationen wie Einzelkronen oder Inlays schafft, ohne dass diese zusätzlich durch die künstlerische Hand des Zahntechnikers gehen [17].

Anders verhält es sich bei den sogenannten Inlab-Laborsystemen. Hier wird klassisch in Wachs auf Gipsstümpfe aufmodelliert, die Arbeit dann eingescannt und aus Zirkon- oder Aluminiumoxid maschinell herausgefräst. Durch diese

automatisierte Bearbeitung erhält man Vollkeramikgerüste von hoher mechanischer Festigkeit und Härte [18].

Die Ästhetik des Zahnersatzes entsteht dann, wenn der Zahntechniker nach dem Schichtverfahren mit der klassischen Feldspat-/Glaskeramik die anatomische Zahnform individuell auf das Zirkoniumdioxidgerüst modelliert und die Modellation im Keramikbrennofen durch den Sinterbrand fest wird.

Form- und Farbgefühl des Zahntechnikers sind hierbei essentiell, da die verschiedenen Keramikmassen in Schlickerform mit dem Pinsel Schicht für Schicht an richtiger Stelle und ausreichender Stärke platziert werden müssen, um ein biomimetisches Ergebnis zu erreichen.

Ein weiteres Herstellungsverfahren im Bereich der Vollkeramik stellt der monolithische Zahnersatz dar, der komplett in einem Stück in anatomischer Form aus hochtransluzenten Keramikrohlungen geätzt wird und aus ästhetischen Gründen im Seitenzahnbereich verwendet wird. [19].

In Tabelle 1 sind einige Verblendkeramiken für Zirkonoxid als Übersicht mit ihren Materialparametern zusammengestellt.

Tabelle 1: Übersicht über einige Verblendkeramiken für Zirkoniumdioxid

ZI-Keramik	Kristalltyp	kompatibel mit welchen Gerüst- materialien	WAK
Creation ZI-F Willi Geller	amorphe Feld- spatkeramik	Zirkonium- dioxid	$9,5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (25 – 500 °C)
IPS e.max Ceram Ivoclar Vivadent AG	Nano-Fluor- Apatit Glas- keramik	IPS e.max Press, ZirrPress, ZirCAD ZrO <sub>2</sub> -Gerüste mit WAK 10,5 - 11	$9,5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (100 - 400 °C)
VITA VM9 Vita Zahnfabrik	Leuzit	VITA In-Ceram YZ,VITABLOCKS, VITA PM9	$9,0 - 9,2 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (25 – 500 °C)
Noritake Cerabien Kuraray Noritake Dental	vollsynthetischer Feldspat	Aluminiumoxid- gerüste	$6,8 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (25 – 500 °C)
Vintage ZR Shofu Dental GmbH	Leuzit	Zirkonium- dioxid	$9,3 - 9,4 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (25 – 500 °C)
Replica Wegold GmbH	kristallfreies Silikatglas	Zirkonium- dioxid	$9,3 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (25 – 500 °C)
DC Ceram 9,2 Ceramay	leuzitverstärkte Glaskeramik	alle ZrO <sub>2</sub> - Gerüste und Lithium-Di- silikat-Keramik	$9,2 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (25 – 500 °C)
ICE Zirkonkera- mik Zirkonzahn GmbH	keine Angaben	Zirkonium- dioxid	$9,7 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

### 1.3 Zirkoniumdioxid

Zirkoniumdioxid wird synthetisch aus Zirkonsilikat hergestellt und tritt kristallographisch bei einer Temperatur bis 1170 °C monoklin auf, bis 2370 °C wird die Gitterstruktur tetragonal und wandelt sich bei Temperaturen höher als 2370 °C in eine kubische Phase um [12].

Bei dem Vorgang der Phasenumwandlung von tetragonal nach monoklin (t/m-Umwandlung) führt der Effekt einer Volumenzunahme von ca. 4 % zu den besonders stabilen Festigkeiten des Zirkoniumdioxids: Die durch die Volumenänderung hervorgerufenen starken Spannungen an der Zirkoniumdioxidoberfläche können Mikrorisse im Materialgefüge verursachen oder bereits im Material vorhandene Risse verstärken. Das Spannungsfeld an einer Rissspitze induziert dann die t/m-Umwandlung. Die dabei entstehende Volumenzunahme drückt die Rissspitze zusammen und das Risswachstum wird eingedämmt. Durch das Einbringen verschiedener Oxide (z. B. Yttriumoxid  $Y_2O_3$ , Magnesiumoxid  $MgO$ ,...) in das Kristallgefüge des Zirkoniumdioxids kann eine Stabilisierung der tetragonalen Kristallstrukturanordnung erreicht werden. Besonders hoch ist dieses verstärkte Gefüge beim sogenannten Yttrium stabilised Tetragonal Zirconia Polycrystal (Y-TZP). Es besteht vollständig aus der tetragonalen Phase.

Durch die t/m-Umwandlung werden somit Gefügedefekte im Zirkoniumdioxid toleriert [12].

### 1.4 Haftverbund zwischen Zirkoniumdioxid und Verblendkeramik

Obwohl Zirkoniumdioxid als hoch verlässliches Material in der Zahnersatzkunde gilt, ist es dennoch nicht völlig problemfrei. Vor allem nicht an der Verbundzone mit der festigkeitsempfindlicheren Verblendkeramik. Nun ist gerade das Y-TZP von hoher Bruchzähigkeit, Frakturen der Gerüstkeramik kommen eher selten vor [20]. Trotzdem führt eine im Mund frakturierte Keramikarbeit oft zur Neuanfertigung der Arbeit.

Dies wirft natürlich die Frage auf, ob die Zirkoniumdioxidgerüstverblendung doch nicht völlig von der Metallkeramikverblendung übertragbar, sondern fehlerempfindlicher ist.

Um dem Phänomen des Chippings und der Ablösungen auf den Grund zu gehen, wurden verschiedene Studien durchgeführt.

Es zeigt sich in einer Studie bei der Festigkeitsprüfung mit dem Dreipunkt-Biegetest beispielsweise deutlich, dass es häufiger zum Bruch innerhalb der Verblendkeramik kommt als an der Verbundzone zum Zirkoniumdioxidgerüst [20].

Somit muss die zahntechnische Verarbeitungsweise genauer betrachtet werden: Von den meisten Herstellern von  $ZrO_2$ -Verblendmassen wird ein sogenannter Liner empfohlen, ähnlich dem Washbrand im Metall-Keramik-System um den Verbund zum Gerüstwerkstoff zu verstärken [7].

Eine Konditionierung der Zirkoniumdioxidoberfläche mittels Sandstrahlen vor der Verblendung wird von manchen Gebrauchsanweisungen vorgeschrieben [21]. Sandstrahlen bewirkt eine t/m-Phasenumwandlung an der Oberfläche des Zirkoniumdioxids, was bedeutet, dass sich dort mehr monokline Phase befindet, die dem Risswachstum entgegenwirken kann (s. 1.1). In einer Studie wurde beobachtet, dass nach Wärmebehandlung im Anschluss an den Strahlvorgang eine umgekehrte Phasenumwandlung stattfindet, die eine Materialschwächung bewirken kann [15]. Daher wird in der Studie das Sandstrahlen vor den zahntechnischen Brennvorgängen abgelehnt und lediglich danach, also vor dem definitiven Zementieren empfohlen. Dies trägt zu einer verbesserten Verlässlichkeit im Sinne einer langfristigen Materialfestigkeit bei [15].

Eine Oberflächenbearbeitung unterschiedlichster Art kann den Langzeiterfolg der verblendeten Zirkoniumdioxidrestauration negativ beeinflussen [16].

Da der Autor einer Studie [22] zu dem Schluss kam, dass eine höhere Biegefestigkeit mit sehr glatter Materialoberfläche korreliert, wurde in der

vorliegenden Studie ein Glanzbrand durchgeführt, um eine homogenere Oberfläche der Verblendkeramik zu schaffen und um die identische Schichtung einer zahntechnischen Verblendkrone zu simulieren.

Wird bei der Gerüstherstellung auf eine annähernd anatomische Form geachtet, kann die Keramikmasse höckerunterstützend aufgebrannt und das Bruchrisiko stark herabgesetzt werden [23].

Der Haftverbund an der Materialgrenze Zirkonoxid/ Verblendkeramik war bei anderen Autoren höher als die Kohäsionskräfte der Verblendung, was die Schwachstelle beim Versagen des Haftverbundes eher auf die Verblendkeramik legt und weniger auf die Verbindungsstelle [24].

Zur Untersuchung des Materialversagens geht man in vielen verschiedenen Studien bisher nach der Rissbeginnprüfung mit dem 3-Punkt-Biegetest nach Schwickerath vor und hält sich somit an die ISO-Norm 9693. Dieser Test stellt die Prüfmethode für die Metallkeramik dar und fordert für dieses System einen Haftverbundwert von mindestens 25 MPa [7].

## 1.5 Prüfnormen

Solche Prüfnormen werden auf internationaler Ebene entwickelt und bedeuten für normierte Herstellungsverfahren eine weitgehende Produktsicherheit [25].

Für das Festlegen geeigneter Richtlinien für Arbeitsprozesse, Materialien und Produkte sind Normungsgremien (z. B. die International Organization for Standardization, ISO), in Zusammenarbeit mit Herstellern und Industrievertretern zuständig [25].

Das sogenannte Technische Komitee TC 106 der ISO ist für die Zahnmedizin eingerichtet worden mit dem Ziel, auch hier durch Testverfahren eine einheitlich und langfristig sichere klinische Anwendung zu erreichen [26].

Da sich die Bedürfnisse und Ansprüche der Patienten bezüglich des Zahnersatzes stetig steigern ist es wichtig, dass die Normregelungen für neue Technologien und Systeme im Bereich Zahnmedizin erweitert und gefördert werden. Auf diese Weise können einheitliche Maßstäbe als wichtige Orientierungshilfe für die Mindestanforderungen von Medizinprodukten geschaffen werden. Durch die Beteiligung an Normungsprozessen sichern sich Unternehmen eine Minimierung von Risiken, was sich auf die Wirtschaftlichkeit positiv auswirkt, indem die Zusammenarbeit mit Kunden verbessert und gestärkt wird [26].

Der Nutzen von Normung liegt nicht nur in der verbesserten Herstellung von Produkten, sondern vor allem auch in einer höheren Sicherheit für die Gesundheit und Lebensqualität der Patienten. Für Dentalkeramiken gibt es ebenfalls verschiedene Normen. Die DIN EN ISO 6872 beispielsweise ist eine Norm für Prüfverfahren speziell für die Dentalkeramik, denen Ergänzungen wie Arbeitsschritte, Probenherstellung, Rechenschritte und Vorgehensweisen statistischer Mess- und Auswertungsmethoden zugrunde liegen [26].

Für das Vollkeramik-System existierte zu Beginn dieser Studie noch kein genormter Test für eine Prüfung des Haftverbundes. Die ISO-Norm 9693 für die VMK-Technik wurde daher auch für Zirkoniumdioxid verwendet. Darin wird eine Probekörperherstellung angegeben, die sich beim Auftragen der Keramikmassen an die Herstellerangaben hält sowie das gleichmäßige Auftragen der Masse mit vorgegebener Länge, Breite und Dicke auf den Probekörper beschreibt. Für das Erreichen der geforderten Maße ist die Information enthalten, wiederholt Keramik aufzutragen. Die Brennparameter richten sich nach der zugehörigen Verblendkeramikmasse, der Brennofen soll vor Beginn kalibriert werden [7].

Da es sich bei der ISO-Norm 9693 um ein Prüfverfahren für Metallkeramik handelte, ist eine Prüfstandardisierung auch für das Vollkeramiksystem

sinnvoll. Obwohl einzelne Verblendschritte beider Systeme identisch sind [27], [28], gibt es nicht nur Unterschiede im ästhetischen Bereich der beiden Gerüstmaterialien Oxidkeramik und Metall, sondern auch verschiedene Oberflächenbearbeitungsweisen und für beide verschieden stark ausschlaggebende Verbundkräfte [29].

Auch der Anwender einer Prüfnorm stellt eine nicht zu unterschätzende Fehlerquelle dar, wenn er nicht mit dem Material vertraut ist und Erfahrungswerte fehlen. Es werden einzelne Schritte in Prüfnormen, z. B. Verblendschritte oft nicht ausführlich genug beschrieben [30].

## 1.6 Ziel der Studie

Ziel dieser Studie war, die Verbundfestigkeit der Verblendkeramik ZI-F (W. Geller) zu Zirkoniumdioxid (Nacera Pearl 1) mit Hilfe des Schwickerath-Tests in Anlehnung an die ISO-Norm 9693 zu untersuchen. Nach dem wissenschaftlichen Stand zu Beginn der vorliegenden Arbeit gab es keine Prüfnorm für den Haftverbund im Vollkeramiksystem (s.1.5). Daher haben auch andere Autoren nach der ISO-Norm 9693 (bis 2016 für das Metallkeramiksystem) Untersuchungen zur Verbundfestigkeit im vollkeramischen System durchgeführt [8], [9], [21], [31], [32].

Bei auftretender Zugbelastung werden Material- oder Herstellungs-bedingte Risse in der Keramik vergrößert und tragen zu einem herabgesetzten Festigkeitsverhalten der Keramikrestauration bei [12]. Keramische Werkstoffe können auftretende Spannungen im Gefüge nicht wie Metalle durch Dehnung kompensieren sondern brechen bei Überbelastung spontan [16]. Da durch Abweichungen vom korrekten Verblendvorgang von Dentalkeramik Material-Inhomogenitäten mit verarbeitet werden können, sollte der Einfluss von 5 Probanden mit unterschiedlichem zahntechnischen Kenntnisstand (Zahntechniker, Zahnarzt, Zahnmedizinische Fachangestellte, Mitarbeiter der

Sektion Medizinische Werkstoffkunde und Technologie am Universitätsklinikum Tübingen, Elektromechaniker) auf den Haftverbund im Vollkeramiksystem evaluiert werden. Des Weiteren sollte der Haftverbund von jeweils 10 Probekörpern jedes Probanden mit sandgestrahlter Zirkoniumdioxidoberfläche gemessen werden.

Es stellt sich die Frage, ob Anwender auf der ganzen Welt mit völlig unterschiedlicher Verarbeitungsroutine durch eine Prüfungsnormierung trotzdem einheitliche Ergebnisse im Haftverbund des vollkeramischen Systems im Hinblick auf den langfristigen Erfolg dieser Restaurationen erzielen können.

Die vorliegende Arbeit verfolgt das Forschungsinteresse, ob die Ergebnisse dabei stark auseinandergehen, was für den Haftverbund bedeuten würde, dass er hoch empfindlich auf kleinste Verarbeitungsunterschiede reagiert (welche sich beim Handling der Probanden ergeben), oder ob der Schwickerath-Test dennoch zum Einheitsverhalten der Materialien führt.

Die Nullhypothese dieser Studie lautet, ob die in der ISO-Norm 9693 enthaltenen Angaben zur Prüfkörperherstellung ausreichend für einen Zahntechniker oder einen Laien sind um die Mindestanforderung der Norm zu erreichen.

## 2 Material und Methoden

### 2.1 Probenbezeichnung

Inhalt der Arbeit ist eine Prüfkörperherstellung von insgesamt 5 Personen mit unterschiedlicher Erfahrung im Bereich Zahntechnik gemäß einer Bedienungsanleitung welche ein analoges Vorgehen gewährleisten soll.

Es erschien folgende Probenbezeichnung sinnvoll:

1 1 a - j / 1 1 - 10	2 1 a - j / 2 1 - 10	3 1 a - j / 3 1 - 10
1 2 a - j / 1 11 - 20	2 2 a - j / 2 11 - 20	3 2 a - j / 3 11 - 20
1 3 a - j / 1 21 - 30	2 3 a - j / 2 21 - 30	3 3 a - j / 3 21 - 30

4 1 a - j / 4 1 - 10	5 1 a - j / 5 1 - 10
4 2 a - j / 4 11 - 20	5 2 a - j / 5 11 - 20
4 3 a - j / 4 21 - 30	5 3 a - j / 5 21 - 30

Die erste Ziffer steht für den Probanden, die Bezeichnung 1 a - j für die ersten 10 Proben welche sandgestrahlt wurden, für die Nichtgestrahlten 2 a - j = 11 - 20 und 3 a - j = 21 - 30. Die Proben wurden jeweils in 10 er-Gruppen gebrannt.

### 2.2 Prüfkörperherstellung nach Gebrauchsanleitung

Es wurden von fünf Probanden jeweils 30 Zirkonoxidplättchen (Y-TZP Nacera Pearl 1 Doceram MC, Charge: 3158654) mit der Zirkonverblendkeramik Geller ZI-F verblendet.

In der Verarbeitungsanleitung für die Probanden sind die einzelnen handwerklichen Arbeitsschritte nach Herstellerangaben, Autor der vorliegenden Studie und ISO-Norm 9693, eine Material- und Instrumentenaufstellung sowie die Brenntabelle für den Keramikofen aufgeführt. Die Verarbeitungsanleitung ist unter 2.4.2 näher beschrieben.

### 2.2.1 Sandstrahlvortest

Um zu untersuchen, welcher Strahldruck eine makroskopisch ausreichend raue Oberfläche erzeugt, wurde in einem „Vortest“ eine Zirkoniumdioxidprobe auf beiden Seiten mit unterschiedlichem Strahldruck (0,5, 1,0 und 2 bar Druck) und Aluminiumoxid („Dental Central Alox“ Edelkorund 110 µm) behandelt. Dazu wurde die zu untersuchende Substratoberfläche mit Permanentmarker gekennzeichnet und so lange bestrahlt, bis die markierte Stelle entfernt war. Nach anschließender Messung der Rautiefe wurde dann eine Druckhöhe von 1,5 bar für die sandgestrahlten 10 ersten Proben (1 a - j) festgelegt da dieser Sandstrahldruck eine sichtbar matte Oberfläche auf der Probekörperoberfläche hinterließ. Zudem entspricht dieser Sandstrahldruck dem gängigen Vorgehen im zahntechnischen Labor.



**Abbildung 1: gelb markiertes Rechteck: geschwärzte Abstrahlflächen auf dem Zirkoniumdioxidsubstrat**

Zum Abstrahlen der 10 ersten Zirkoniumdioxidplättchen jeder Probandenreihe wurden diese exakt untereinander in einer Linie auf eine Plastiksachtel gelegt und auf beiden Seiten mit Klebestreifen fixiert, so dass ein mittleres Feld von 12 mm Breite entstand (s. Abbildung 1).

Das Feld wurde mit Markerstift geschwärzt und von jedem Probanden auf diese Weise 10 Proben abgestrahlt.

### **2.2.2 Rauheitsmessung**

Die Rauheitsmessungen fanden mit dem Gerät Perthometer S6P (Mahr, Göttingen) statt. Mit Hilfe der Messungen sollten Unterschiede der

Substratoberflächen veranschaulicht werden. Dazu wurde die Oberfläche der Testproben mit einer Tastnadel (taktile Methode) abgetastet. Zur Ermittlung der Oberflächenrauheit ( $R_a$  in  $\mu\text{m}$ ) erfolgte die Profilanalyse mit 3 Einzelprofilmessungen im Messbereich von  $\pm 250 \mu\text{m}$ .

Es bestand folgende Probenanordnung: In Draufsicht auf das Zirkoniumdioxidplättchen betrug die Taststrecke (Strecke, die das Tastsystem insgesamt auf der Substratoberfläche zurücklegt) 5,6 mm mittig im sandgestrahlten Bereich.

Die Auswertung der Messdaten erfolgte nach ISO DIN 4768.

Es wurden jeweils die ersten 10 (sandgestrahlten) Proben jedes Probanden gemessen.

Nach den obigen Profilparametern folgte eine Rauheitsmessung ebenso an polierten Proben ( $n = 10$  Proben randomisiert entnommen). Da polierte und nichtgestrahlte Probenplättchen eine Schleifrichtung aufweisen, verhindert man mit einer in  $90^\circ$  zur Schleifrichtung versetzten Messstrecke dass der Messtaster in eine Schleifspur gerät.

### 2.2.3 Rasterelektronenmikroskop

Für das Rasterelektronenmikroskop (REM LEO 1430, Zeiss) kamen folgende Proben zur Untersuchung:

→ Proband 1 - 5 jeweils Probe 1 d

Jedes Probenplättchen wurde auf einen Probenteller geklebt, mit Silberleitlack fixiert und je 2 x bedampft (Spütkoater SCD 050, BAL-TEC).

Der Vorgang lief unter folgenden Parametern:

Zeit: 100 sec

Voltage: 61 mV

Temperatur: 20 °C

Target: Au-Pd (Gold-Palladium)

Gas: Argon

Die EDX-Analyse (Flächenmessung) beinhaltet eine 100fache Vergrößerung in der Mitte der Probe. Die REM-Messungen sind als P1S1DA (P1 = Proband 1, S1d = Sample 1 d, A = Area) hinterlegt.

Außerdem wurden REM-Bilder in 250facher, 1000facher, 5000- und 10000facher Vergrößerung erstellt sowie Panorama-Aufnahmen (aus mehreren Einzelbildern) über die ganze Strahlfläche.

### 2.3 Verblendung der Zirkoniumdioxidproben

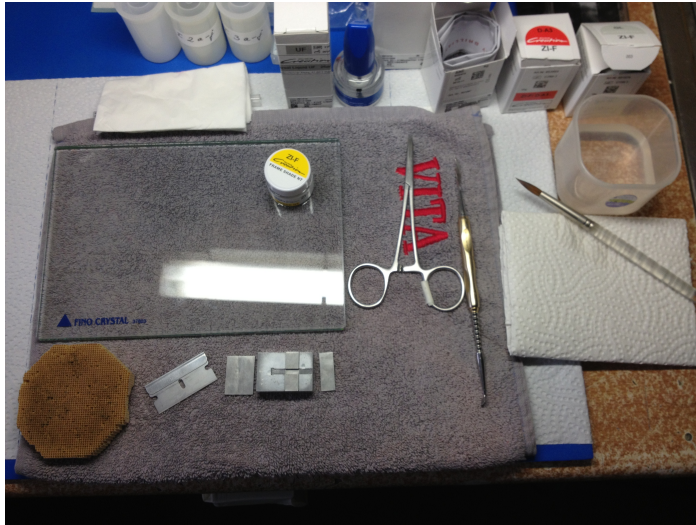
Die Kalibrierung eines Dentalkeramikofens ist ein Vorgang um den richtigen Brenngrad der Dentalkeramik zu prüfen und damit den Langzeiterfolg der Keramikverblendung zu sichern [33]. Zur Ermittlung der Temperaturgleichmäßigkeit und um den vom Hersteller der Zirkoniumdioxidverblendkeramik (ZI-F Creation W. Geller) definierten Soll-Arbeits-temperaturbereich zu gewährleisten, fand eine Kalibrierung des für die Studie verwendeten Keramikbrennofens (Vita Vacumat 40) mit dem Vita-Silberprobenset (Vita-Best. Nr. B 230) statt.

Die Brenntemperatur eines Keramikbrennofens wird mit 2 Brenndurchgängen überprüft: Ein ca. 1 cm langer Silberdraht von 1,5 mm Durchmesser wird einer Temperatur von 955 °C bei 1 min Haltezeit ausgesetzt. Nach diesem Vorgang darf der Silberdraht nicht geschmolzen sein. Erst nach einem zweiten Brenndurchgang bei 965 °C sollte das Silberdrahtstück zur Kugel verschmolzen sein. Da sich in der vorliegenden Arbeit nach den zwei oben genannten Bränden keine vollständige Verschmelzung der Silberprobe ergab, wurde der Keramikbrennofen neu justiert und eine Temperaturerhöhung von + 10 °C gespeichert [34]. Nach Durchlaufen eines Brennvorgangs mit dem korrigierten Brennprogramm (bei 975 °C) lag das Silberdrahtstück als gleichmäßige Kugel in der Trägermulde, wie in Abbildung 2 zu sehen ist.

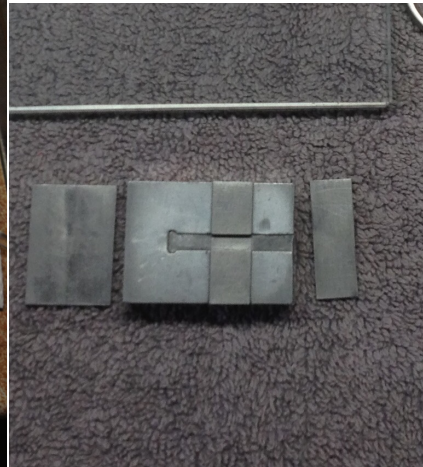


**Abbildung 2: Kalibrierung des Keramikofens**

Um einheitliches Vorgehen der Testpersonen zu gewährleisten bekamen die 5 Probanden alle ein identisches Instrumentarium vorgelegt, bestehend aus einer Glasplatte (Fino Dental) zum Anmischen der Keramikmassen, einem Keramikpinsel (Fino Iceline Professional Kolinsky Gr. 7), einem Modellierinstrument Lecron (mit geriffeltem Mittelteil) und einer Klemmpinzette (Fino Dental). Abbildung 3a zeigt den Arbeitsplatz der Probanden.

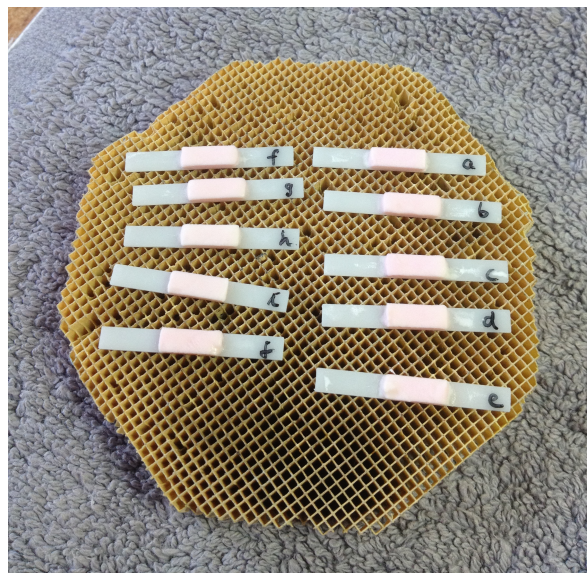


**Abbildung 3a: Arbeitsinstrumente für die Probenherstellung**



**Abbildung 3b: Schwickerath-Vorrichtung**

Für den Brennvorgang wurde ein Wabenbrennträger verwendet, die Reihenfolge a - j, wie in Abbildung 4 angeordnet, hielt jeder Proband bei allen Brenndurchgängen ein.



**Abbildung 4: Verblendete Proben auf dem Brennträger mit Reihenfolge a - j**

Auf die Zirkoniumdioxidplättchen wurde mithilfe der Schwickerath-Formschablone mit einer Abstands-Vorrichtung von 1,3 mm wie in Abbildung 3b dargestellt, ein Keramikrechteck mit den Maßen nach der ISO-Norm 9693 (s. 3.4.2 Abb. 34) von ca. 8 mm x 3 mm x 1,1 mm aufgebrannt. Es erfolgten ein Linerbrand, zwei Dentinbrände und ein Glasurbrand nach Herstellerangaben. (s. u.)

Dazu verarbeiteten die Probanden Zirkonoxid-Verblendkeramikmassen aus dem Sortiment Creation ZI-F von Willi Geller:

ML Modelling Liquid 150ml (ZI- F LOT 2180)

UF Universal Liquid 25ml (ZI- F LOT 2163)

ZI- F Frame Shade NT (LOT B 224F3)

ZI- F Dentin A3 (LOT C 260- 2)

ZI- F Glasur (LOT C 159 - 1)

In Tabelle 2 sind die Brenntemperaturen nach Herstellerangaben aufgeführt. Bei der Positionierung des Wabenbrennträgers auf die Brennmuffel des Keramikofens (s. Abbildung 5) musste darauf geachtet werden, dass die Verblendplättchen darauf nicht verrutschen. So konnten die Prüfkörper nach dem Brennvorgang, da die Beschriftung auf den Plättchen dann nicht mehr vorhanden war mit Hilfe der korrekten Anordnung auf dem Träger in der richtigen Reihenfolge neu beschriftet werden.

**Tabelle 2: Brennparameter für ZI-F Geller Creation**

	Vorwärmtemperatur	Trockenzeit	Temperaturanstieg	Vakuum	Endtemperatur	Haltezeit	Erscheinungsbild
Liner-Brand	450 °C	6 min	45 °C/min	mit	860 °C	1 min	glänzend
Dentinbrand	450 °C	6 min	45 °C/min	mit	810 °C	1 min	glänzend
Glanzbrand	450 °C	2 min	45 °C/min	ohne	790 °C	1 min	glänzend



**Abbildung 5: Proben auf der Brennmuffel vor Brennstart bei offenem Keramikofen**

In der vorliegenden Studie wurde kein Regenerationsbrand vor dem Durchlaufen der einzelnen Brennprogramme nach Tabelle 2 durchgeführt.

## 2.4 Probandenvorgehen

### 2.4.1 Probandenvorstellung nach zahntechnischen Erfahrungen

Tabelle 3: Probandenkollektiv

	Schul-und Berufslaufbahn	zahntechnische Erfahrung
Proband 1	mittlere Reife, parallel griechisches Abitur, Ausbildung zur Zahntechnikerin, Abendgymnasium und Abitur, Studium der Zahnmedizin, Zahnärztin	22 jährige Erfahrung als Zahntechnikerin und Dentalkeramikerin
Proband 2	Abitur, Studium der Zahnmedizin, niedergelassener Zahnarzt	keine zahntechnische Erfahrung
Proband 3	Hauptschule, Ausbildung zur zahnmedizinischen Fachangestellten, ZMF	keine zahntechnische Erfahrung
Proband 4	Abitur, Ausbildung zum Elektrotechniker, Dentalgerätewartung	keine zahntechnische Erfahrung
Proband 5	Hauptschule, Ausbildung zum Zahntechniker, Fachabitur, Bachelor Dentaltechnologie	halbes Jahr Erfahrung als Zahntechniker-Geselle

Lediglich zwei der fünf Probanden aus Tabelle 3 besitzen zahntechnische Erfahrung im Umgang mit Dentalkeramik. Folgendes Vorgehen der einzelnen Probanden nach Arbeitsanleitung, ohne weitere Hilfestellung, konnte dokumentiert werden:

Proband 1 hatte für die Probenherstellung am wenigsten Zeit zur Verfügung (zwischen Arbeitszeiten). Das Verblenden erfolgte mit schnellem Aufschichten der Massen in die Formschablone ohne viel Flüssigkeit abzusaugen (sahnig-cremige Konsistenz), in „Fließbandherstellung“. Lufteinschlüsse beim Mischen

und Schichten der Keramikmasse wurden weitestgehend vermieden. Mit zwei Pinselportionen wurde die Form aufgefüllt und die wenige überschüssige Masse mit der Rasierklinge abgestrichen. Das kurze, leichte Klopfen der Vorrichtung auf die Tischkante verdichtete die Keramik. Die Linermasse trug Proband 1 sehr dünn auf, die Glasurmasse jeweils dicker. Die brennfertigen Proben kamen so gut wie nicht ausgetrocknet in den Ofen, da Proband 1 für jeweils 10 Proben ca. 10 min bis zum Brennen benötigte.

Verblendreihenfolge: 1, 2, 3

Proband 2 arbeitete sehr akribisch und perfektionistisch. Die Masse wurde nach sorgfältigem Anmischen durch Aufsaugen des Pulvers von Liquid in der Probenschablone mit einem Kosmetiktuch getrocknet und die beiden Deckplättchen der Vorrichtung dann mit der Längskante an der Zirkonprobe entlanggezogen um eine saubere, gerade Verblendkante zu erhalten. Proband 2 füllte die Schablone mit vielen kleinen Pinselportionen Keramikmasse. Diese wurde mit einigen Liquidtropfen versorgt, ohne jedoch auszutrocknen (körnig bis sahnige Konsistenz mit sichtbar wenigen Luftblasen). Der Zeitabstand von der ersten Probe bis zum Brand der übrigen neun war durch das langsame Schichten groß. Die Proben standen lange vor dem Brennofen bis zum jeweiligen Brand.

Verblendreihenfolge: 2, 3, 1

Proband 3 musste unter großer Hitze (ca. 35 °C Raumtemperatur) aufbrennen, daher trocknete die Keramikmasse auf der Glasplatte ständig aus. Gegen das Austrocknen wurde regelmäßig der Pinsel in den Wasserbecher getaucht und so die Masse mit Rühr- und Wischbewegungen des Lecroninstrumentes oder Keramikpinsels sehr nass und luftblasenreich gehalten. Die fertigen Proben standen vor dem noch zusätzlich Wärme ausstrahlenden Keramikofen. Es konnte ein zügiges, aber weniger sorgfältiges Vorgehen im Verlauf beobachtet werden. Die mit einer Pinselportion auf einmal gefüllte, unverdichtete Form wurde jedes Mal mit der Rasierklinge von Überschuss befreit. Proband 3 arbeitete mit sehr flüssiger Masse, die jedoch trotzdem ständig austrocknete.

In trockenem Zustand waren zahlreiche Lufteinschlüsse verschiedener Größe in der Schichtung erkennbar.

Verblendreihenfolge: 1, 3, 2

Proband 4 arbeitete sehr genau und anfangs zögerlich, bis sich eine gewisse Routine einstellte. Die Proben 1 a - j wurden ohne Lesebrille abgestrahlt, ebenso verblendete der Proband die Reihe 3 a - j vollständig ohne die Brille. Vorsichtiges Auftragen der Massen in die Schablone und säuberliches Glattstreichen der Oberfläche mit Hilfe einer Rasierklinge wurden bis zur letzten Probe durchgehalten. Mittels ein, zwei Liquidtropfen hielt Proband 4 die Keramikmasse modellierfähig (sahnige Konsistenz). In der Formschablone strich Proband 4 die Masse mit dem Pinsel glatt, bevor die nächste Pinselportion darüber gelegt wurde. Der Proband versuchte keine Luftblasen in die Masse einzubringen.

Verblendreihenfolge: 1, 3, 2

Proband 5 strahlte beim Sandstrahlen zweimal über die Proben 1 a - j, da noch glänzende Stellen vorhanden waren. Linerbrand: Liner wurde mit dem Spatel durchgerührt und mit dem Pinsel dünn aufgetragen, die Überschüsse an den Probenrändern und dem Boden wurden mit dem Finger gesäubert:

Zur Linerapplikation fixierte Proband 5 jeweils 10 Proben mit Klebeband am Tisch und beschickte das freie Feld in der Mitte mit Liner.

Für den Dentinbrand vermischte Proband 5 5 g Pulver mit 3 ml Modellierliquid, isolierte die Formschablone (Carat<sup>®</sup> Isolating Fluid, Hager&Werken GmbH & Co. KG, Duisburg, Germany) und brachte den Keramikschlicker in die Form. Anschließend klopfte er die Form zur Verdichtung der Masse auf die Tischfläche. Mittels eines Papiertuchs wurde überschüssiges Liquid abgesaugt. Die Ränder und der Boden wurden mit Hilfe der Finger gesäubert und die Proben nach Brenntabelle gebrannt.

Vor dem zweiten Dentinbrand wurden 2,5 g Pulver mit 1,5 ml Liquid vermischt und wie oben vorgegangen, für den Glanzbrand 3 g Pulver und 2,5 ml US Fluid

verwendet. Die Glasurmasse wurde durch sogenanntes Riffeln verdichtet. Zwischen den verschiedenen Bränden lagen die Proben teilweise 14 Tage.

Verblendreihenfolge: 1, 2, 3

Mit Hilfe der Verblendreihenfolge soll gezeigt werden, ob ein Trainingseffekt im Sinne einer Routineeinstellung im Laufe der Probenherstellung stattgefunden hat.

#### **2.4.2 Arbeitsanleitung**

Für die Probanden wurde eine Arbeitsanleitung erstellt, die nachfolgend dargestellt ist. Diese beinhaltet die Herstellerangaben und zahntechnisches Wissen zur Verarbeitung von Verblendkeramik sowie die ISO-Normangaben.

#### **Verarbeitungsanleitung für die Probekörperherstellung zur Untersuchung des Haftverbunds im Vollkeramischen System**

##### **Y-TZP Zirkoniumdioxidkeramikplättchen verblendet mit Creation ZI-F Willi Geller**

##### **Nach Verarbeitungsanleitung Creation ZI-F/CT W. Geller**

1) Abstrahlen der Zirkoniumdioxidplättchen mit  $Al_3O_2$  (Aluminiumoxid) 110  $\mu m$  und 1,5 bar Druck, Reinigung mit Wasser/ Dampfstrahlen. Danach Anfassen der Plättchen mit den Fingern vermeiden, Handling mit Klemmpinzette.

2) Liner-Brand: Einlegen des Zirkoniumdioxidplättchens in die Formschablone. Sahniges Anrühren auf der Glasplatte von Frameshade FS-NT mit Universalflüssigkeit, Applikation einer dünnen, möglichst gleichmäßigen Schicht mit dem Pinsel. Leichtes Absaugen überschüssiger Flüssigkeit mit einem Kosmetiktuch. Das Plättchen mit der Arterienklemme aus der Form entnehmen

und auf dem Brenngutträger lagern (s. Abb. 4). Diesen in die Brennkammer des Keramikofens stellen.

3) Dentinbrand: Anrühren der Dentinmasse: Pulverportion von mehreren Liquidtropfen aufsaugen lassen, Masse leicht vermischen (ohne Luftblasen einzubringen) und zügiges Auftragen auf das wieder in die Formschablone eingebrachte Plättchen. Vorsichtiges Klopfen der Form auf die Tischfläche oder Riffeln mit dem Modellierinstrument um Masse zu verdichten, Absaugen (s. o.) bis Masse nicht mehr zu flüssig ist, Entnahme, Lagerung nach Skizze auf dem Brennt Träger und zeitnahes Brennen (nach Tabelle 2) um langes Austrocknen zu vermeiden.

4) Glanzbrand: Anmischen des Glazepulvers mit Universalflüssigkeit zu honigartiger Konsistenz, gleichmäßiges Auftragen und Brennen (s. o.).

#### **Nach ISO-Norm 9693 (6.3.3.2)**

Entsprechend der Gebrauchsanleitung des Herstellers wird die Keramik symmetrisch auf jeden Probekörper aufgetragen um eine rechteckige Form mit der Länge 8 mm, Breite 3 mm und Dicke von 1 mm zu ergeben.

Um diese Maße zu erhalten werden 2 Dentinbrände durchgeführt, danach folgt die Glasur (s. o.). Die Brenntemperaturen nach Hersteller müssen eingehalten werden.

Die Verarbeitungsanleitung beinhaltet weiterhin die Brennparameter wie in Tabelle 2 aufgeführt sowie eine schematische Anordnung der Proben auf dem Brennt Träger (Abb. 4).

## **2.5 Probenvermessung**

### Schieblehre:

Die so verblendeten Zirkonoxidplättchen wurden daraufhin in Breite und Dicke an drei verschiedenen Stellen mit einer digitaler Schieblehre (Digital Display

Calipers GMC-190 Goldtool) vermessen und die jeweiligen Mittelwerte in Tabellen aufgelistet.



**Abbildung 6: Schieblehre**

#### Fotomikroskop:

Eine Vermessung der Proben erfolgte auch mit dem Fotomikroskop (Foto-Makroskop WILD M400 Wild, Heerburg). Da das Sandstrahlen in dieser Studie keine größere Auswirkung auf den Haftverbund dieser Proben hat, wurden für die fotomikroskopische Vermessung nur die nichtgestrahlten Proben verwendet. Dazu mussten die betreffenden Probenplättchen (mit intakter Verblendfläche nach dem Biegetest) auf Objektträgern mittig platziert und in 10-facher Vergrößerung fotografiert werden (s. Abbildung 7). Die gespeicherten Bilder (Bildanalysesoftware Image Pro Plus Version 4.5) wurden (Proben in Seitenansicht) analysiert: Die Probe wurde zeichnerisch umfahren und somit die Fläche sowie an vier Stellen (Ränder und Mitte) die Dicke gemessen.



Abbildung 7: Stereomikroskop mit Fotoaufsatz und Probenträger

### 2.5.1 Mikroskopische Auswertung

Bevor die mikroskopische Auswertung stattfand, wurden die Proben auch mit bloßem Auge untersucht (s.u.). Die ausgewählten Proben (s. Tabelle 5) wurden für beide Untersuchungen verwendet. Bezüglich der Verblendqualität lässt sich (analog wie für die optische Bewertung s.u.) folgende Einteilung aufstellen: Von „guter“ Qualität bedeutet, dass sich die Verblendkeramik noch vollständig auf dem Substrat befindet, hat sie sich bereits von diesem abgelöst oder weist einen Riss auf, wird die Probe mit „schlechter“ Qualität bewertet.

### 2.5.2 Optische Bewertung der Verblendung und des Rissverlaufs

Eine Bewertung des Rissverlaufs/Bruchgeschehens kann nach Auffälligkeiten mit bloßem Auge und optischem Eindruck zusammengefasst werden: unter „schlecht“ fallen Proben mit Abplatzungen, beginnender oder ganzer Ablösung der Verblendkeramik sowie Kuhlenbildung, Rissen und Lufteinschlüssen. Mit

„gut“ werden Proben mit symmetrischer, glatter und intakter Verblendfläche bewertet.

## 2.6 Schwickerath-Test nach ISO-Norm 9693

Der Schwickerath-Test wurde in Anlehnung an ISO 9693 durchgeführt. Dazu wurde jeder Prüfkörper in die 3-Punkt-Biegevorrichtung gelegt und bis zum Erreichen der Maximalkraft  $F_{\max}$  auf Druck belastet.

Es wurde für jeden Probanden eine Maximalkraft  $F_{\max}$  (N) gemessen. Mit dieser Kraft, der Probendicke und einem definierten E-Modul für das vorliegende Zirkoniumdioxid (205 GPa, Herstellerangaben), konnte das Berechnungsschema der ISO-Norm 9693 zur Berechnung der Verbundfestigkeit ( $\tau_B$ ) verwendet werden [7].

Mit dem Berechnungsschema nach ISO 9693 kann die Festigkeit beim ersten Rissbeginn berechnet werden. Das Berechnungsschema wird im Folgenden dargestellt.

Rechenflow zur Berechnung der Verbundfestigkeit ( $\tau_B$ ) nach ISO 9693:

Begin: Input data:  $E_M$  (GPa),  $d_M$  (mm),  $F_{\text{fail}}$  (N)

Calculation of  $k$  at  $d_M$  (1) = 0,44;  $d_M$  (2) = 0,5;  $d_M$  (3) = 0,56

for the actual value of  $E_M$ :

$$k(1) = 1,818 \times 10^{-5} \times E_M^2 - 1,873 \times 10^{-2} \times E_M + 7,802$$

$$k(2) = 1,695 \times 10^{-5} \times E_M^2 - 1,521 \times 10^{-2} \times E_M + 6,131$$

$$k(3) = 1,614 \times 10^{-5} \times E_M^2 - 1,3 \times 10^{-2} \times E_M + 4,986$$

Calculation of the coefficients A,B,C of the parabola approximating the dependence of  $k$  on  $d_M$  for the actual value of  $E_M$ :

Definitions:  $D1 = d_M(1)$ ,  $S1 = k(1)$

$$D2 = d_M(2), S2 = k(2)$$

$$D3 = d_M(3), S3 = k(3)$$

$$\text{DET} = D2 \times D3 \times (D2 - D3) + D3 \times D1 \times (D3 - D1) + D1 \times D2 \times (D1 - D2)$$

$$A = 1/\text{DET} \times (D3 \times D2 - D2 \times S3 + D1 \times S3 - D3 \times S1 + D2 \times S1 - D1 \times S2)$$

$$B = 1/\text{DET} \times (D2^2 \times S3 - D3^2 \times S2 + D3^2 \times S1 - D1^2 \times S3 + D1^2 \times S2 - D2^2 \times S1)$$

$$C = 1/\text{DET} \times (S1 \times D2 \times D3 \times (D2 - D3) + S2 \times D3 \times D1 \times (D3 - D1) + S3 \times D1 \times D2 \times (D1 - D2))$$

$$\text{Calculation of the bond strength } \tau_B: \tau_B = F_{\text{fail}}(A \times d_M^2 + B \times d_M + C)$$

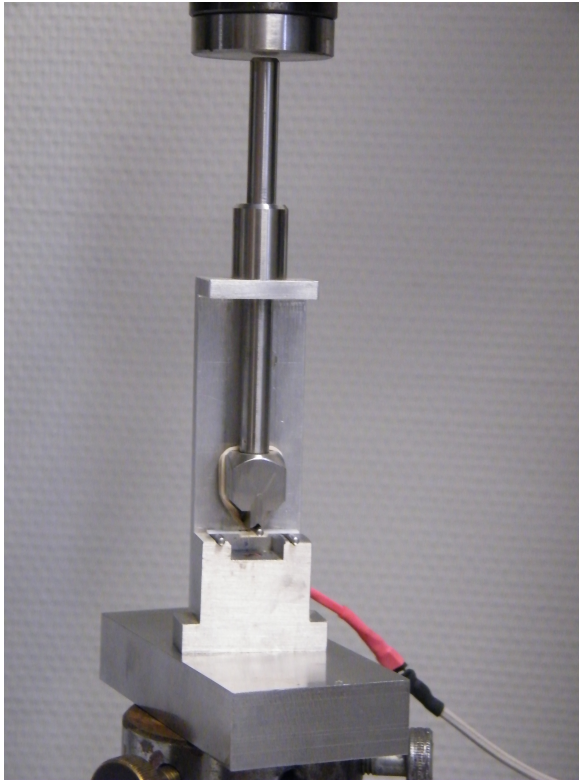
Output data:  $\tau_B$  (MPa) → End

Mithilfe der Faktoren in der oben genannten Formel kann man die Haftverbundfestigkeit berechnen.

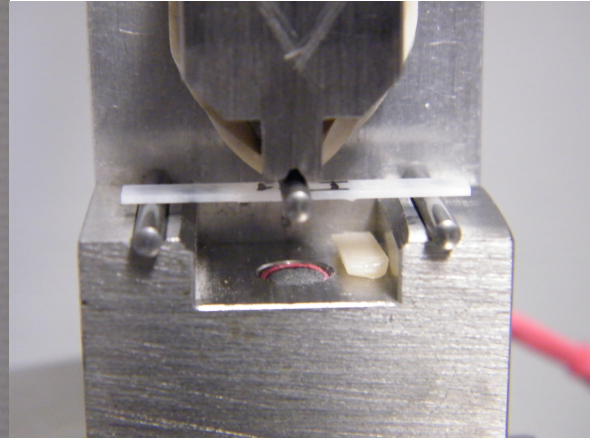
Aus der Formel wird ersichtlich, dass für die Berechnung der Verbundfestigkeit E-Modul und Dicke des Substrats eine Rolle spielen, ferner wird das ermittelte  $F_{\text{max}}$  benötigt.

## 2.7 Akustisches Signal

Zusätzlich wurde während des Dreipunkt-Biegetests mit einem Mikrofon ein akustisches Signal zur Rissbeginnprüfung jeder Probe in mV aufgenommen. Die Positionierung des Prüfkörpers in der Biegevorrichtung erfolgte mit der verblendeten Seite nach unten und befand sich somit genau über dem mittig darunter angebrachten Mikrofon (s. Abbildung 9). Die Daten der Universalprüfmaschine wurden an die mit ihr verbundenen Messgeräte weitergeleitet und zur Auswertung aufgezeichnet. Diese Messdaten konnten anschließend (wie in Abbildung 48 und 49 des Kapitels 3.6 exemplarisch dargestellt) in Kraft-Weg-Diagrammen und zugehöriger Aufzeichnung des akustischen Signals veranschaulicht werden.



**Abbildung 8: Foto vom Versuchsaufbau in der Universalprüfmaschine mit Mikrofon als Übersichtsaufnahme**



**Abbildung 9: Detailaufnahme des Mikrofons unter der Biegevorrichtung**

## **2.8 Bruchmodus**

Es wird der Bruchmodus der Verblendkeramik beim Schwickerath-Test untersucht. Dabei handelt es sich um ein adhäsives Bruchverhalten, wenn sich die Verblendung komplett vom Zirkonsubstrat abgelöst hat. Bleiben auf der Verblendfläche des Substrates nach dem Ablösen noch Keramikreste haften, liegt ein kohäsives Bruchverhalten vor. Sämtliche Proben aller Probanden wurden dieser optischen Analyse unterzogen.

## 2.9 Berechnung der Weibullfestigkeit

Die Weibullfestigkeit stellt eine Kenngröße für die Versagenswahrscheinlichkeit für bestimmte Probekörper dar. Sie liegt bei 63,2 % und ist ein Gütemerkmal der Qualität von keramischen Prüfkörpern. Anhand einer Regressionsgeraden erhält man ein Weibullmodul  $m$ , welches das Maß für die Streuung der Verbundfestigkeitswerte darstellt [35].

Zur Berechnung nach ISO 6872 werden die Messwerte von jedem Probanden in aufsteigender Reihenfolge (1 - 20) angeordnet. Dann gilt:  $P_f = i - 0,5/N$ ;  $i$  ist der 1 bis 20ste Rang,  $N$  die Probenanzahl und  $P_f$  ist die Versagenswahrscheinlichkeit einer Datenreihe [35].

$P_f$  wird durch den doppelten natürlichen Logarithmus  $\ln(\ln(1/(1 - P_f)))$  berechnet, dagegen die Spannung  $\sigma$  nur einfach. Dann wird der natürliche Logarithmus  $\ln$  von der Verbundfestigkeit  $\tau_B$  errechnet und damit eine Regressionsgerade in einem Diagramm grafisch konstruiert, wobei die Steigung  $m$  der Geraden der Weibullmodul ist und der Wert der Geraden am Punkt  $\ln(\ln(1/(1 - F))) = 0$  der Wert der mittleren Weibull-Festigkeit  $\ln \sigma_0$ .

Um die Weibullfestigkeit  $\sigma_0$  zu bestimmen, wird die Gerade  $y = 0$  gesetzt und nach  $x$  aufgelöst.  $x$  stellt dann den natürlichen Logarithmus der charakteristischen Festigkeit der Proben dar [35].

Die Weibullstatistik wurde sowohl mit den nicht sandgestrahlten Proben als auch mit den 10 ersten Proben, die sandgestrahlt worden waren für jeden Probanden durchgeführt.

Mit Hilfe dieser statistischen Betrachtung (nach Wallodi Weibull 1937) wird die für Keramiken charakteristische asymmetrische Festigkeitsverteilung (Fehlerverteilung) mit einbezogen und anhand des Weibullmoduls die Gefügequalität des Probekörpers beurteilt.

## 3 Ergebnisse

### 3.1 Rauheit

Zur qualitativen und quantitativen Oberflächencharakterisierung folgen Bilder (Rasterelektronenmikroskop, REM) jeweils in 1000facher und 5000facher Vergrößerung der Prüfkörper (Abbildungen 10-19):

Die Proben-Oberflächen zeigen auch bei größerer Schärfentiefe keine größeren Unterschiede:

Die Topografie aller REM-Bilder lässt multiple kurze Rillen erkennen, die nicht in die Tiefe gehen. Bei höherer Auflösung (5000x) können Bereiche von amorphen Schuppungen ohne scharfe Kanten beobachtet werden. Man kann keine Defekte wie Spalten oder Krater im Oberflächenrauheitsmuster sehen. Insgesamt können gleichmäßige Schuppungen der Substratoberfläche detektiert werden die durch den Sandstrahlprozess mit Aluminiumoxid entstanden sind.

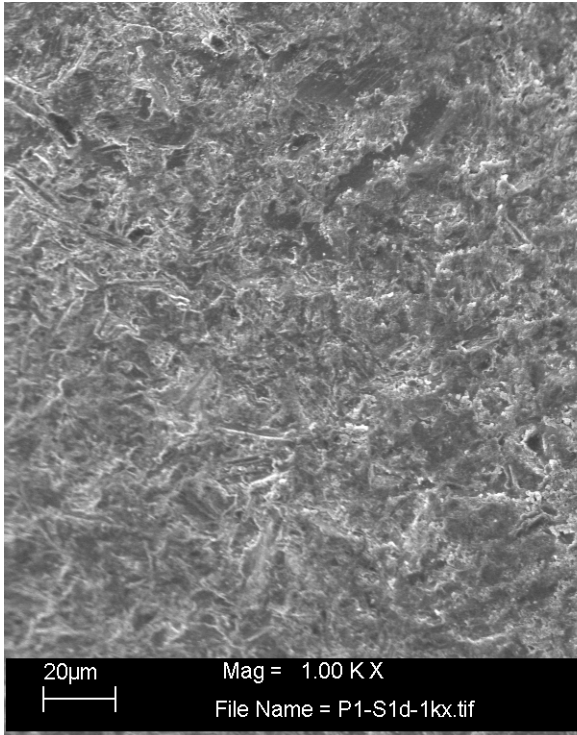


Abbildung 10: Proband 1 Probe 1 d, 1000 x

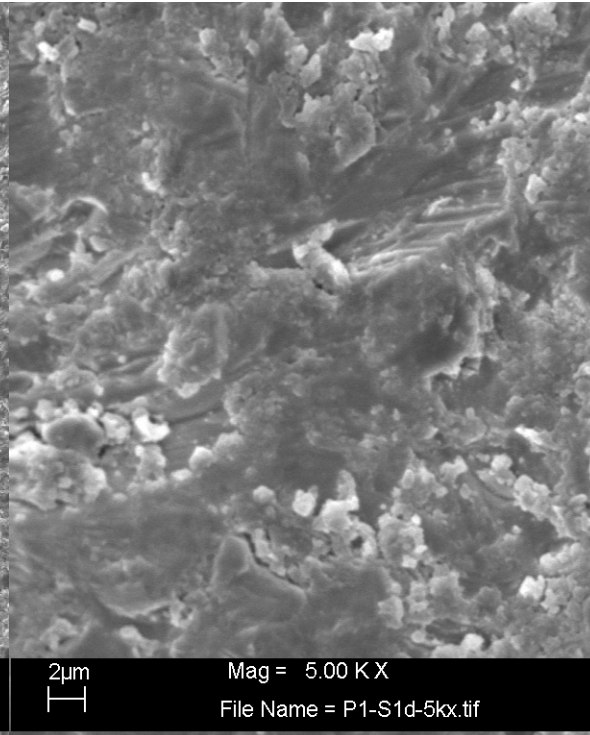


Abbildung 11: Proband 1 Probe 1 d, 5000 x

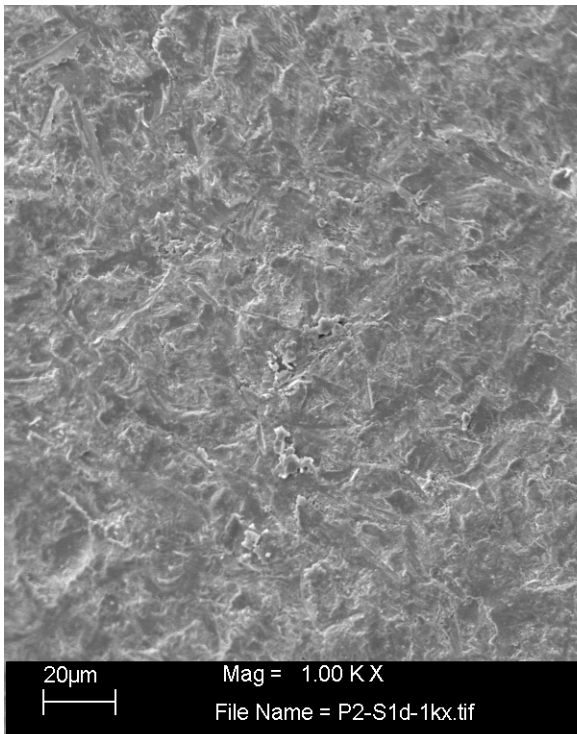


Abbildung 12: Proband 2 Probe 1 d, 1000 x

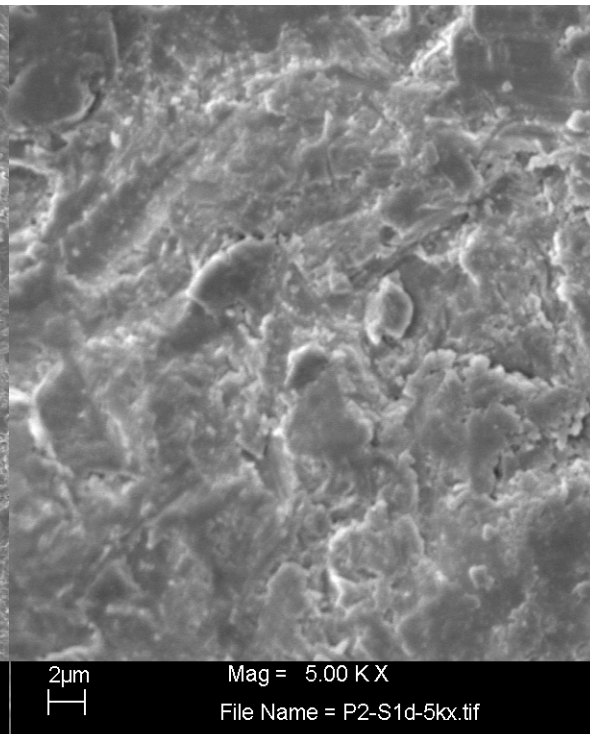


Abbildung 13: Proband 2 Probe 1 d, 5000 x

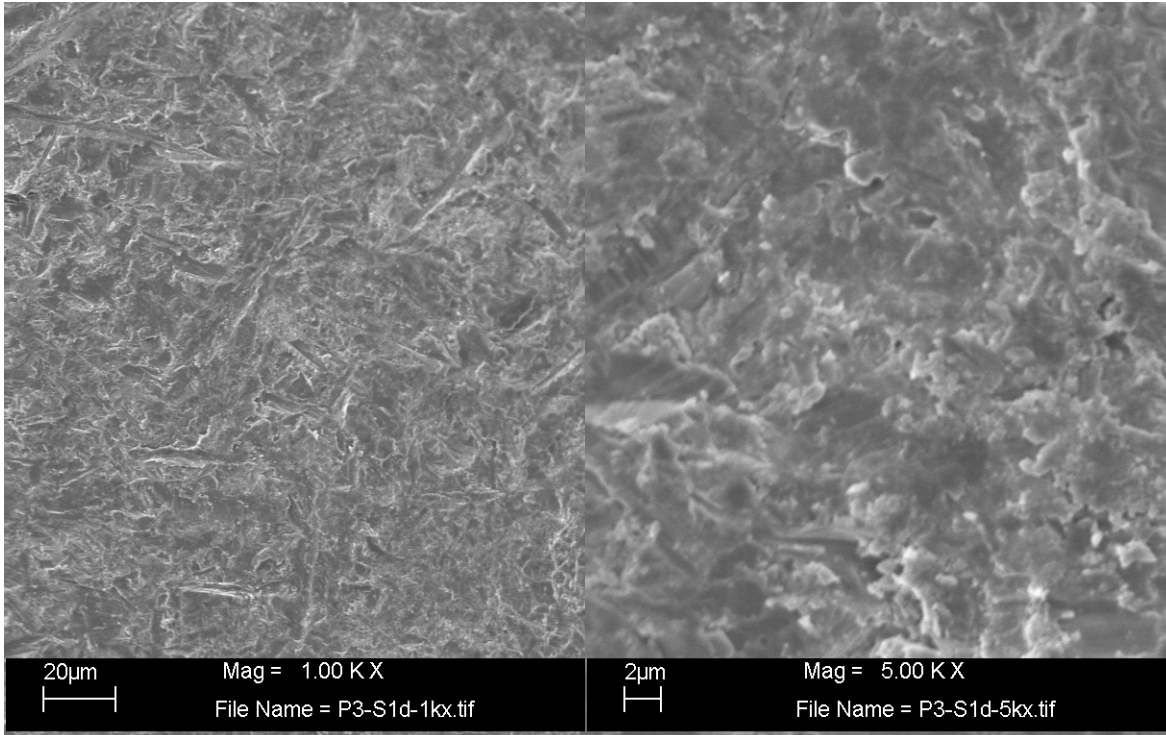


Abbildung 14: Proband 3 Probe 1 d, 1000 x

Abbildung 15: Proband 3 Probe 1 d, 5000 x

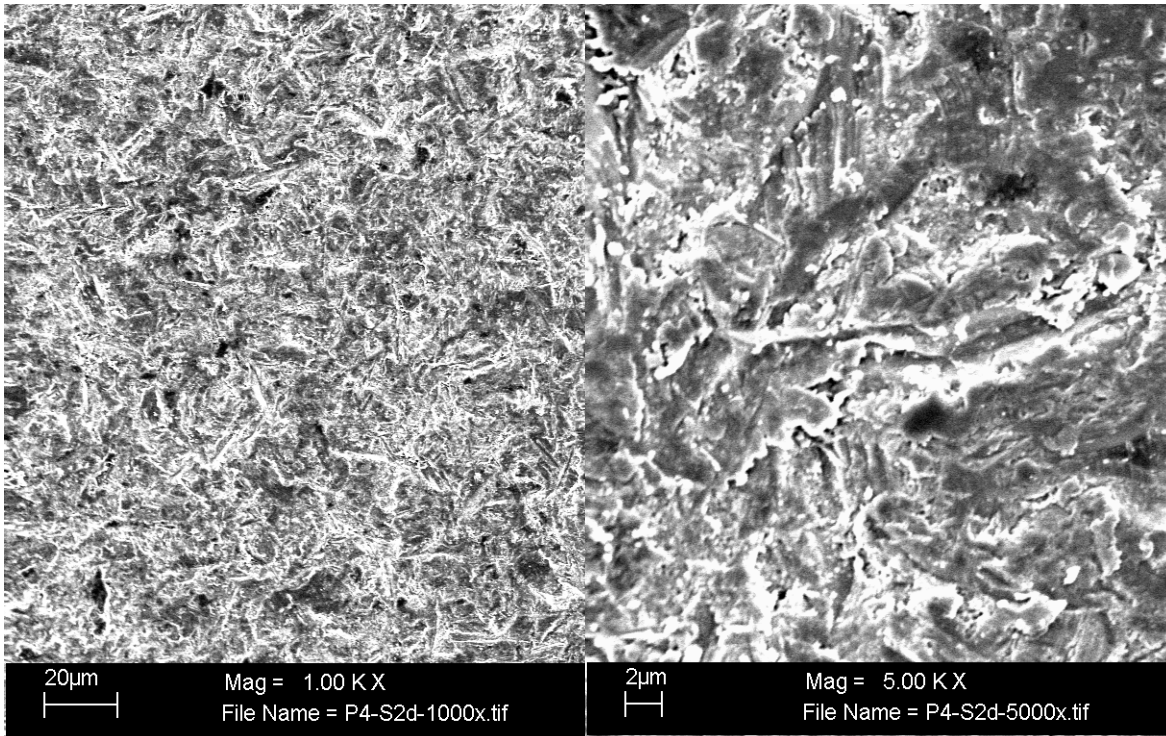
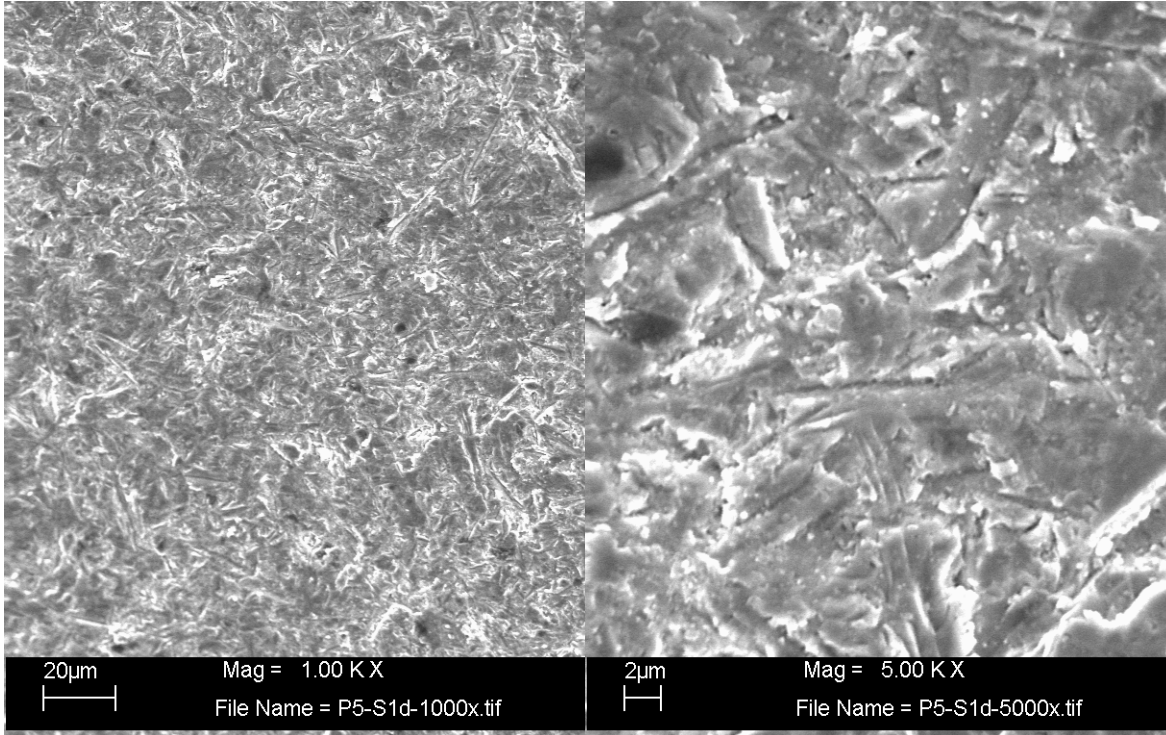
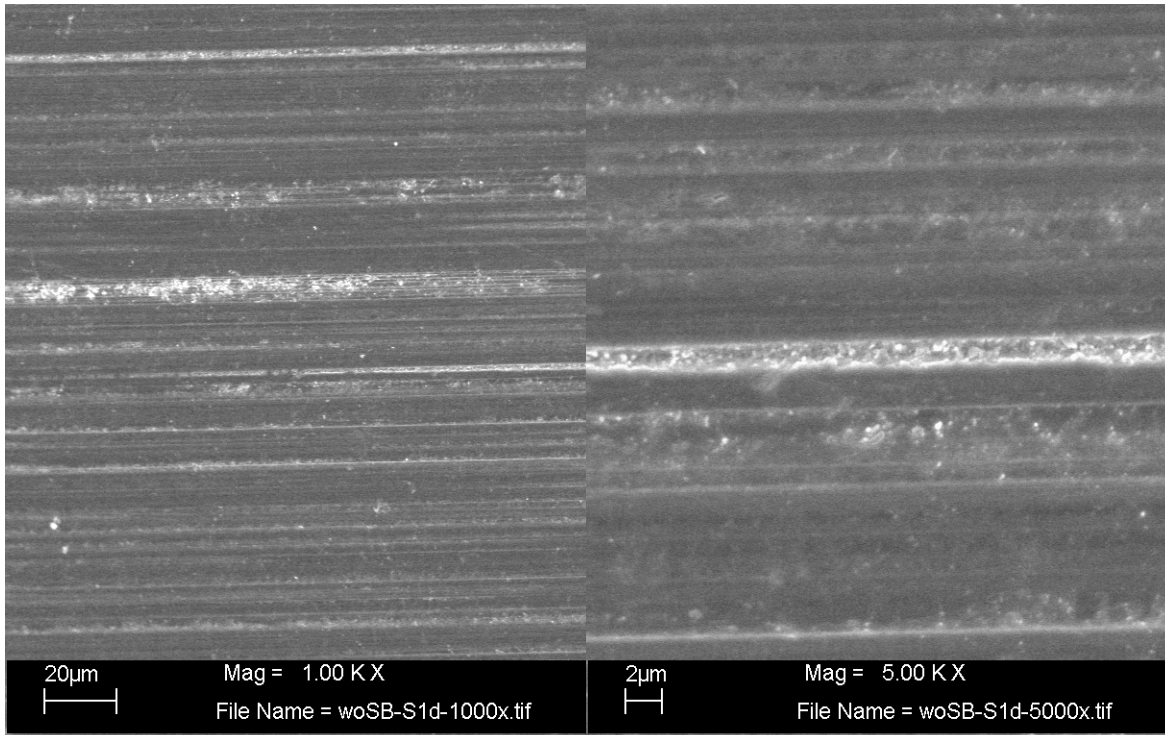


Abbildung 16: Proband 4 Probe 1 d, 1000 x

Abbildung 17: Proband 4 Probe 1 d, 5000 x



**Abbildung 18: Proband 5 Probe 1 d, 1000 x**      **Abbildung 19: Proband 5 Probe 1 d, 5000 x**



**Abbildung 20: Substratoberfläche nicht sandgestrahlt, 1000 x**

**Abbildung 21: Substratoberfläche nicht sandgestrahlt, 5000 x**

Die Abbildungen 20 und 21 stellen die Zirkoniumdioxidoberfläche ohne den Sandstrahlvorgang in 1000- und 5000facher Vergrößerung dar. Die sichtbaren Linien sind auf den Schleifprozess beim Herstellen der Zirkoniumdioxidplättchen zurückzuführen. In Abbildung 20 ist die breiteste Linie mit etwa 10 µm und in Abbildung 21 mit ca. 2 µm erkennbar.

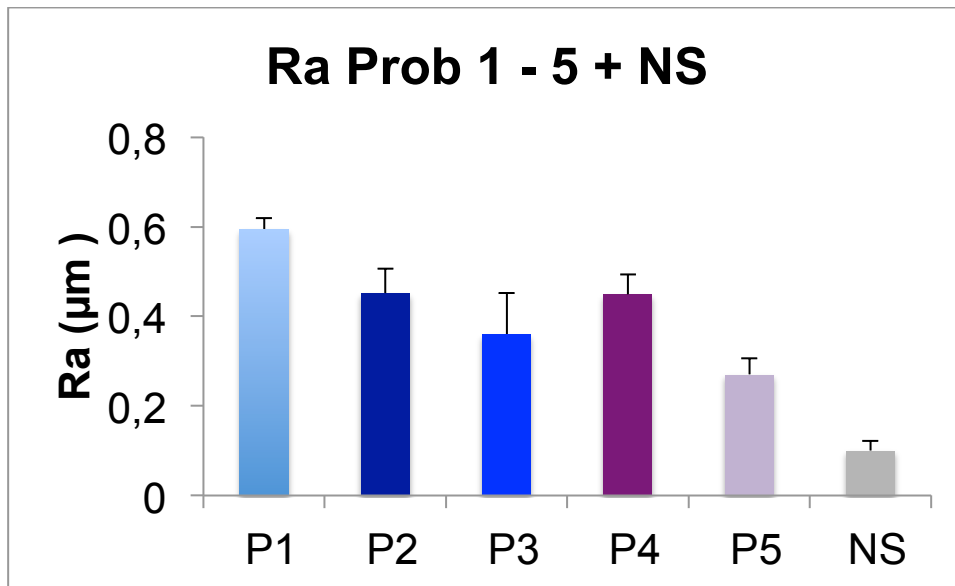


Abbildung 22: Mittelwert von Ra der sandgestrahlten 10 Proben von jedem Probanden und der 20 nichtgestrahlten (NS) als Referenz

Die sandgestrahlten 10 Proben der Probanden zeigen in Abbildung 22 einen Unterschied zu den nichtgestrahlten Proben (NS) bezüglich der Oberflächenrauheit (Ra in µm). Im Haftverbund wirkt sich das Sandstrahlen jedoch nicht signifikant aus (s. u.).

### 3.2 Darstellung der Kraftwerte

Der Schwickerath-Test (ISO-Prüfnorm 9693) ergibt für die jeweils 30 Prüfkörper der 5 Probanden folgende Ergebnisse:

$F_{\max}$ -Werte im Mittelwert:	→ Proband 1:	17 N ± 2,5 N
	→ Proband 2:	13 N ± 2,3 N
	→ Proband 3:	11 N ± 3,7 N
	→ Proband 4:	15 N ± 4,1 N
	→ Proband 5:	10 N ± 2,8 N

Die ermittelten Kraftwerte liegen im Bereich 10 N - 17 N. Der geringste Wert wurde bei Proband 3 mit 11 N erreicht, der höchste Wert ergab sich bei Proband 1 mit 16 - 17 N. Die Probanden 2, 4 und 5 lagen dazwischen.

Die folgenden Abbildungen 23 - 27 zeigen die Krafteinzelwerte der Probanden 1 - 5. Die violetten Punkte markieren die ermittelten Kraftwerte nach dem Sandstrahlen (n = 10); die blauen Punkte (n = 20) stellen die Werte der unbehandelten Proben dar. Bei Proband 1 liegen die Werte höher und konstanter als bei den übrigen. Bei Proband 3 treten starke Unregelmäßigkeiten sowohl der blauen als auch der violetten Probenpunkte auf. Auch die Probenpunkte beider Gruppen der Abbildung 26 lassen eine starke Streuung erkennen. Die sandgestrahlten violetten Punkte (n = 10) zeigen bei allen Probanden keine auffällig höheren Werte als die nichtgestrahlten blauen (n = 20).

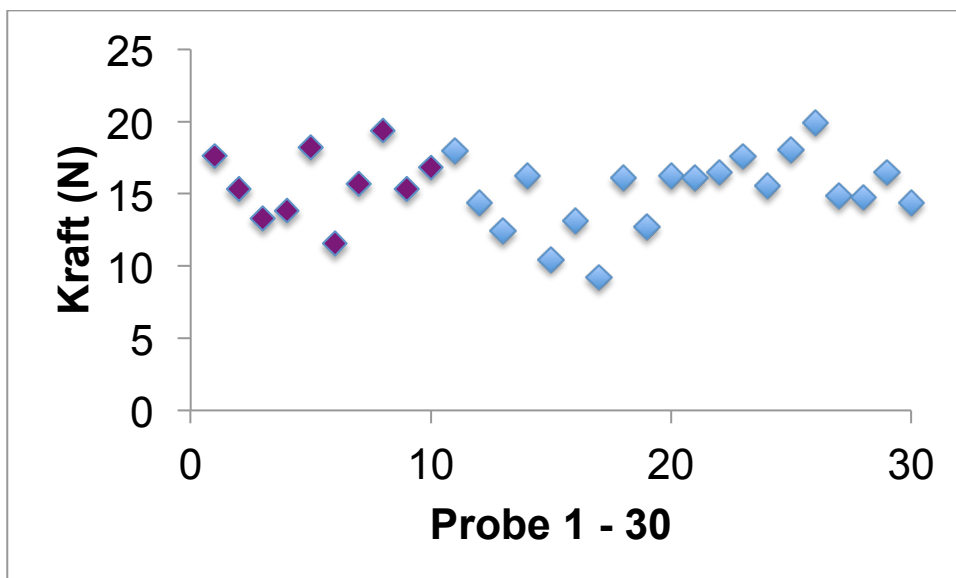


Abbildung 23: Krafteinzelwerte Proband 1: lila Werte n = 10 SB (sandgestrahlt), blaue Werte n = 20 NS (nicht gestrahlt)

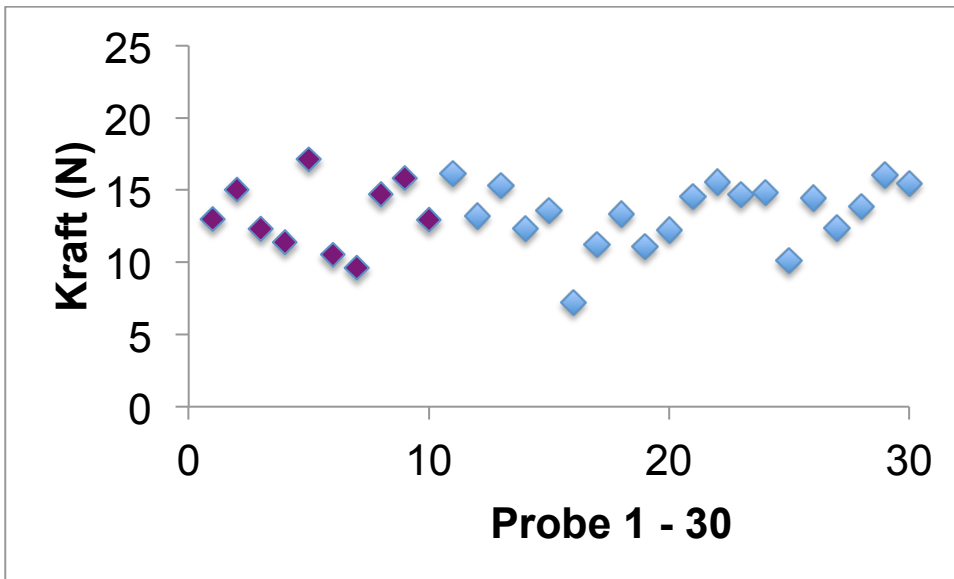


Abbildung 24: Kräfteinzelwerte Proband 2: lila n = 10 SB, blau n = 20 NS

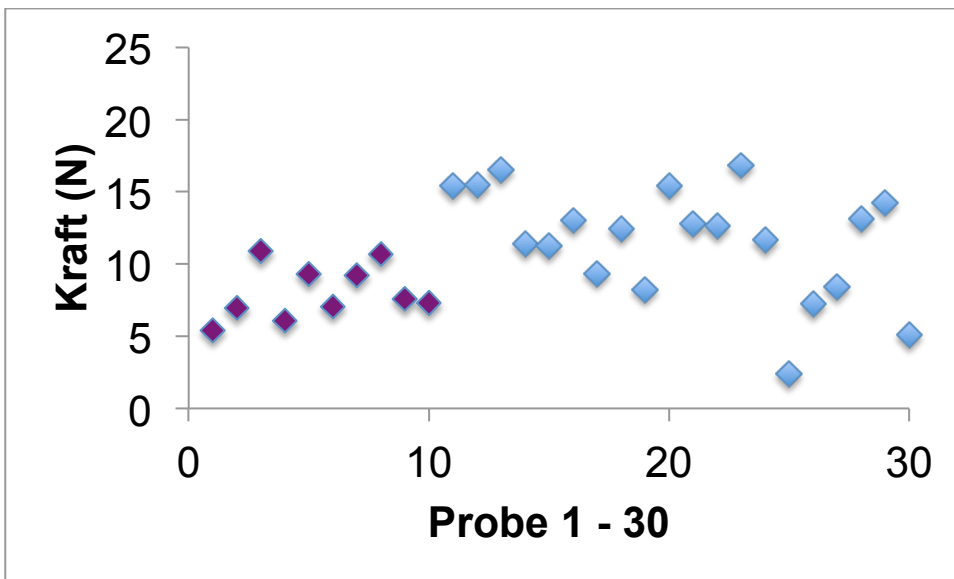


Abbildung 25: Kräfteinzelwerte Proband 3: lila n = 10 SB, blau n = 20 NS

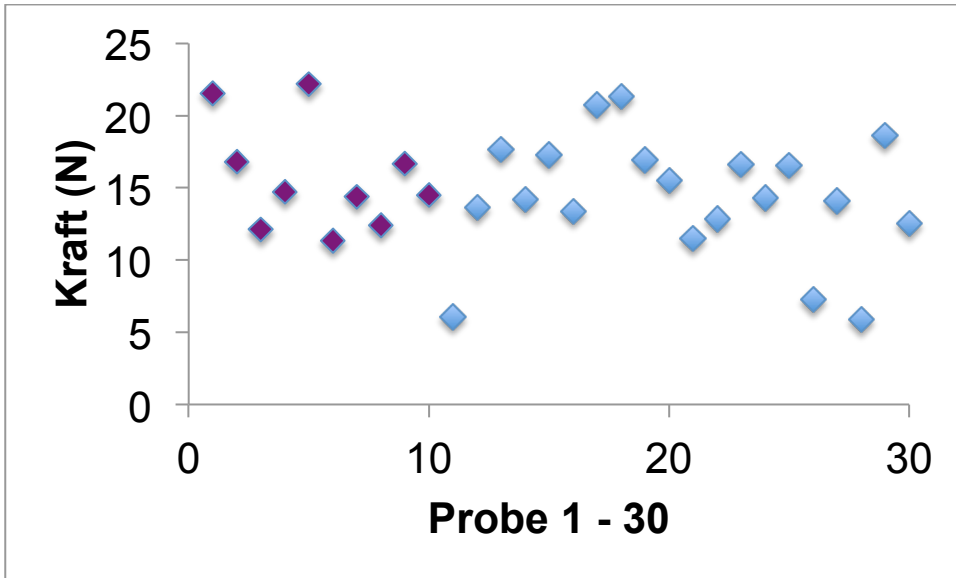


Abbildung 26: Kraft Einzelwerte Proband 4: lila n = 10 SB, blau n = 20 NS

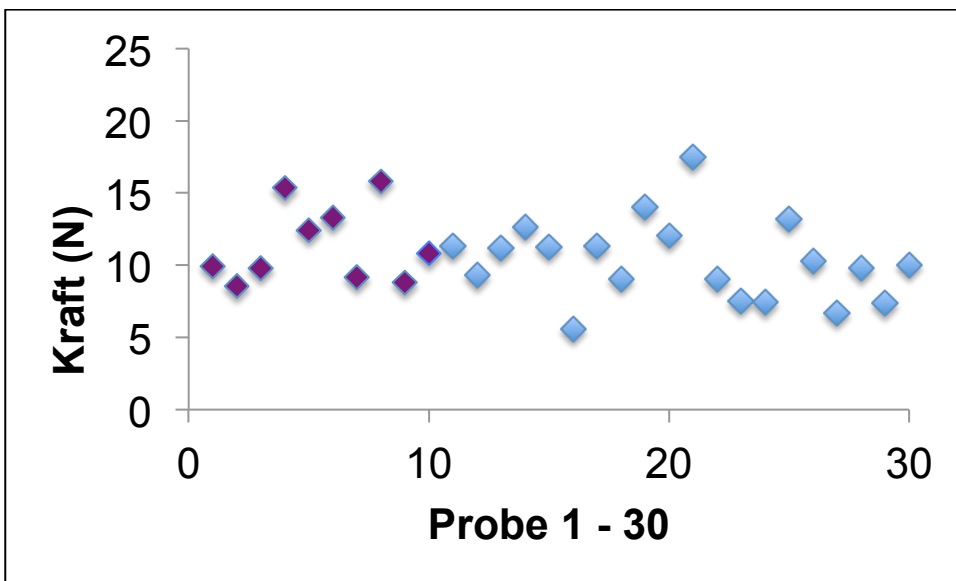


Abbildung 27: Kraft Einzelwerte Proband 5: lila n = 10 SB, blau n = 20 NS

### 3.3 Berechnung der Verbundfestigkeit nach ISO 9693

#### 3.3.1 Darstellung der Verbundfestigkeit für jeden Probanden

Die Abbildungen 28 - 32 zeigen die ermittelten Verbundfestigkeitswerte für die Probanden eins bis fünf. Dabei stehen die grauen Balken für die sandgestrahlten Proben ( $n = 1 - 10$ ), die blauen und violetten für die Nichtgestrahlten ( $n = 11 - 20$ ,  $n = 21 - 30$ ). Die grauen Balken der sandgestrahlten Proben sind in den Abbildungen 28, 29, 31 und 32 annähernd gleich groß wie die blauen und violetten der Nichtgestrahlten. Der graue Balken bei Proband 3 in Abbildung 30 weist einen deutlich geringeren Wert auf als die Balken blau und violett der nichtgestrahlten Proben.

Die horizontale blaue Linie markiert in den Abbildungen 28 bis 33 die von der ISO-Norm 9693 geforderten 25 MPa für den Haftverbund. In Abbildung 30 ist erkennbar, dass die Proben  $n = 1 - 10$  des Probanden 3 diesen Wert gerade erreichen. Die Proben  $n = 21 - 30$  des Probanden 5 in Abbildung 32 liegen auf der Linie und haben somit 25 MPa erreicht.

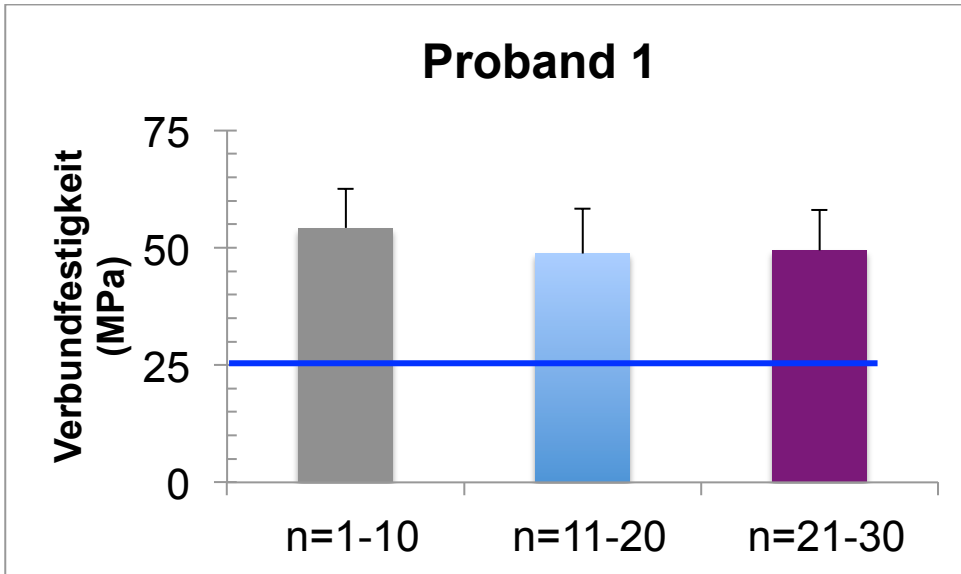


Abbildung 28: Ermittelte Verbundfestigkeit aller 30 Proben von Proband 1 in Abhängigkeit der Bearbeitung; n = 1 - 10 SB, n = 11 - 30 NS

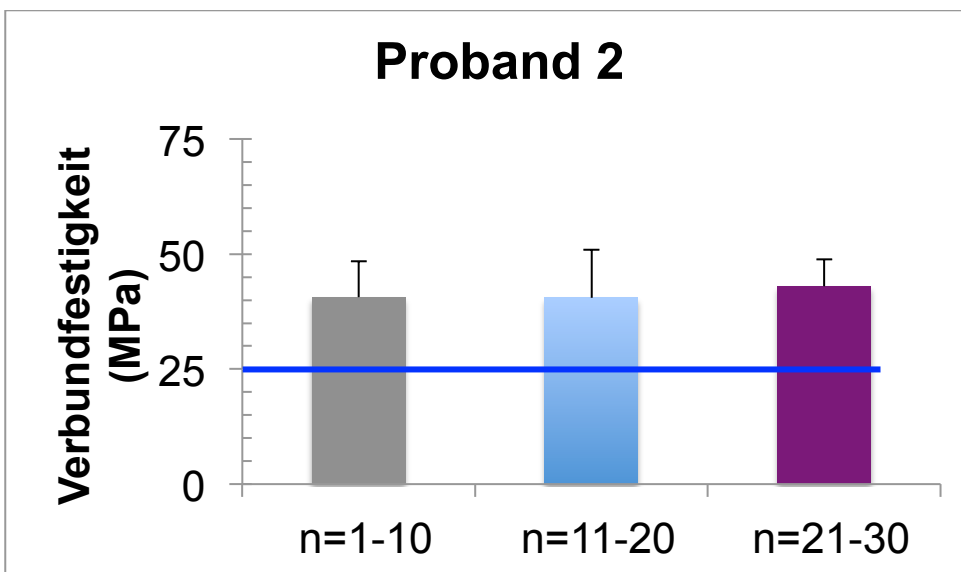


Abbildung 29: Ermittelte Verbundfestigkeit aller 30 Proben von Proband 2 in Abhängigkeit der Bearbeitung; n = 1 - 10 SB, n = 11 - 30 NS

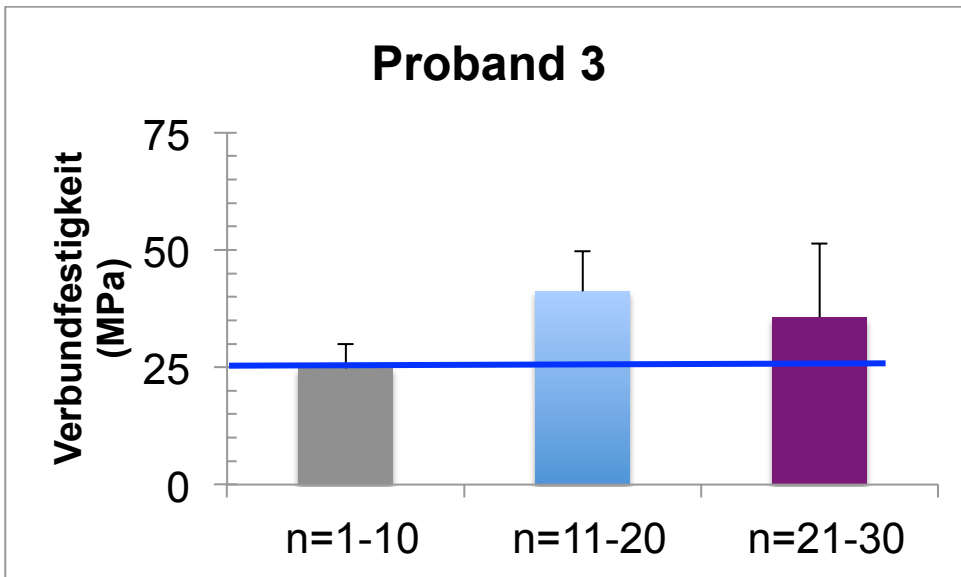


Abbildung 30: Ermittelte Verbundfestigkeit aller 30 Proben von Probant 3 in Abhängigkeit der Bearbeitung; n = 1 - 10 SB, n = 11 - 30 NS

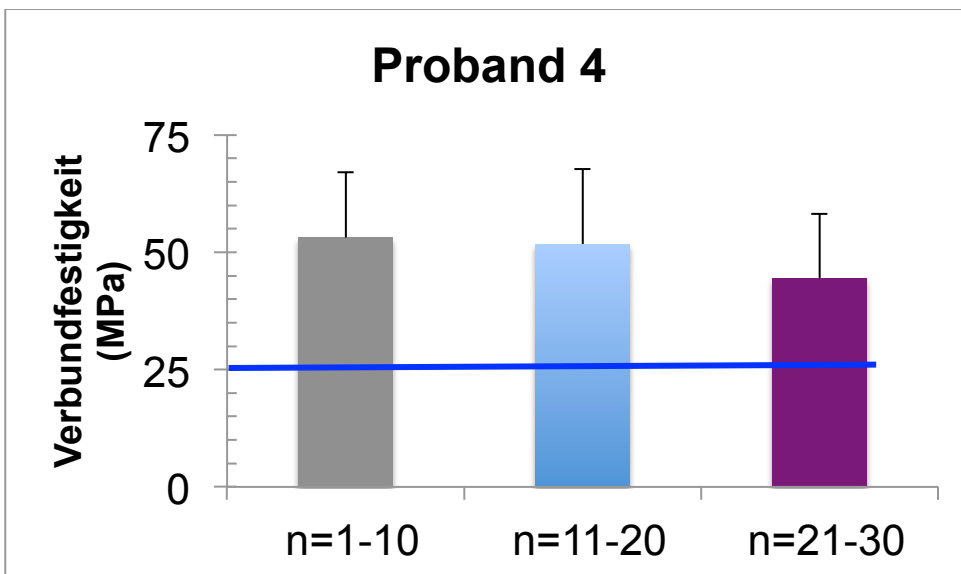


Abbildung 31: Ermittelte Verbundfestigkeit aller 30 Proben von Probant 4 in Abhängigkeit der Bearbeitung; n = 1 - 10 SB, n = 11 - 30 NS

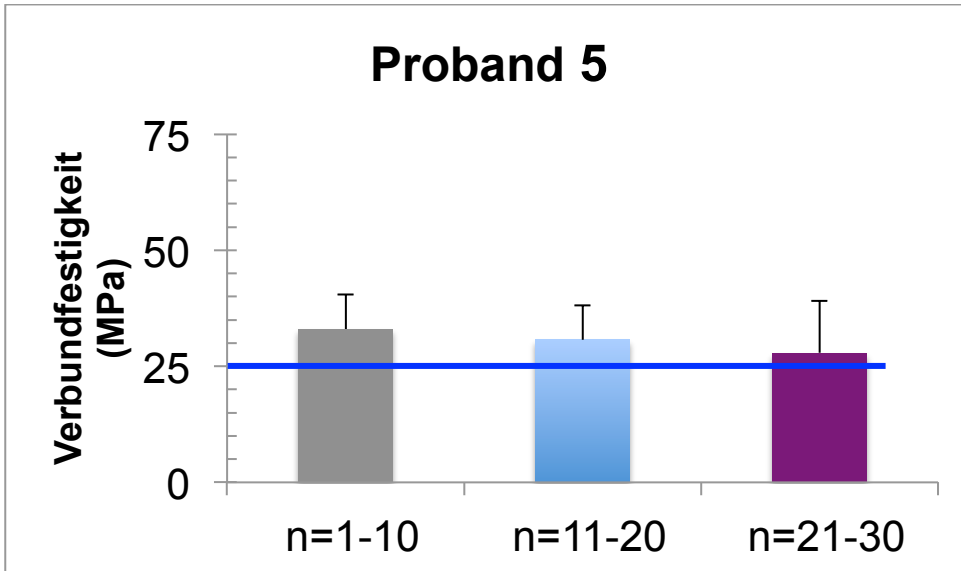


Abbildung 32: Ermittelte Verbundfestigkeit aller 30 Proben von Proband 5 in Abhängigkeit der Bearbeitung; n = 1 - 10 SB, n = 11 - 30 NS

Die Balkendiagramme in den Abbildungen 28 - 32 zeigen, dass die Verbundfestigkeit der Proben von Proband 1 in Abbildung 28 und von Proband 4 in Abbildung 31 am höchsten sind. Die Standardabweichung jedoch bei Proband 4 ist annähernd doppelt so groß als bei Proband 1. Bei letzterem verhält sie sich konstant. Bei Proband 2 in Abbildung 29 kann man niedrigere Werte ablesen, die jedoch weniger stark streuen als bei den Probanden 3 und 5 (Abbildung 30 und 32).

Jeder Proband hat immer 10 Proben auf einmal aufgebrannt. Eine Leistungskurve nach oben mit Berücksichtigung der Verblendreihenfolge (s. Kapitel 2, Material und Methoden) kann man lediglich bei Proband 3 in Abbildung 30 ablesen da die Verblendreihenfolge (s. ebd.) 1, 3, 2 war und die Proben n = 1 - 10 hier die geringsten Werte aufweisen, n = 21 - 30 höhere und n = 11 - 20 die höchsten Verbundfestigkeitswerte.

### 3.3.2 Darstellung der Verbundfestigkeit aller Probanden

In Abbildung 33 sind die Mittelwerte mit Standardabweichungen der Probanden eins bis fünf für die sandgestrahlten und die nicht gestrahlten Verblendsubstrate zusammengefasst. Alle Haftverbundwerte liegen über der horizontalen blauen Linie, welche die von der ISO-Norm geforderten 25 MPa markiert. Nur die Werte der sandgestrahlten Verblendproben des Probanden 3 befinden sich geringfügig darunter.

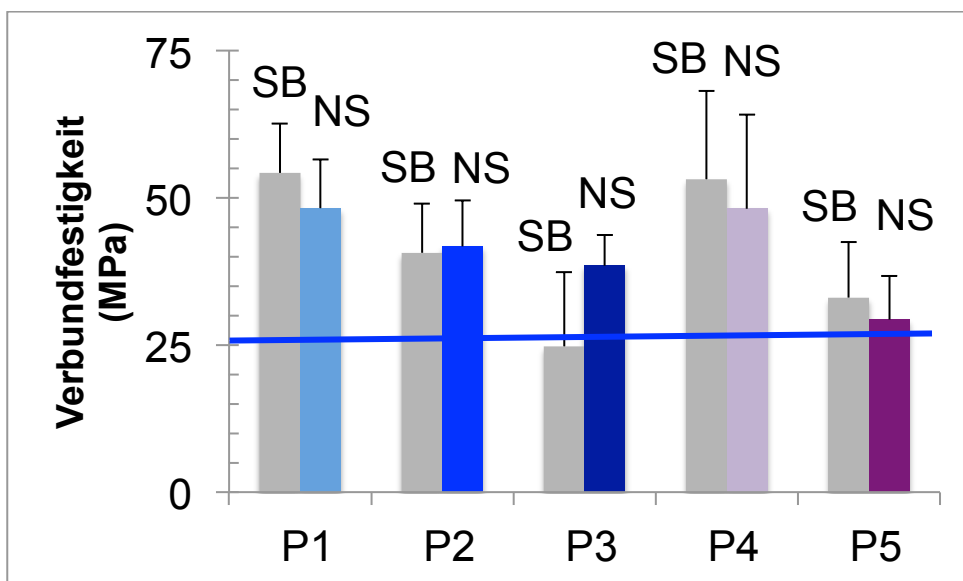


Abbildung 33: Berechnete Verbundfestigkeiten für jeden Probanden P 1 - 5: SB = sandgestrahlt (n = 10), NS = nicht gestrahlt (n = 20)

Die Probanden 4 und 3 in Abbildung 33 weisen die größte Standardabweichung auf, in absteigender Reihenfolge Proband 5, 2, 1.

Auch in dieser Abbildung zeigt sich das Ranking der Festigkeitswerte  $P1 > P4 > P2 > P3 > P5$ .

Da die sandgestrahlten Proben im Vergleich zu den Nichtgestrahlten eher keine großen Unterschiede zeigen (s. o.), wurden für die mikroskopische Auswertung die Proben n = 11 - 30 verwendet.

### 3.4 Optische und mikroskopische Bewertung der Verblendung und des Rissverlaufs

#### 3.4.1 Optische Bewertung der Verblendung

Diese Einteilung nach Kapitel 2.5.2 wie in Material und Methoden beschrieben, ergab für jeden Probanden folgende Bewertung:

**Tabelle 4: Zusammenfassung der Verblendgüte nach optischer Auswertung**

	P11 - 20	P11 - 20	P21 - 30	P21 - 30
	gut	schlecht	gut	schlecht
Proband 1	6 von 10	0 von 10	4 von 10	0 von 10
Proband 2	3 von 10	1 von 10	5 von 10	0 von 10
Proband 3	1 von 10	4 von 10	4 von 10	1 von 10
Proband 4	3 von 10	1 von 10	3 von 10	2 von 10
Proband 5	5 von 10	0 von 10	3 von 10	1 von 10

Wie aus der obigen Tabelle ersichtlich, sind an den Proben die im Folgenden beschriebenen Merkmale optisch zu erkennen:

Proband 1: P12: Abplatzung an der rechten Kante, beginnende Ablösung von der Zirkonbasis erkennbar, mittlere Kuhlenbildung durch stärkere Schrumpfung, P16: Abplatzung der rechten Kante, beginnende Ablösung der Verblendung von der Basis, P17: leichte Kuhlenbildung mittig, P20: Abplatzungen an beiden Kanten, Kuhlenbildung zur Mitte, P22, 27, 28, 30: Kuhlenbildung mittig

Proband 2: P12: Luftblaseneinschlüsse an der Basis rechts sowie Abplatzungen an beiden Kanten, P13: leichte Kuhlenbildung, P27: Abplatzungen an der rechten Kante

Proband 3: P14: Abplatzung zur Mitte der Probe, zwischen zwei Schichten Ablösung zur Basis, P15: Rissbildung und Abplatzung ausgehend von der rechten Kante zur Mitte, Kuhlenbildung mittig, P16: sehr flache Verblendung mit

Kuhlenbildung, P18, 19: Rissbildung in der Mitte durch die gesamte Fläche, Abplatzungen an beiden Kanten, Blasenbildung, P25: Verblendung steht von rechts beginnend von der Basis ab

Proband 4: P11: Ablösung von rechts beginnend, P14: Abplatzungen an beiden Kanten, P16: Abplatzen mittig, P22, 26: Blasenbildung zur Basis, P30: Abplatzung mittig

Proband 5: P12, 23, 25: erkennbar ist eine schräge Verblendfläche durch Schrumpfung nach rechts, P13: Kuhlenbildung mittig, P17: Ablösung der Verblendung beginnend von der Basis, P28: Blasenbildung in der Mitte der Verblendprobe (s. Bilder in Kapitel 3.7).

### 3.4.2 Mikroskopische Auswertung der Verblendgüte

Für jeden Probanden wurden für die Qualitätsprüfung wie in Kapitel 2.5.1 beschrieben, die folgenden Proben ausgewählt:

**Tabelle 5: Übersicht zur Qualität der ausgewählten Proben für jeden Probanden mikroskopisch betrachtet**

	Verblendreihe	ausgewählte Proben	Bewertung gut	Bewertung schlecht
Proband 1	aus P11 - 20	P12, 13, 15, 16, 17, 20	6 von 10	0 von 20
	aus P21 - 30	P22, 27, 28, 30	4 von 10	0 von 10
Proband 2	aus P11 - 20	P13, 16, 17	3 von 10	1 von 10
	aus P21 - 30	P22, 25, 27, 28, 30	5 von 10	0 von 10
Proband 3	aus P11 - 20	P16	1 von 10	4 von 10
	aus P21 - 30	P21, 22, 26, 27	4 von 10	1 von 10
Proband 4	aus P11 - 20	P12, 14, 16	3 von 10	1 von 10
	aus P21 - 30	P22, 27, 30	3 von 10	2 von 10

Proband 5	aus P11 - 20	P11, 12, 13, 14, 17	5 von 10	0 von 10
	aus P21 - 30	P23, 25, 30	3 von 10	1 von 10

Da sich eine schlechte Qualität auf die Verbundfestigkeit auswirkt, erfolgte die mikroskopische Untersuchung der Verblendfläche.

### 3.4.3 Mikroskopische Auswertung der Verblendfläche

Bevor die Auswertung dargestellt wird, wird zunächst die schematische Zeichnung einer Verblendprobe mit den Maßen nach ISO 9693 gezeigt:

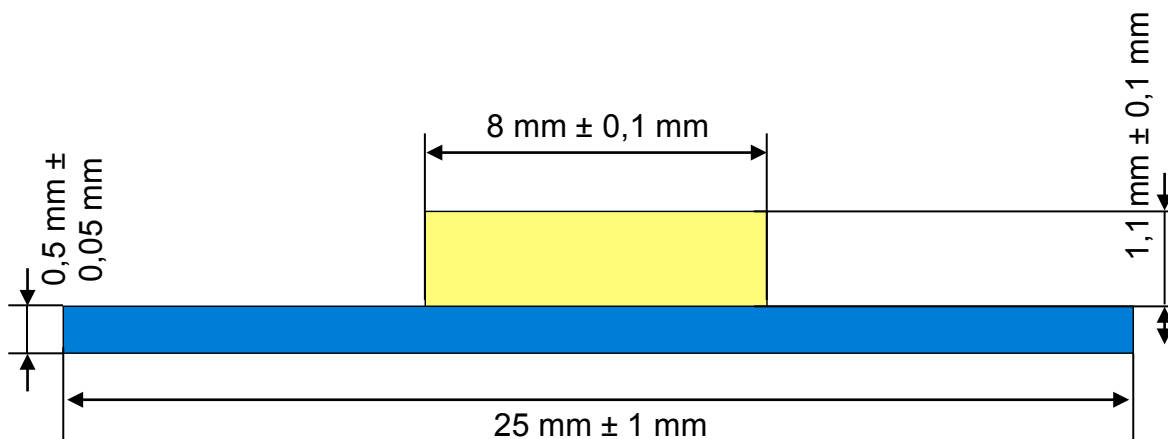


Abbildung 34: Geometrie eines Probekörpers nach ISO 9693: Blaue Fläche ist das Zirkoniumdioxidsubstrat, gelb die Verblendkeramik

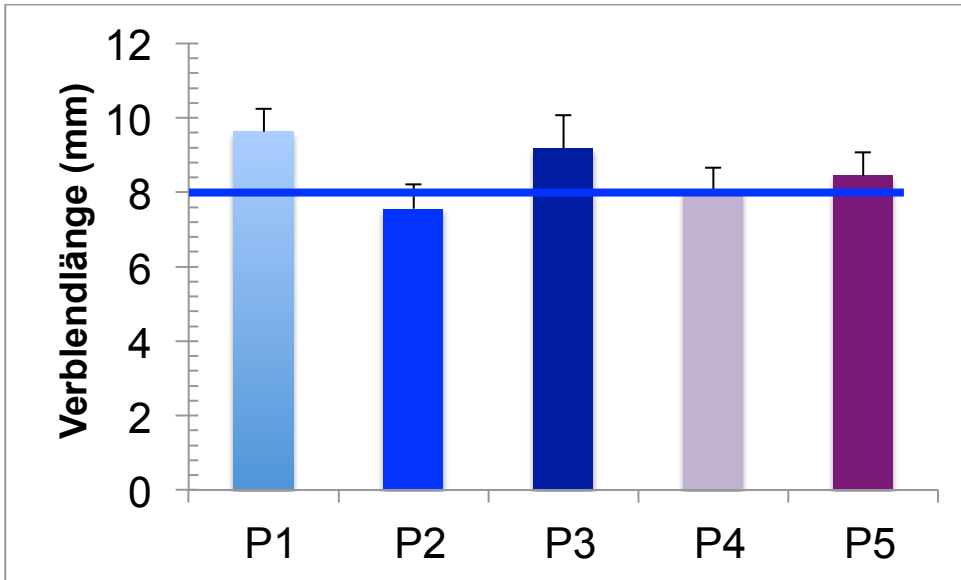


Abbildung 35: Mittelwerte und Standardabweichung der mikroskopisch vermessenen Verblendlängen der Probanden 1 - 5

Die blaue Linie in Abbildung 35 markiert den von der ISO-Norm geforderten Wert einer Verblendlänge von  $8 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$ . Die Mittelwerte der Probanden 1, 3 und 5 liegen über diesem Wert, die Proben des Probanden 2 liegen unter der Linie, die Werte von Proband 4 erreichen die 8 mm-Linie.

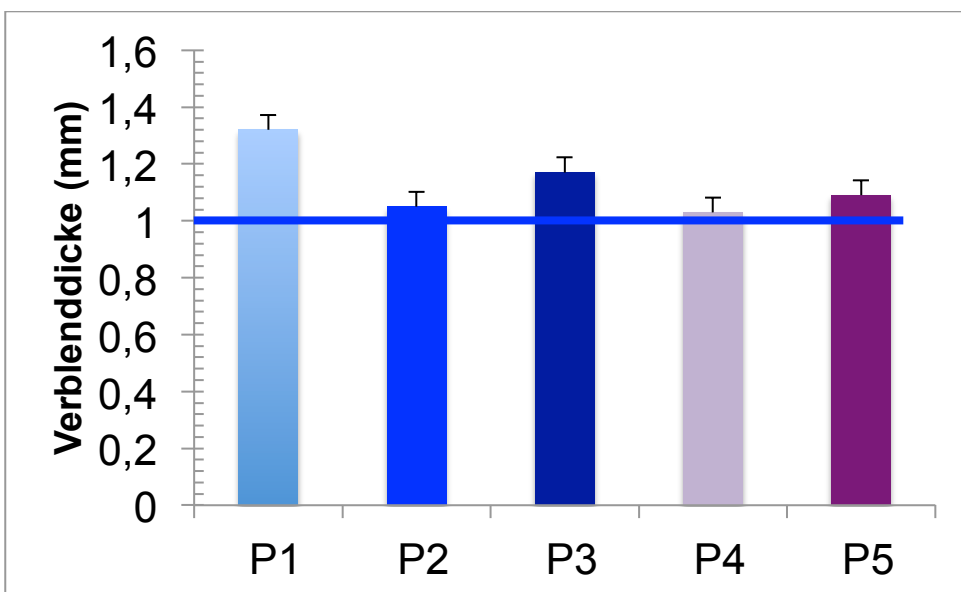


Abbildung 36: Mittelwert und Standardabweichung der mikroskopisch gemessenen Verblenddicken der Probanden 1 - 5

Gemäß der ISO-Norm 9693 müssen die Probekörper  $8 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$  Länge,  $3 \text{ mm}$  Verblendbreite und  $1,1 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$  Verblenddicke aufweisen. Die geforderte Verblenddicke der ISO-Norm wird in Abbildung 36 mit der blauen Linie markiert. Die Werte des Probanden 2 liegen nur geringfügig über der Markierungslinie. Proband 5 erreicht die Norm-Linie, wie in Tabelle 6 ersichtlich.

**Tabelle 6: MW Verblendlänge und -dicke (mikroskopisch gemessen) aller Proben (n = 1 - 30) und ISO-Norm**

	Mittelwert Verblendlänge	Mittelwert Verblenddicke
Proband 1	9,63 mm	1,32 mm
Proband 2	7,55 mm	1,05 mm
Proband 3	9,18 mm	1,17 mm
Proband 4	8,02 mm	1,03 mm
Proband 5	8,44 mm	1,09 mm
ISO	$8,0 \pm 0,1 \text{ mm}$	$1,1 \pm 0,1 \text{ mm}$

Die Berechnung des prozentualen Unterschieds (s. Anhang) ergab die in Tabelle 7 aufgelisteten Abweichungen.

Bis auf minimale Unterschiede der Verblenddicke-Werte der Probanden 2, 4 und 5 (welche sich jedoch noch im Toleranz-Bereich befinden) liegen sämtliche Werte prozentual über den von ISO verlangten Normmaßen.

**Tabelle 7: Abweichungen der mikroskopisch gemessenen Probenfläche und -dicke in % aller Proben**

	% Abweichung Fläche	% Abweichung Dicke
Proband 1	> 20 %	> 19 %
Proband 2	> 6 %	< 5 %
Proband 3	> 14 %	> 6 %
Proband 4	0 %	< 6 %
Proband 5	> 5 %	< 1 %

### 3.4.4 Auswertung der Probenvermessung mittels digitaler Schieblehre

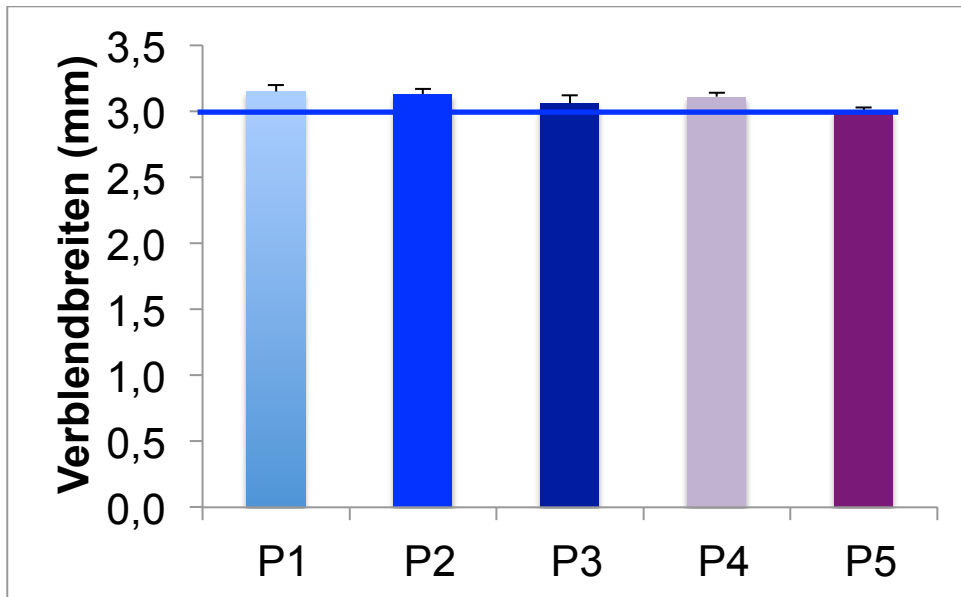


Abbildung 37: Mittelwert + Standardabweichung der gemessenen Verblendbreiten von P 1 - 5

Die Messung mittels Schieblehre zeigt in Abbildung 37, dass die Verblendbreiten der Probanden 1 - 5 alle den von ISO geforderten Wert von 3 mm erreicht haben, welcher mit der blauen Linie gekennzeichnet ist. Die Werte des Probanden 5 liegen genau auf der Norm-Linie.

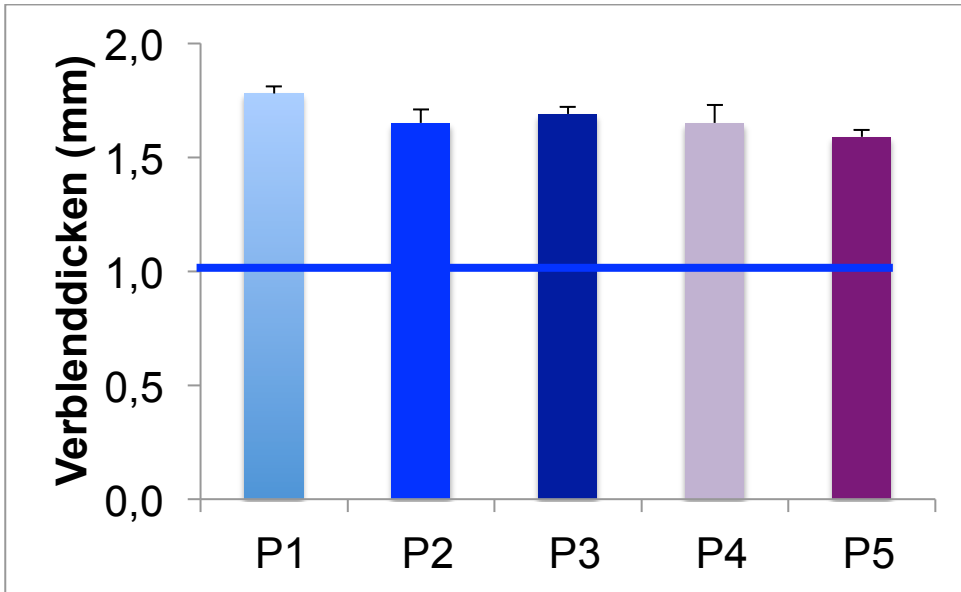


Abbildung 38: Mittelwert + Standardabweichung der gemessenen Verblendicken von P 1 - 5

In Abbildung 38 ist abzulesen, dass die Verblendicken aller Probanden um ca. einen halben mm über der blauen Markierung liegen. Diese steht für den ISO-Norm Wert von  $1,1 \pm 0,1$  mm.

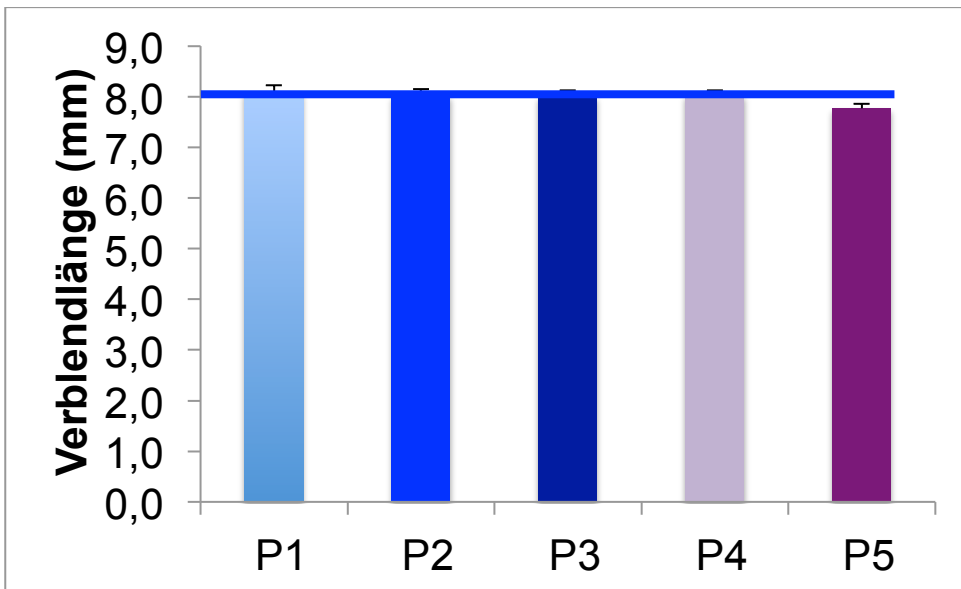


Abbildung 39: Mittelwert + Standardabweichung der gemessenen Verblendlängen P 1 - 5

Die gemessenen Verblendlängen von Proband 5 in Abbildung 39 liegen minimal unter der blauen Linie und erreichen somit nicht die von ISO geforderte Länge von  $8 \pm 0,1$  mm. Die Werte der Probanden 1 - 4 liegen auf der blauen Markierungslinie für den dem Norm-Wert. Alle taktilen Messwerte werden in Tabelle 8 zusammengefasst:

**Tabelle 8: Mittelwerte MW nach Messung der Verblendbreiten (b), -dicken (d) und -längen (l) der Probanden P1 - 5 und ISO-Norm**

	MW b	MW d	MW l
Proband 1	3,15 mm	1,78 mm	8,10 mm
Proband 2	3,13 mm	1,65 mm	8,03 mm
Proband 3	3,06 mm	1,69 mm	8,02 mm
Proband 4	3,11 mm	1,65 mm	8,05 mm
Proband 5	3,00 mm	1,59 mm	7,77 mm
ISO	3,00 mm	1,10 mm	8,00 mm

**Tabelle 9: Darstellung der prozentualen Abweichungen der taktilen Messwerte von der ISO-Norm**

	% Abweichung b	% Abweichung d	% Abweichung l
Proband 1	> 3 %	> 61 %	> 1 %
Proband 2	> 3 %	> 50 %	0 %
Proband 3	0 %	> 53 %	0 %
Proband 4	> 2 %	> 50 %	0 %
Proband 5	0 %	> 44 %	< 3 %

Tabelle 9 verdeutlicht, dass bis auf minimal geringere %-Werte der Probenlängen bei Proband 5 die Proben 1 - 30 aller Probanden prozentual über den geforderten ISO-Norm Werten liegen oder diesen genau entsprechen. (Berechnung s. Anhang)  
(ISO-Norm 9693: Probenbreite 3 mm, -dicke  $1,1 \pm 0,1$  mm, -länge  $8 \pm 0,1$  mm).

### 3.5 Zusammenfassung aller geometrischer Probendaten

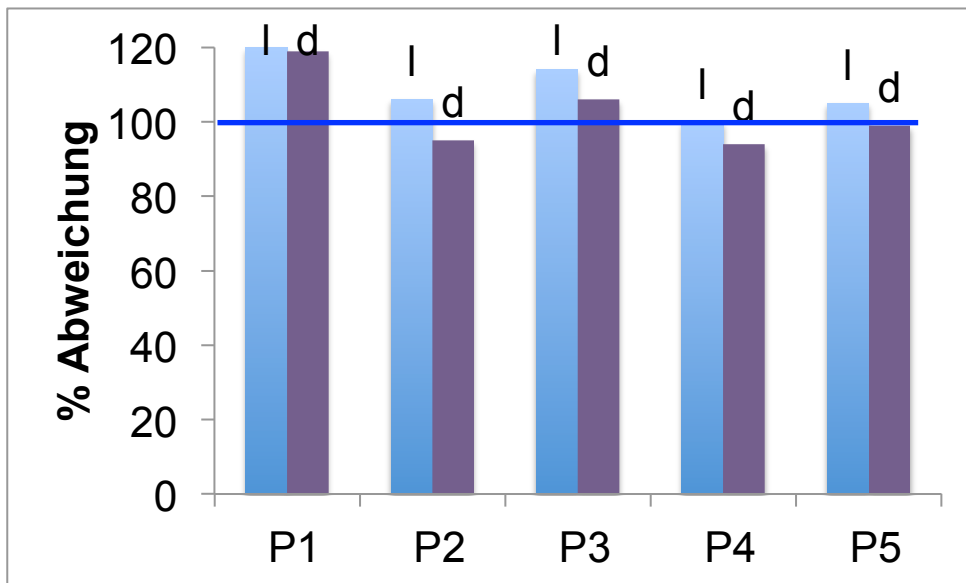


Abbildung 40: Abweichung der mikroskopischen Messdaten (l = Probenlänge, d = Probendicke) von der ISO-Norm (blaue Linie)

Die Verblenddicke-Werte der Probanden 2, 4 und 5 befinden sich in Abbildung 40 prozentual geringfügig unter den 100% der ISO-Norm (blaue Linie). Die übrigen Verblenddicke- und Verblendlängen-Werte aller Probanden entsprechen der 100%-Markierung oder liegen höher.

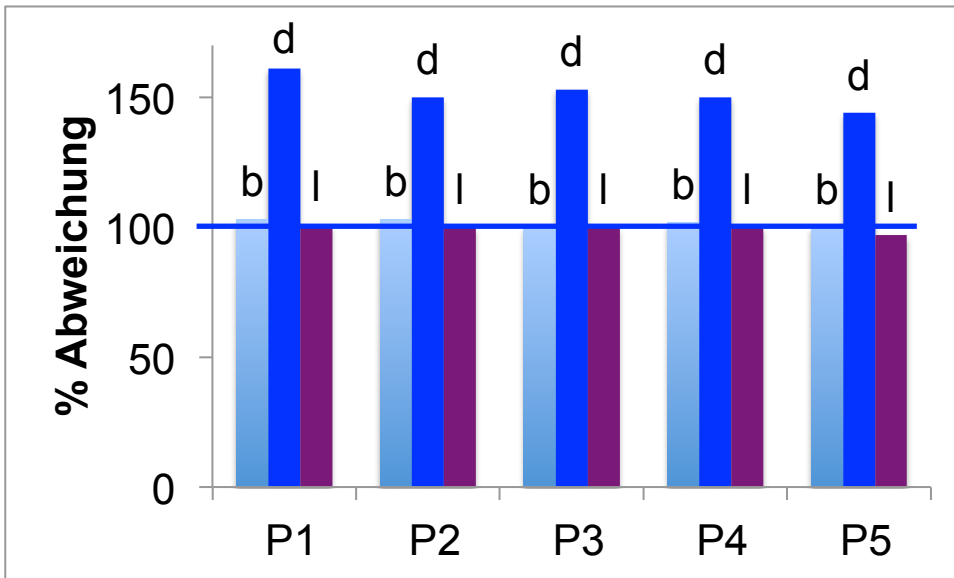


Abbildung 41: Abweichung der Messdaten mit Schieblehre (b = Probenbreite, d = Probendicke, l = Probenlänge) von der ISO-Norm (blaue Linie)

In Abbildung 41 geht aus den zusammengefassten Probenmessdaten mittels Schieblehre hervor, dass alle Werte die 100%-Markierung, welche für die ISO-Normwerte steht, erreichen und größer sind (d-Werte). Die Längenmessungen von Proband 5 liegen minimal darunter (s. auch Tabelle 8).

### 3.6 Auswertung des akustischen Signals

Die Abbildungen 42 - 46 zeigen die Haftverbundwerte beim ersten akustischen Signal jedes Probanden. Die Werte der Probanden 1 und 4 sind hier am höchsten. Am geringsten die der Probanden 2, 3 und 5. In Abbildung 43 sind die Standardabweichungen niedriger als bei Proband 1, 4 und 5. In Abbildung 45 sind die höchsten Werte der Standardabweichung zu finden. Die von ISO festgelegten 25 MPa (blaue Linie) erreichen alle Proben der Probanden 1 - 4, bei Proband 5 liegen die Proben  $n = 1 - 10$  und  $n = 21 - 30$  darunter.

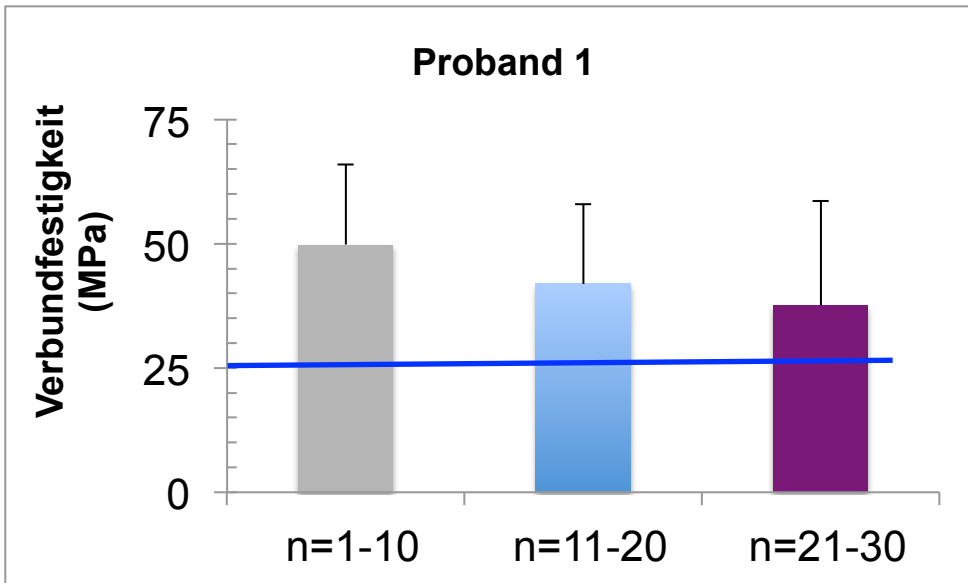


Abbildung 42: Verbundfestigkeit beim 1. akustischen Signal Proband 1, Proben n = 1 - 30

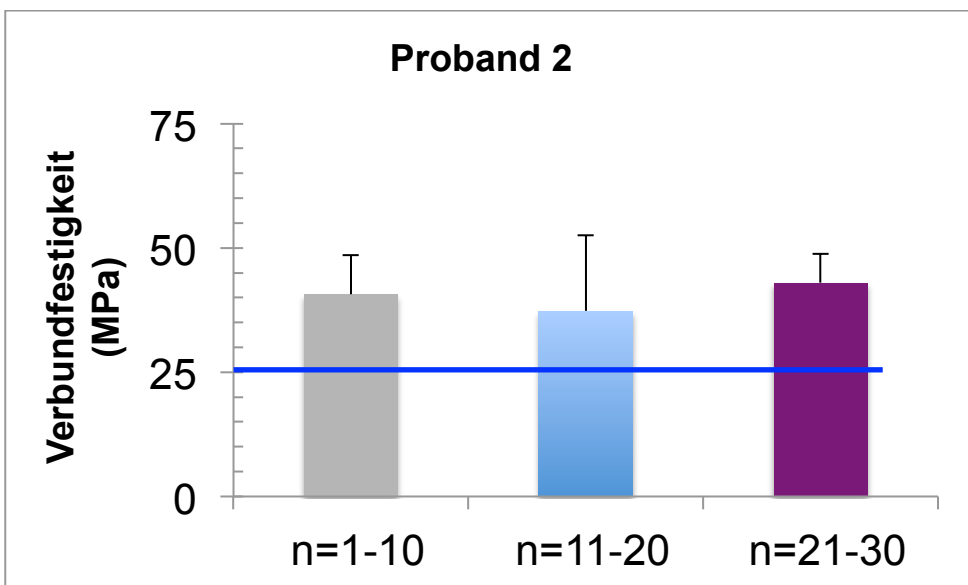


Abbildung 43: Verbundfestigkeit beim 1. akustischen Signal Proband 2, Proben n = 1 - 30

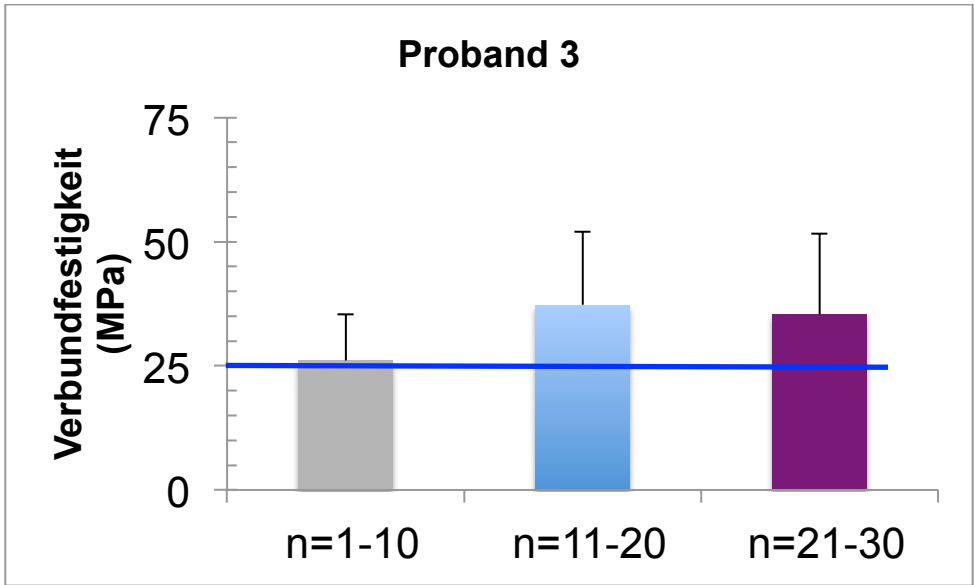


Abbildung 44: Verbundfestigkeit beim 1. akustischen Signal Proband 3, Proben n = 1 - 30

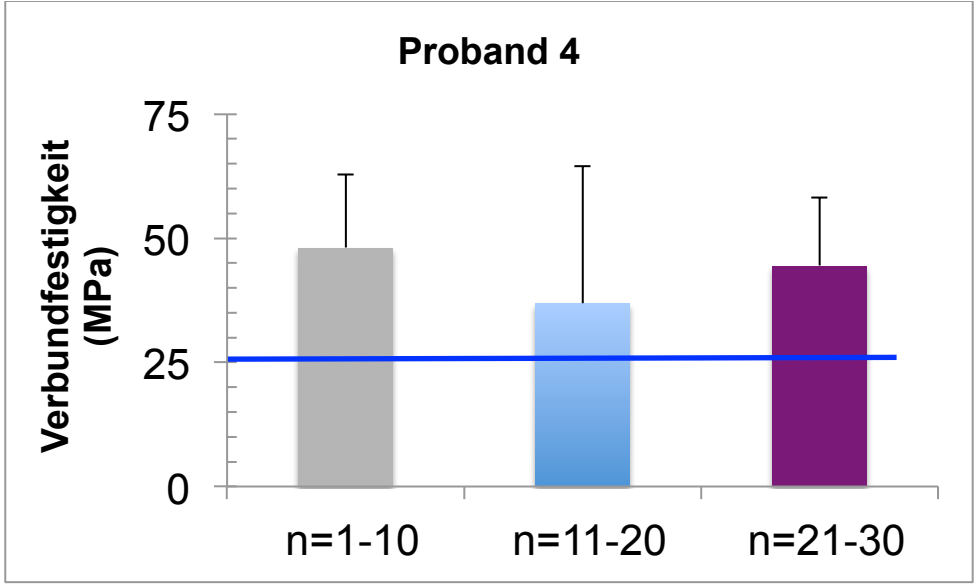


Abbildung 45: Verbundfestigkeit beim 1. akustischen Signal Proband 4 Proben n = 1 - 30

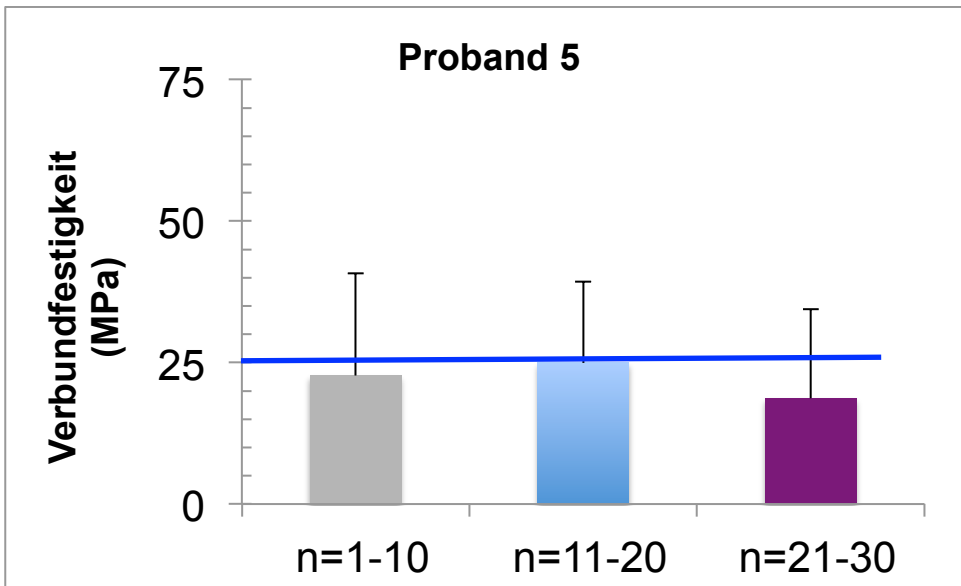


Abbildung 46: Verbundfestigkeit beim 1. akustischen Signal Proband 5, Proben n = 1 - 30

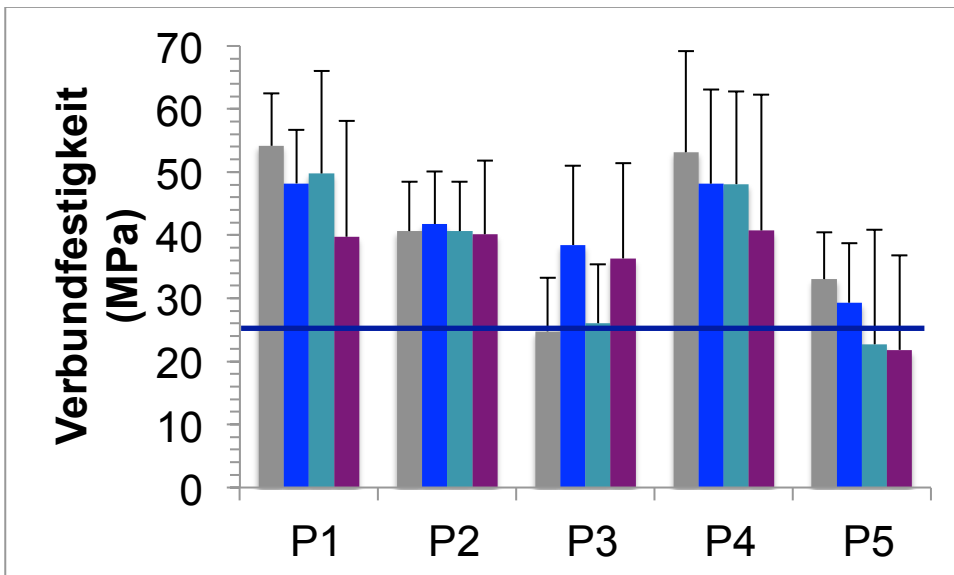


Abbildung 47: VERBUNDFESTIGKEIT Probanden 1 - 5: graue Datenreihe: nach ISO sandgestrahlt (SB), blaue Datenreihe: nach ISO nicht gestrahlt (o. SB), türkisfarbene Datenreihe: beim 1. akustischen Signal sandgestrahlt (SB), lilafarbene Datenreihe: beim 1. akustischen Signal nicht gestrahlt (o. SB)

Die Verbundfestigkeitswerte beim ersten akustischen Signal (SB u. o. SB) in Abbildung 47 nehmen bei allen Probanden im Vergleich zu den ISO-Werten (SB + o. SB) ab. Bei Proband 1, 4 und 5 ist dies stärker der Fall als bei 2 und 3. Die Standardabweichungen der Probanden beim ersten akustischen Signal (SB u. o. SB) vergrößern sich bei Proband 1, 4 und 5 im Vergleich zur ISO-Verbundberechnung (SB + o. SB). Bei den Probanden 2 und 3 bleiben die ermittelten Werte der türkisarbenen und lilafarbenen Datenreihen annähernd gleich groß wie in der grauen und blauen Datenreihe.

Die Datenreihen grau nach ISO SB und türkis beim 1. akustischen Signal SB von Proband 3 liegen auf der blauen horizontalen Linie. Diese markiert die von der ISO-Norm geforderten 25 MPa. Ebenso erreichen die Datenreihen türkis beim 1. akustischen Signal SB und lila beim 1. akustischen Signal o. SB von Proband 5 diese Markierung nicht. Alle Datenreihen der Probanden 1, 2 und 4 liegen über dem Sollwert der ISO-Norm.

In Abbildung 48 wird das erste akustische Signal bei erreichter Maximalkraft  $F_{\max}$  (oberes Diagramm) für die Probe 1 des Probanden 1 exemplarisch dargestellt.

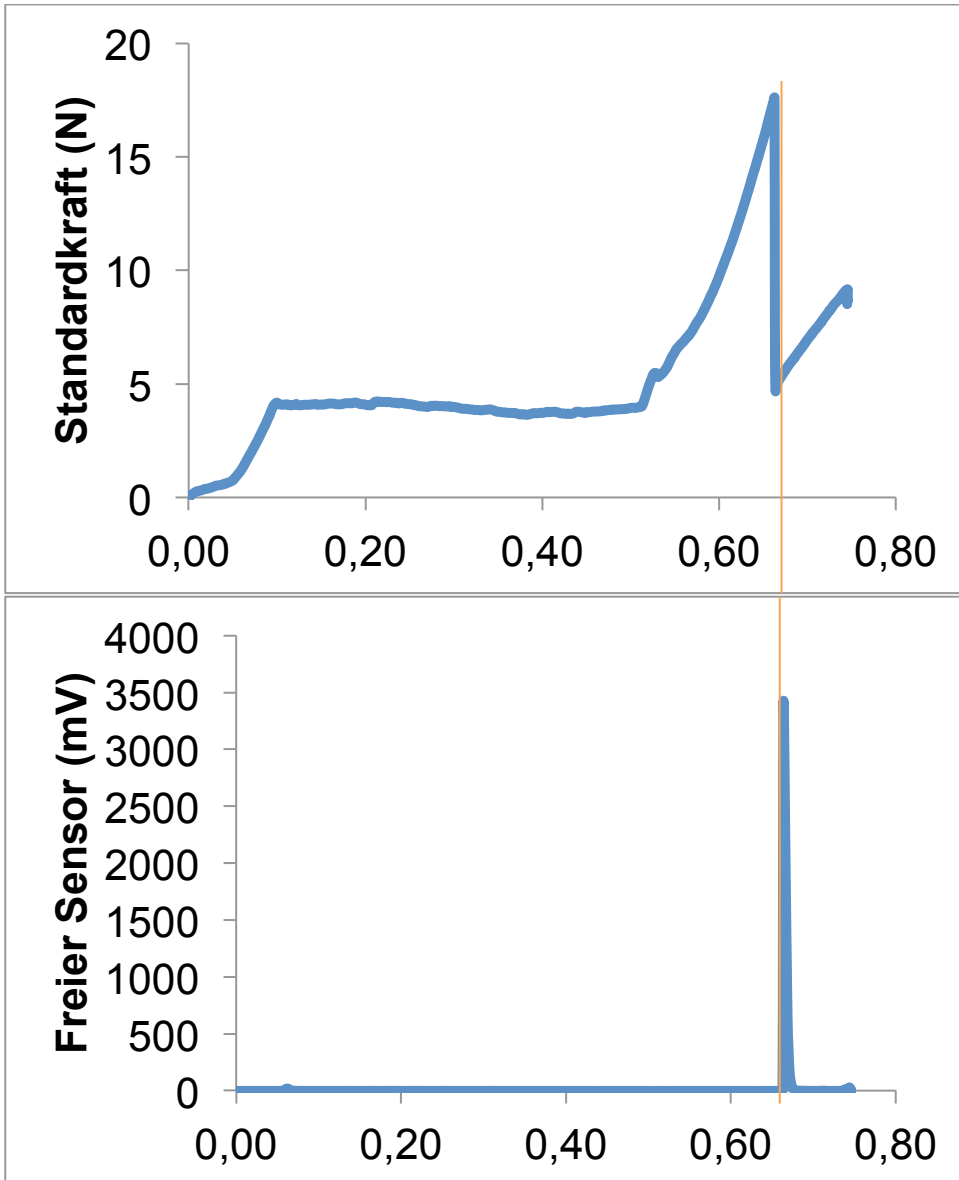


Abbildung 48: oberes Diagramm Kraft-Weg-Diagramm Probe 1 Proband 1 und im unteren Diagramm das dazugehörige akustische Signal der Probe 1 mit Rissbeginn bei  $F_{max}$

Das akustische Signal im unteren Diagramm der Abbildung 48 tritt bei ca. 0,70 mm analog dem Standardweg im oberen Kraft-Weg-Diagramm der Abbildung 48 auf.

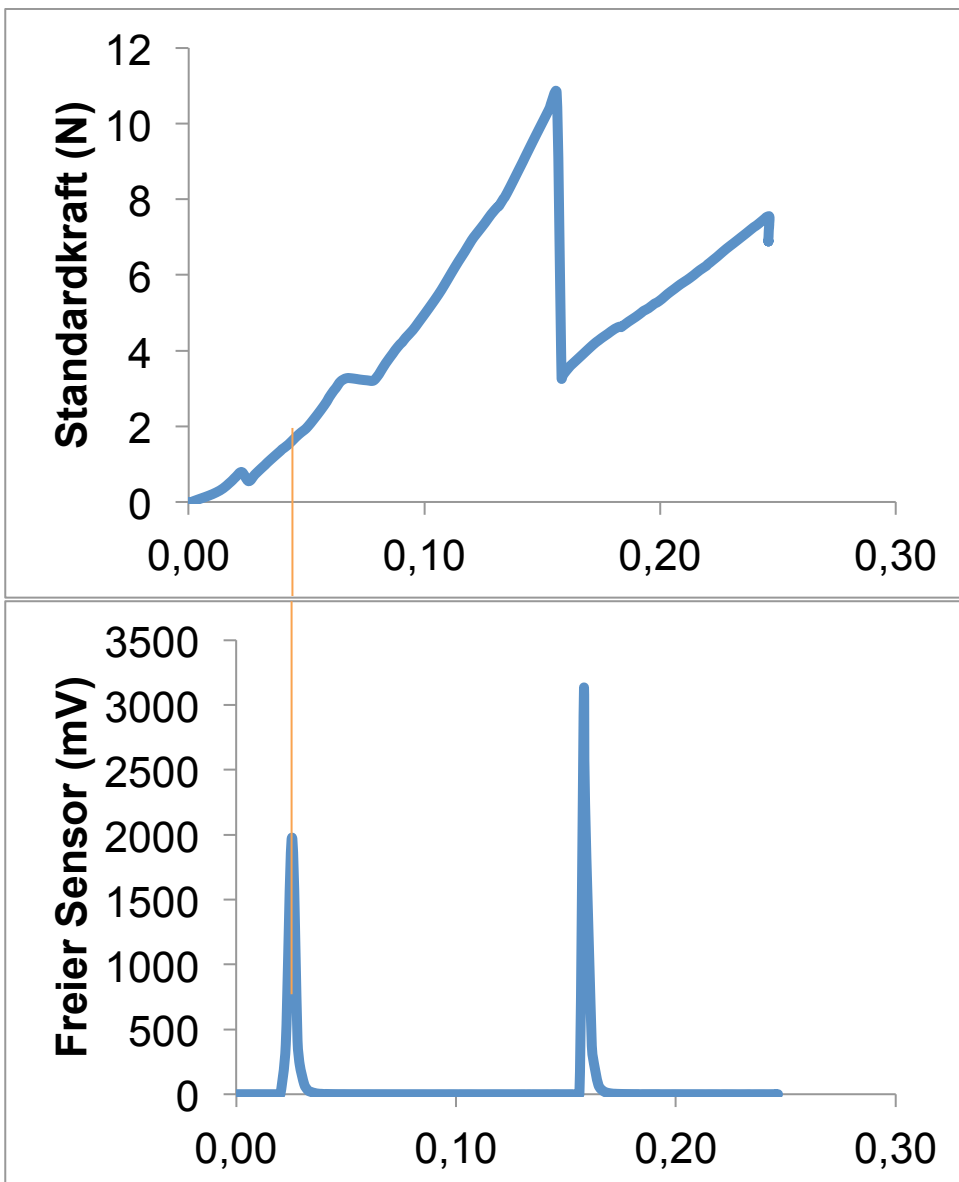


Abbildung 49: oberes Diagramm Kraft-Weg-Diagramm Probe 10 Proband 5 und im unteren Diagramm das dazugehörige akustische Signal der Probe 10 mit Rissbeginn vor  $F_{\max}$

In Abbildung 49 kommt im unteren Diagramm das akustische Signal bei etwa 0,04 mm vor  $F_{\max}$ . Diese ist im oberen Diagramm nach 0,16 mm erreicht, nach 0,04 mm steigt die Kurve hier zu einem kleineren Peak an, der sich nach weiteren ca. 0,02 mm noch stärker ausprägt.

Somit ist Abbildung 49 (der Probe 10 des Probanden 5) die exemplarische Darstellung für das Auftreten eines akustischen Signals vor  $F_{\max}$ .

Um Auffälligkeiten der Proben aus Tabelle 5 festzustellen, wurden alle Proben jedes Probanden mikroskopisch untersucht.

### **3.7 Mikroskopische Auswertung der Proben mit akustischem Signal vor $F_{\max}$**

Auflistung der Proben (aus Kapitel 3.4.2) mit Bildern (zwei von jedem Probanden): Die Abbildungen 50 – 59 zeigen die mikroskopischen Aufnahmen der Verblendungen bei 10facher Vergrößerung mit den in Kapitel 3.4.2 beschriebenen Auswertungen.

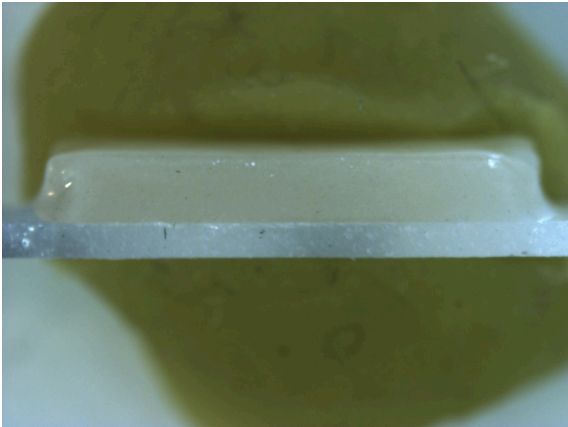


Abbildung 50: Proband 1 Probe 15: gerade Oberfläche mit symmetrischer Verblendform

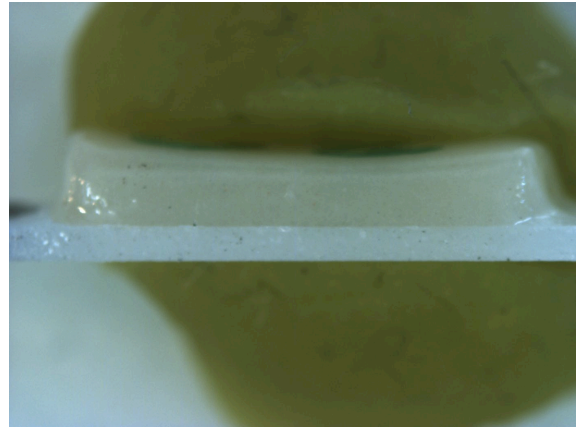


Abbildung 51: Proband 1 Probe 30: mittige Kuhlenbildung

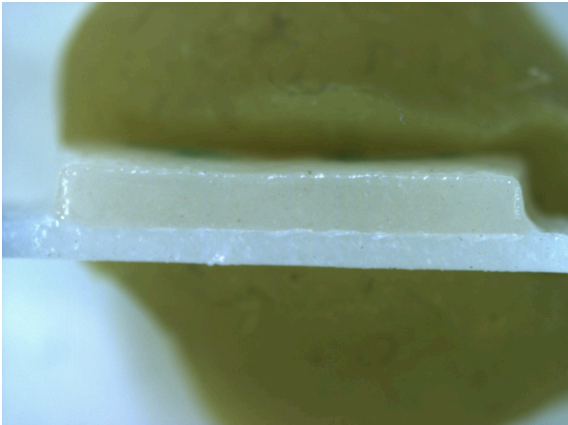


Abbildung 52: Proband 2 Probe 13: leichte mittige Kuhlenbildung

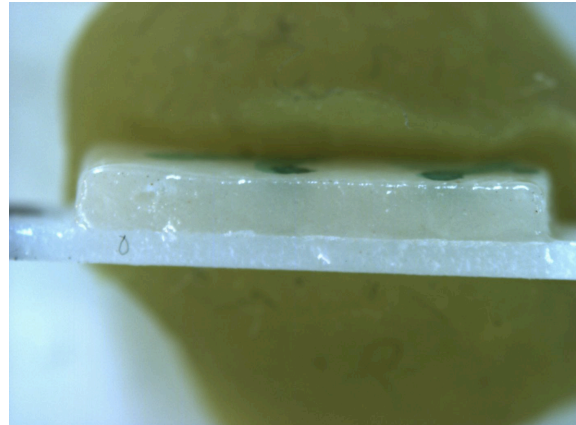
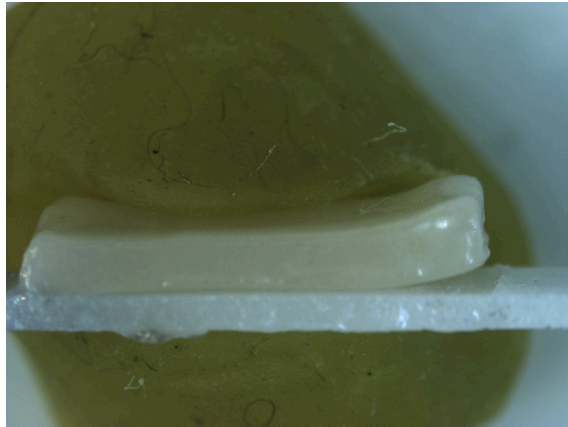
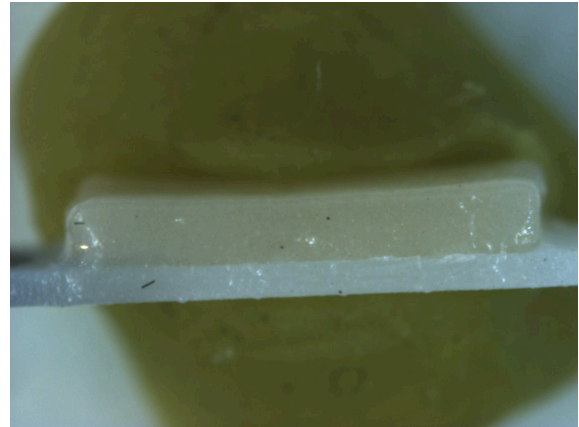


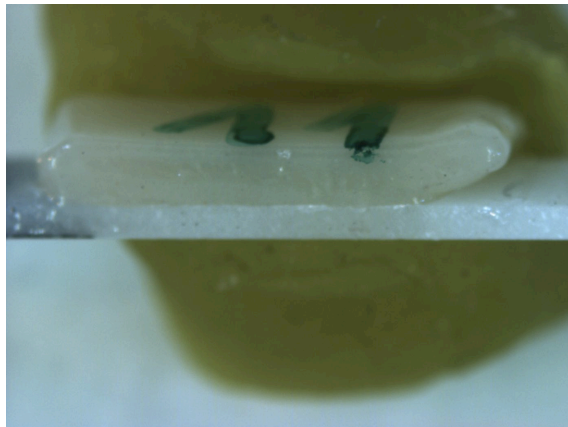
Abbildung 53: Proband 2 Probe 17: gleichmäßige Verblendform



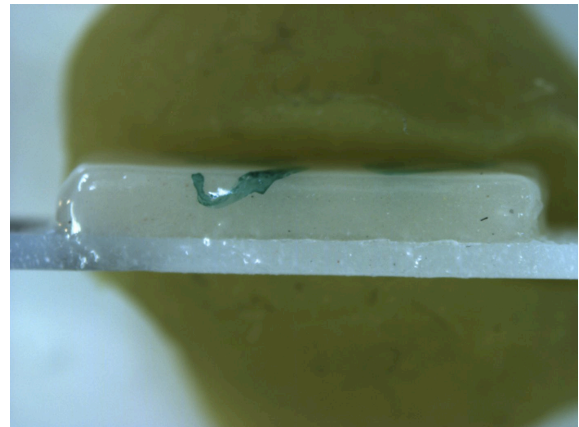
**Abbildung 54: Proband 3 Probe 25: auf der rechten Seite beginnende Ablösung von der Substratbasis**



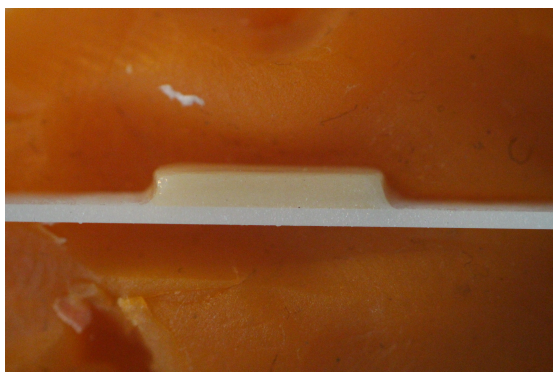
**Abbildung 55: Proband 3 Probe 26: annähernd gleichmäßige Verblendung**



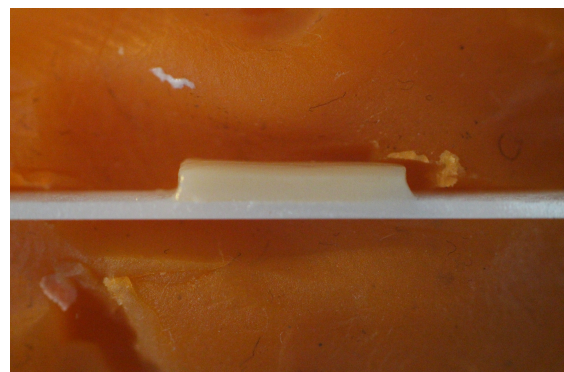
**Abbildung 56: Proband 4 Probe 11: von rechts beginnende Ablösung der Verblendung vom Substrat bei ungleichmäßiger Verblendform**



**Abbildung 57: Proband 4 Probe 30: annähernd gleichmäßige Verblendform**



**Abbildung 58: Proband 5 Probe 11: gleichmäßige Verblendform**



**Abbildung 59: Proband 5 Probe 13: mittige Kuhlenbildung bei unregelmäßiger Verblenddicke rechts**

### 3.8 Einteilung der Proben nach dem Bruchmodus in adhäsiv und kohäsiv

Bei sämtlichen Proben aller Probanden hat sich die Verblendkeramik ohne Rückstände vom Substrat gelöst. Das bedeutet, dass der Bruchmodus zu 100 % in adhäsiv einzuteilen ist.

### 3.9 Berechnung der Weibullfestigkeit der Proben 11 - 30 aller Probanden

In den Abbildungen 60 - 64 sind die Regressionsgeraden der nichtgestrahlten Proben der Probanden P1 - 5 dargestellt. Daraus lässt sich folgender Wert der Steigung für den Weibullmodul  $m$  ablesen: P1 = 5,89, P2 = 5,25, P3 = 2,51, P4 = 2,47, P5 = 4,93. Die Werte der Probanden 3 und 4 streuen stärker als bei den Probanden 1, 2 und 5, somit haben die Regressionsgeraden der Letzteren eine größere Steigung und damit einen größeren Weibullmodul.

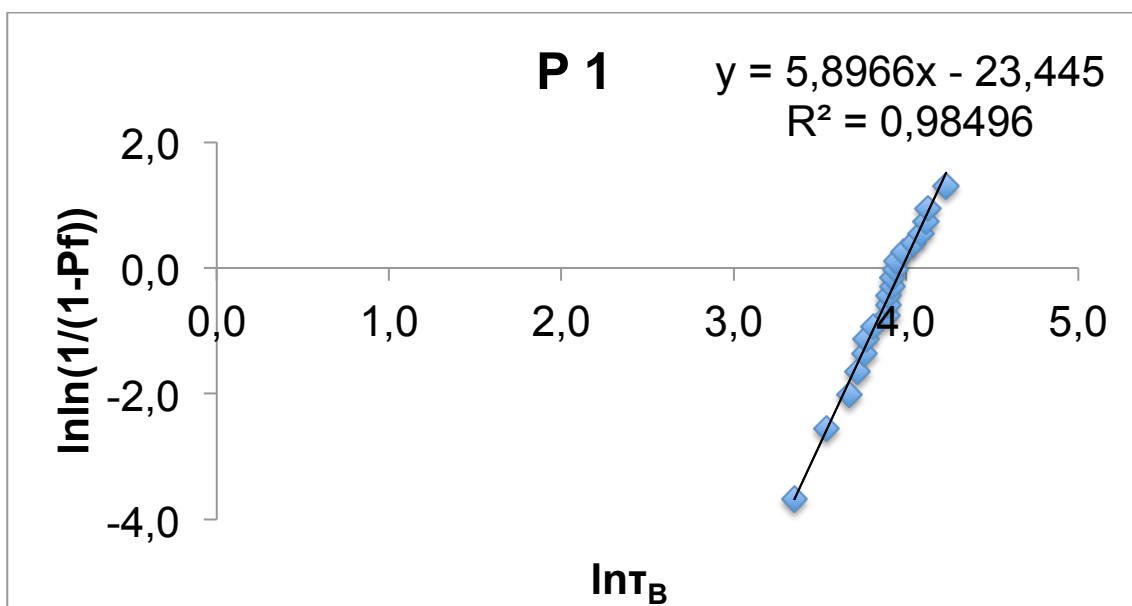


Abbildung 60: Weibullmodul 5,89 mit Regressionsgeraden Proband 1 der nichtgestrahlten Proben

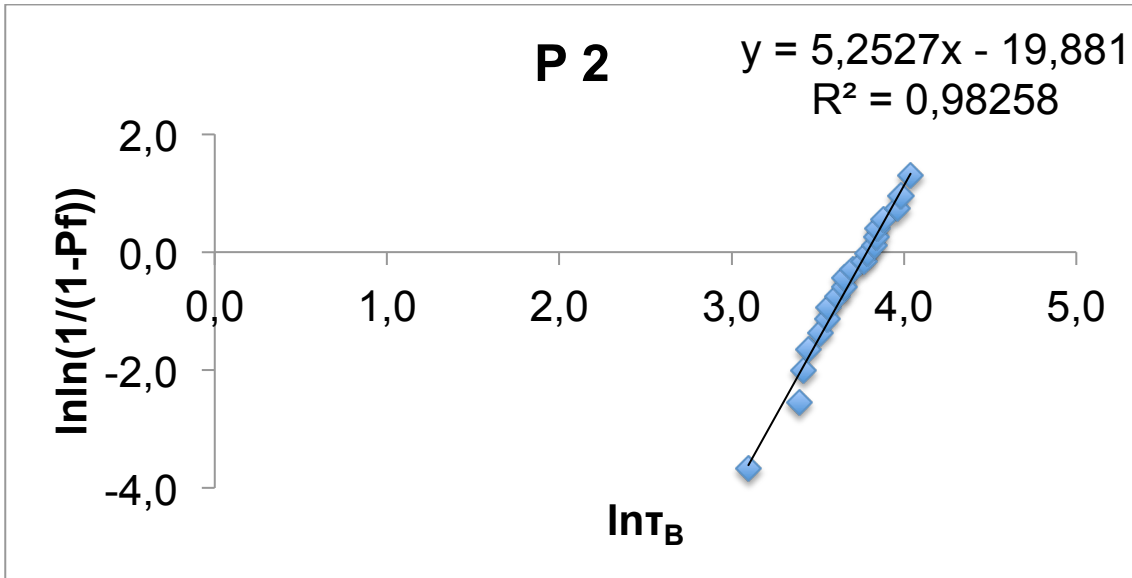


Abbildung 61: Weibullmodul 5,25 mit Regressionsgeraden Proband 2 der nichtgestrahlten Proben

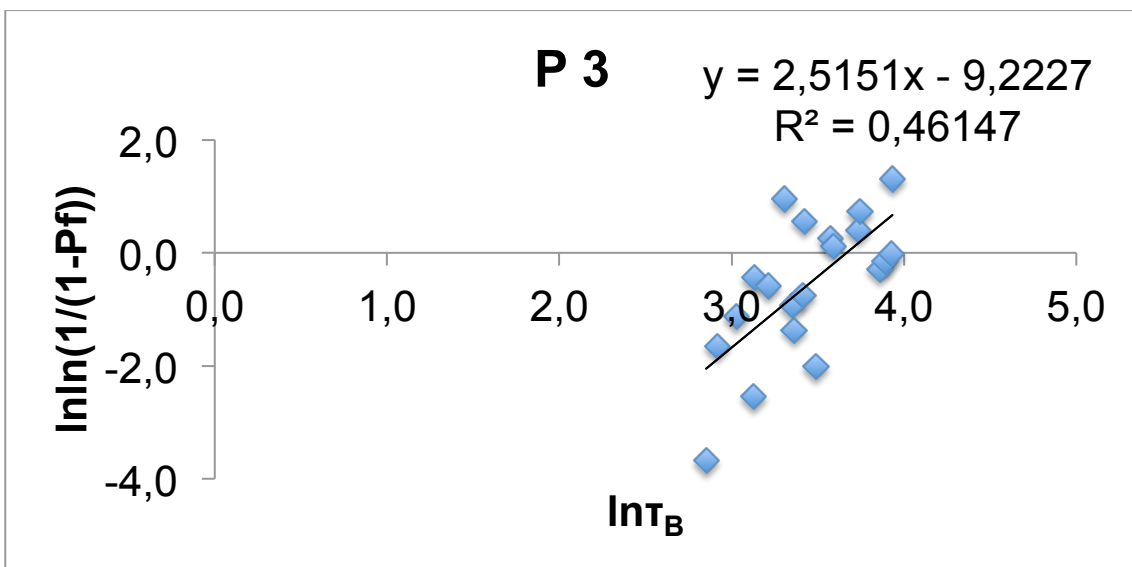


Abbildung 62: Weibullmodul 2,51 mit Regressionsgeraden Proband 3 der nichtgestrahlten Proben

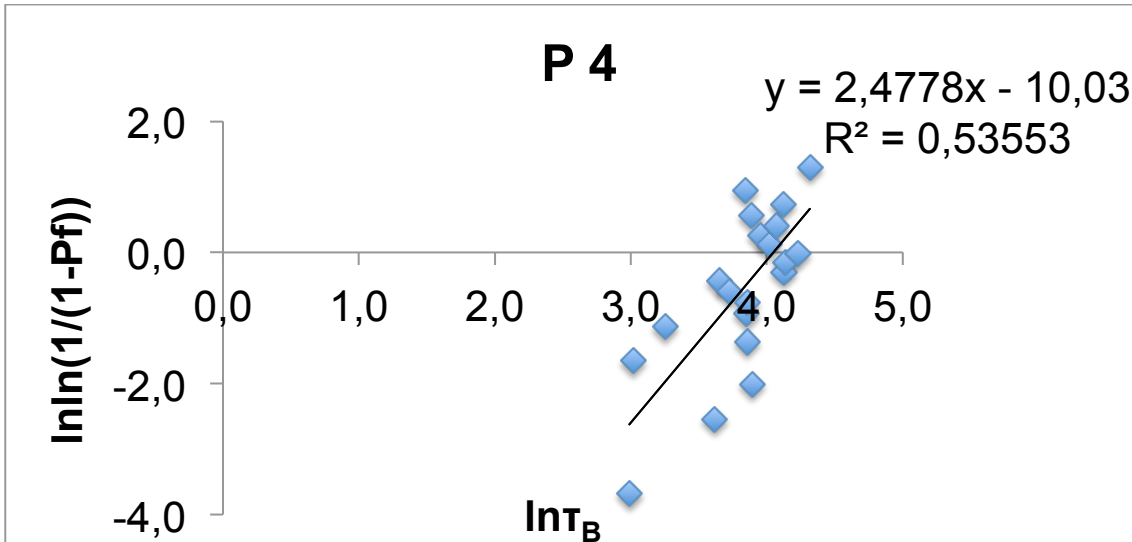


Abbildung 63: Weibullmodul 2,47 mit Regressionsgeraden Proband 4 der nichtgestrahlten Proben

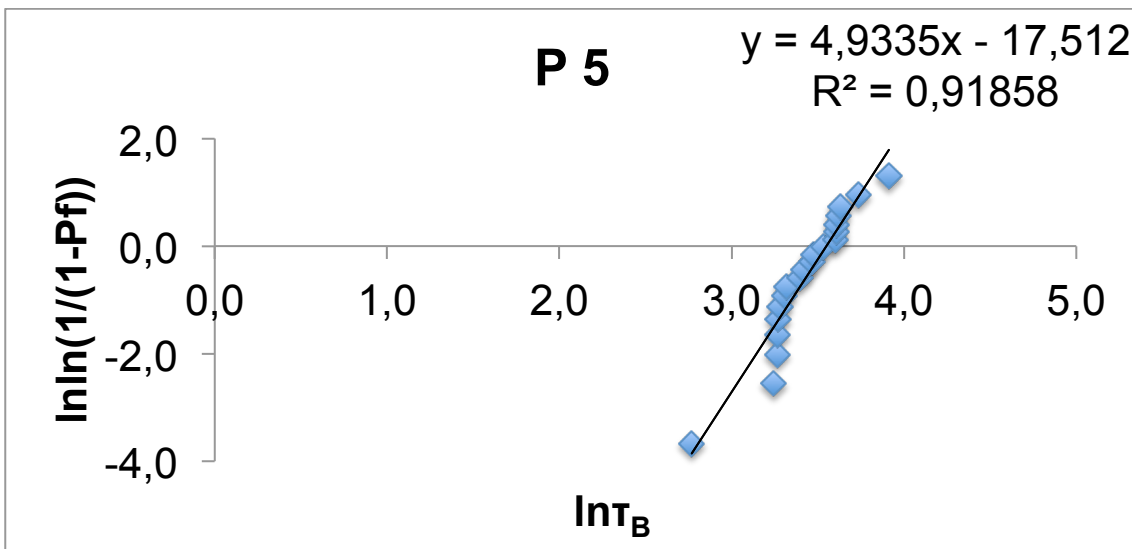


Abbildung 64: Weibullmodul 4,93 mit Regressionsgeraden Proband 5 der nichtgestrahlten Proben

Mit Hilfe der erstellten Regressionsgeraden lässt sich die Weibullfestigkeit (der nichtgestrahlten Proben) nach ISO 6872 berechnen, wie im Anhang aufgeführt.

In Abbildung 65 - 69 werden die Regressionsgeraden der sandgestrahlten (Gerade y1) und nichtgestrahlten Proben (Gerade y2) der Probanden 1-5 gegenübergestellt. Die Berechnung der Weibullfestigkeit für die sandgestrahlten Verblendproben ist im Anhang zu finden. Die Steigung (Weibullmodul) der Regressionsgeraden für die sandgestrahlten Proben ist bei allen Probanden höher als die Steigung der nichtgestrahlten Verblendproben (s. Übersicht in Tabelle 10).

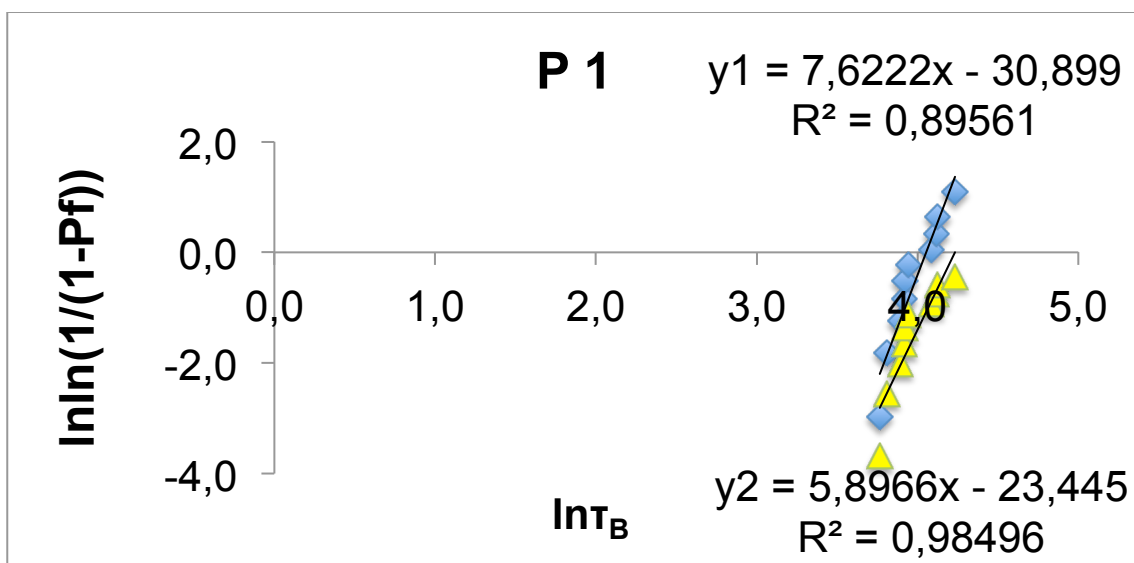


Abbildung 65: Regressionsgeraden y1 für die sandgestrahlten und y2 für die nichtgestrahlten Proben für Proband 1

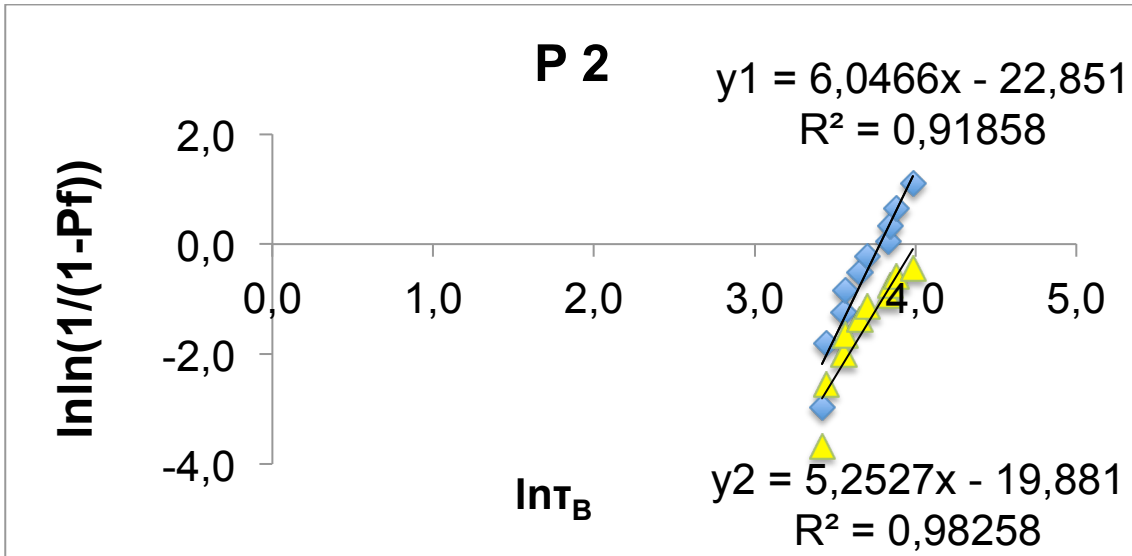


Abbildung 66: Regressionsgeraden  $y_1$  für die sandgestrahlten und  $y_2$  für die nichtgestrahlten Proben für Proband 2

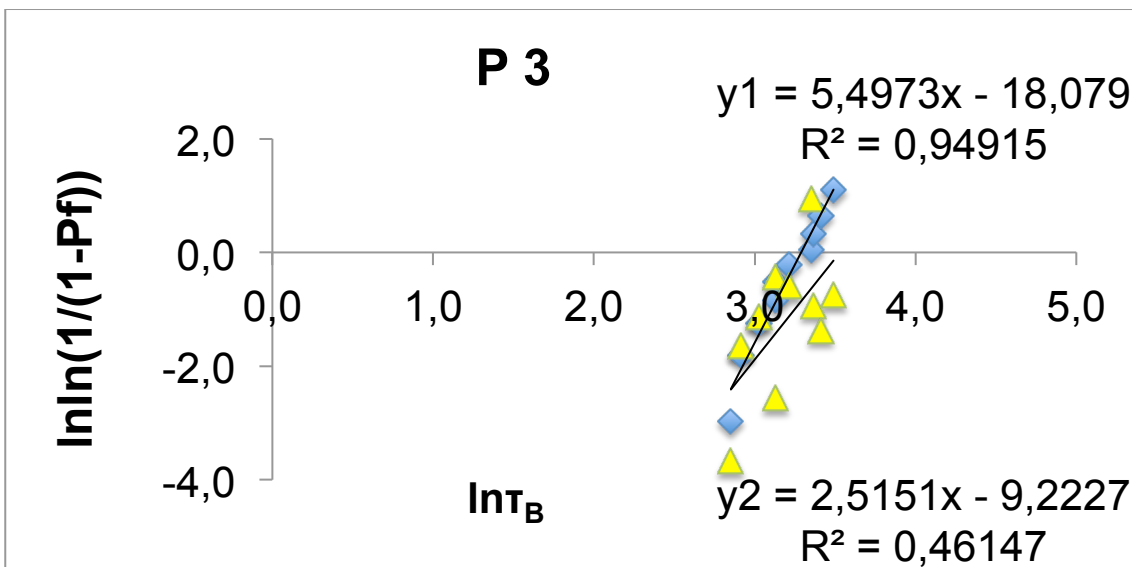


Abbildung 67: Regressionsgeraden  $y_1$  für die sandgestrahlten und  $y_2$  für die nichtgestrahlten Proben für Proband 3

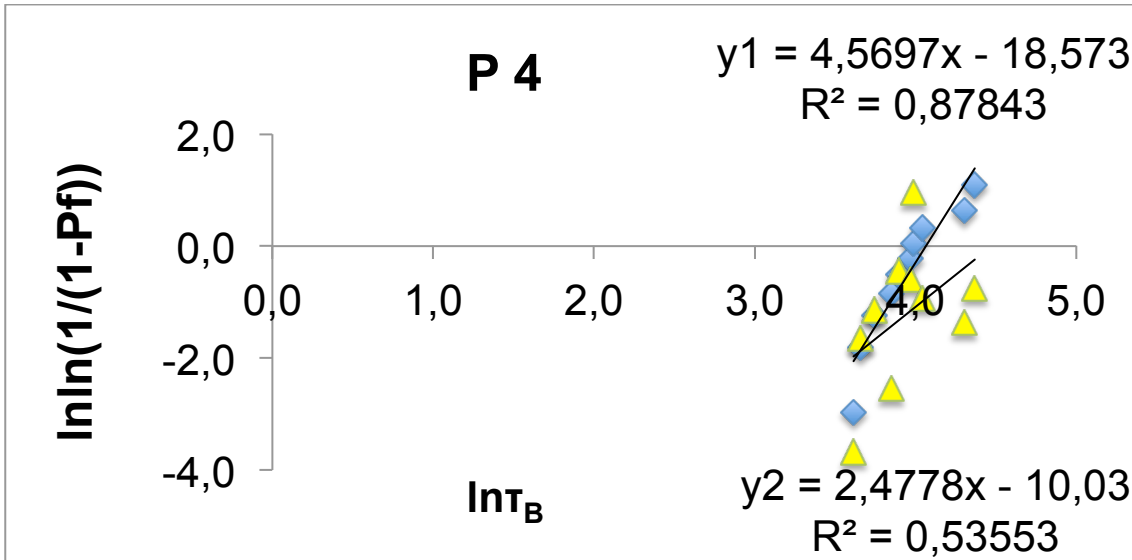


Abbildung 68: Regressionsgeraden  $y_1$  für die sandgestrahlten und  $y_2$  für die nichtgestrahlten Proben für Proband 4

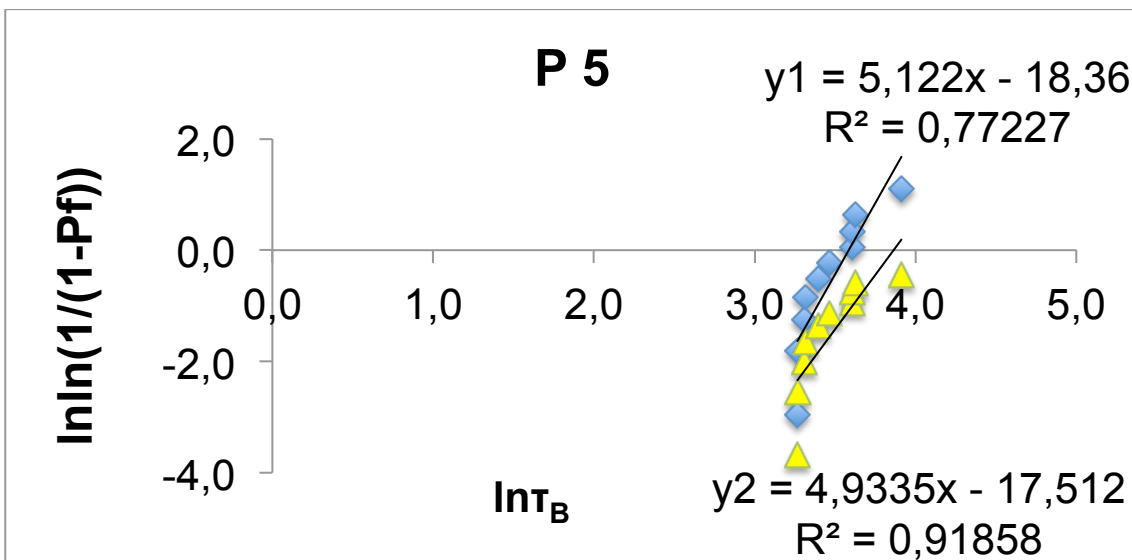


Abbildung 69: Regressionsgeraden  $y_1$  für die sandgestrahlten und  $y_2$  für die nichtgestrahlten Proben für Proband 5

In Tabelle 10 sind die Werte für Weibullmodul  $m$  und Weibullfestigkeit  $\sigma_0$  (MPa) zusammengefasst. Proband 4 erreicht die höchste Weibullfestigkeit von 57,27 MPa der nichtgestrahlten und von 57,97 MPa der sandgestrahlten Proben, Proband 5 mit 34,79 MPa (nichtgestrahlt) und Proband 3 mit 26,84 MPa (sandgestrahlt) die niedrigsten Festigkeitswerte.

**Tabelle 10: Weibullfestigkeit und -modul der Probanden P1 - 5 der nichtgestrahlten (NS) und der sandgestrahlten (SB) Proben**

	Weibullmodul m NS	Weibullmodul m SB	Weibullfestigkeit $\sigma_0$ (MPa) NS	Weibullfestigkeit $\sigma_0$ (MPa) SB
P1	5,89	7,62	53,30	57,40
P2	5,25	6,04	44,03	43,38
P3	2,51	5,49	39,13	26,84
P4	2,47	4,56	57,27	57,97
P5	4,93	5,12	34,79	35,87

Die Weibullmodul-Werte in Tabelle 10 aller Probanden der sandgestrahlten Proben (SB) sind höher als die nichtgestrahlten (NS). Bei den Probanden 1, 4 und 5 ergibt die Berechnung der Weibullfestigkeit für die sandgestrahlten Proben (s. Anhang) höhere Festigkeitswerte, für die Probanden 2 und 3 liegt die Weibullfestigkeit der SB-Proben unter den Werten der Nichtgestrahlten.

## 4 Diskussion

Zum Zeitpunkt des Durchführungsbeginns der vorliegenden Studie gab es keine Haftverbundprüfung von vollkeramischen Systemen welche in einer Normierung festgelegt war [12].

Eine Methode, um den Haftverbund zwischen Verblendkeramik und Zirkoniumdioxidgerüsten zu untersuchen, stellt in Anlehnung an die ISO-Norm 9693, die Rissbeginn-Prüfung nach Schwickerath dar. Diese ISO-Norm 9693 wurde 2016 um Keramik-Keramik-Systeme erweitert [7].

Studien haben erfolgreich diesen Test im vollkeramischen System angewandt (s. u. Tabelle 11). Keine dieser Studien hat jedoch mit der Zirkoniumdioxid-Verblendkeramik ZI-F Creation von W. Geller gearbeitet.

Um die Auswirkungen bei der Probenherstellung durch 5 verschiedene Testpersonen auf den Haftverbund im vollkeramischen System zu untersuchen, wurde auch in dieser Arbeit die ISO-Norm 9693 für die Metallkeramik mit vergleichbarem Charakter verwendet. Mit der Festigkeitsprüfung durch den 3-Punkt-Biegetest nach Schwickerath verlangt die ISO-Norm 9693 mindestens 25 MPa für den Haftverbund [7].

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit legen nahe, dass die Nullhypothese der Studie nicht verworfen werden kann: alle Probekörper der 5 Testpersonen erreichten die Mindestanforderung der ISO-Norm 9693 von 25 MPa für den Haftverbund. Hingegen waren die Ergebnisse einer Testperson ohne zahntechnische Vorkenntnis und eines Probanden mit wenig Verblenderfahrung schlechter. Alle Probanden erreichten unterschiedliche Testergebnisse trotz gleicher Anleitungs-Voraussetzungen. Proband 1 und Verfasser dieser Dissertation (s. Kapitel 2.4.1) weiß aus langjähriger Keramikerfahrung, dass ein gutes Resultat bezüglich Haltbarkeit und Ästhetik auf einer sorgfältigen Verarbeitung der keramischen Masse nur unter Einhaltung aller erforderlicher Details gelingt. Zahntechnikern und Zahnmedizinern ist bekannt, dass es einiger Übungsjahre bedarf, um diese Kunst zu beherrschen [27]. Erfahrung mit dem Werkstoff Dentalkeramik besitzen nur 2 der 5 Testpersonen dieser Studie (s. Kapitel 2.4.1).

Es existiert bislang eine Pilotstudie, in welcher der Einfluss von mehreren Zahntechnikern mit unterschiedlichem Berufs- und Erfahrungsstand (Azubi, Meister, etc.) zu nicht einheitlichen Resultaten führt (bezogen auf Oberflächenpolitur, der Haftverbund wurde hier nicht untersucht) [36].

#### 4.1 Probenherstellung

Für alle 5 Probanden galten in der vorliegenden Untersuchung identische Herstellungsbedingungen für die Prüfkörperherstellung. Diese steht für die klinische Anwendung einer zahnmedizinischen Restauration mit dem Ziel einer langfristig guten Erfolgsprognose für den Patienten. Eine Verarbeitungsanleitung (s. Kapitel 2.4.2) nach Herstellerangaben und ISO-Norm-Beschreibung soll hier der Leitfaden für ein einheitliches Vorgehen sein und einen Vergleich der Ergebnisse ermöglichen. So wird in dieser Anleitung im Sinne des Herstellers das Handling für jeden durchzuführenden Brand genau beschrieben. So soll auch der Ungeübte durch jeden Arbeitsschritt geführt werden.

Vor dem Aufbrennen der jeweils 30 Proben wurden 10 sandgestrahlte Proben in die Studie hineingenommen um zu untersuchen, ob anwenderbedingt eine Auffälligkeit im Oberflächenprofil besteht (s. Abbildungen 1-19 in Abschnitt 3.1) und damit die Verbundfestigkeit beeinflusst wird. In der Literatur gehen die Meinungen diesbezüglich auseinander. Eine Studie zur Untersuchung des Haftverbundes von Verblendkeramik auf Zirkonoxid ergab keine höheren Werte durch das Sandstrahlen [31]. Der Strahlprozess hat auch in der vorliegenden Arbeit keinen signifikanten Einfluss auf die Haftverbundwerte. Andere Studien erhielten für ihre sandgestrahlten Probengruppen höhere Festigkeitswerte für Y-TZP-Zirkonoxid [13], [14].

Bei der Probenherstellung war nicht nur die vom Verfasser dieser Arbeit dokumentierte Vorgehensweise der Probanden verschieden (s. Kapitel 4.1), auch die Umgebungstemperatur war unterschiedlich. So musste Proband 3

unter hoher Hitzeeinwirkung arbeiten. Diese wurde hervorgerufen einerseits durch die herrschende Außentemperatur und zusätzlich durch die Wärmestrahlung des Keramikofens. Der Laborraum war nicht mit Klimaanlage ausgestattet. Die Keramikmasse auf der Anmischplatte trocknete bei Proband 3 innerhalb von Sekunden aus und musste ständig mit Flüssigkeit neu angerührt werden. Hierbei konnten massive Luftpinschlüsse beobachtet werden. Ebenso führt eine zu trockene Keramikmasse zur Rissbildung und so zu herabgesetzter Stabilität nach dem Sinterprozess [37]. Die Auswertung des akustischen Signals der Proben des Probanden 3 weisen ein beginnendes Versagen der Keramik vor Einwirkung der Maximalkraft auf (s. 4.2.4). Bei den Probanden 1, 2, 4 und 5 herrschten weniger hohe Temperaturen im Raum. Im Folgenden werden die Auswirkungen unterschiedlicher Arbeitshaltung untersucht.

#### **4.1.1 Arbeitshaltung**

Zur Arbeitshaltung der fünf Probanden konnte festgehalten werden, dass Proband 1 aufgrund seiner langjährige Arbeitserfahrung mit dem Werkstoff die Proben routiniert und sehr schnell herstellte.

Die perfektionistische Einstellung des Probanden 2 ließ ihn die Verarbeitungsanleitung genauestens befolgen und sorgfältig und langsam arbeiten.

Proband 3 verblendete die 30 Proben mit wenig Sorgfalt und Geduld in dem Bestreben, schnell fertig zu werden. Die Gebrauchsanleitung wurde dabei kaum beachtet.

Proband 4 schichtete bei jeder Sitzung ausdauernd und konzentriert, um die Verarbeitungsanleitung einzuhalten.

Nach Beschreibung des Probanden 5 (der Verfasser war zur Dokumentation des Vorgehens nicht anwesend), ist präzise nach zahntechnischem Vorwissen verblindet worden. Die Vorgehensweise beim Auftragen des Liners wich von den Übrigen leicht ab da die Proben hierfür auf dem Tisch fixiert und nicht in der Formschablone beschichtet wurden. Die Probenreihen wurden teilweise nicht von Liner bis Glasur nacheinander gebrannt, sondern mit langen Zeiträumen dazwischen.

Sowohl in der Zahnmedizin als auch in der Zahntechnik spielt die Ergonomie eine sehr wichtige Rolle.

Für die arbeitstechnische Umsetzung im Alltag des Zahntechnikers bedeutet dies, dass für ein gutes Arbeitsergebnis eine möglichst belastungsarme Arbeitshaltung eingehalten werden sollte. Die Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin beschreibt ein sogenanntes Arbeitsprofil für den ergonomisch gestalteten Zahntechnikerarbeitsplatz [38].

Darin sind nicht nur geeignete Arbeitstisch-, Arbeitsstuhl-, Auflagenelemente und Arbeitsbeleuchtung enthalten, sondern es wird auch die optimale Körperhaltung des Zahntechnikers beschrieben. Danach soll ein Zahntechniker mit dem Oberkörper leicht gebeugt, aber mit dem Rücken angelehnt und den Armen abgestützt arbeiten. Der Kopf wird bei den meisten zahntechnischen Tätigkeiten so geneigt, dass die Kopfachse fast parallel, und der Blickwinkel ca. 40° zum Boden ausgerichtet ist [38].

Die Deutsche Gesellschaft für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde (DGZMK) ist der Meinung, ein gutes Sehvermögen stelle die Grundvoraussetzung für die Herstellung einwandfreien Zahnersatzes dar [39].

Zusammen mit der richtigen Beleuchtung formuliert die DGZMK eine Empfehlung für den Arbeitsabstand im Laborbereich von mindestens 30 cm. Bei schlechterem Visus soll dieser Abstand durch eine unterstützende Sehhilfe hergestellt werden. Hierbei sind weniger normale Lesebrillen oder einfache Kopflupen gemeint, sondern Lupenbrillen mit galileischen oder keplerschen

Linsensystemen, mit welchen die geeigneten physikalischen Parameter Abstand, Vergrößerung, Sehfeld und Körperhaltung eingestellt werden können. Die Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin empfiehlt für den zahntechnischen Feinmechanikbereich von 20-80 cm Arbeitsabstand eine vom Optiker individuell angepasste Arbeitsbrille [38].

Die aufgeführten elementaren Voraussetzungen für die Arbeitsbedingungen eines Zahntechnikers sollen helfen, Belastungen am Arbeitsplatz zu reduzieren, und dafür zu gesteigerter Konzentration und Schaffenskraft verhelfen, welche schlussendlich in höherer Arbeitsqualität resultieren.

Bei der Beantwortung der Frage, ob diese Voraussetzungen auf die Probanden dieser Studie zutreffen, ist als erstes das Arbeitsumfeld zu betrachten. Der für die Probenherstellung zur Verfügung gestellte Laborbereich ist bezüglich der Arbeitstisch-/Arbeitsstuhl-Kombination funktionell und ergonomisch aufeinander abgestimmt. Eine Lichtquelle von 1500 Lux stand zur Verfügung, wie es von der Arbeitsstätten-Richtlinie [40] und der DIN 67505 als Nennbeleuchtungsstärke ausgewiesen wird [41]. Ein Stereo-Mikroskop für den Laborbereich (10-20 fache Vergrößerung) war am Labortisch angebracht. Es wurde von den Probanden für die Probenherstellung aber nicht verwendet. Somit war das Anforderungsprofil für korrektes zahntechnisches Arbeiten gegeben.

Die Arbeitshaltung der einzelnen Studienprobanden wies jedoch gravierende Unterschiede auf. Proband 3 hielt sich zwar anfangs gerade auf dem Laborstuhl, verblendete dann ca. 2 Stunden lang ohne den Rücken und die Arme abzustützen und geriet schließlich in eine verstärkt nach vorn gebeugte Haltung. Der Arbeitsabstand von 30 cm verkürzte sich auf etwa die Hälfte. Diese nicht ergonomische Körperhaltung kann zu der ungeduldigen und weniger sorgfältigen Vorgehensweise des Probanden 3 und im Vergleich zu den anderen Studienprobanden zu schlechteren Probenergebnissen geführt haben.

Nicht nur die Augen des Probanden 3 ermüdeten durch ständige Nahakkommodation bei einem Arbeitsabstand von ca. 10-15 cm. Auch Proband 4

hatte dadurch, dass er seine Lesebrille nicht trug, ein ungeeignetes Sehfeld. Er arbeitete mit den Armen am Tisch abgestützt und ergonomisch korrekt gab jedoch zu, ohne seine Brille nicht scharf sehen zu können. Die Haftverbundergebnisse des Probanden 4 fielen hoch aus, hätten mit mehr Sehkraft eventuell weniger stark gestreut. Die Probenreihe 21-30 bearbeitete Proband 4 komplett ohne seine Brille (s. Kapitel 2.4.2), hier erreichte er seine niedrigsten Haftverbundwerte.

Proband 2 erreichte gute und sehr regelmäßige Haftverbundergebnisse. Lediglich eine Verblendprobe zeigte bei der Auswertung des akustischen Signals einen Peak vor erreichter Maximalkraft ( $F_{\max}$ ), welcher als mindere Probenqualität zu deuten ist (s. Anhang).

Proband 2 trug bei allen Arbeitsabläufen eine Stirnlupe. Lupenbrillen sorgen für die Entlastung des Ziliarmuskels, da sie für diesen die Nahakkommodation übernehmen und das Auge sich weniger anstrengen muss. So lassen sich im feinmechanischen Schaffen Ungenauigkeiten vermeiden und mehr Präzision erreichen [39].

Mehrere Verblendproben des Probanden 1 wiesen bei der akustischen Signalauswertung kleinere Peaks und damit einen Rissbeginn vor der höchsten Druckbelastung auf, was die betroffenen Verblendungen qualitativ abwertet (s. Anhang). Insgesamt wurden hier jedoch im Mittelwert die höchsten Haftverbundwerte verzeichnet. Proband 1 brachte nicht nur eine fast zehnjährige Erfahrung mit der Verarbeitung der Zirkonverblendkeramik von W. Geller mit, sondern zahntechnische Arbeitsroutine von zwanzig Jahren.

## 4.2 Messwerte

Gemäß der ISO-Norm 9693 unterzog man die fertigen keramisch verblendeten Zirkoniumdioxidproben dem Drei-Punkt-Biegetest nach Schwickerath für die Rissbeginnprüfung. Eine hohe Biegefestigkeit des Werkstoffes spricht für eine gute Anwendungsprognose [12].

Ist die Biegefestigkeit hoch, bedeutet das für die Keramik, dass sie widerstandsfähig gegen das für sie charakteristische Spröbruchverhalten bei Belastung ist. Die Biegefestigkeitswerte fallen für jede Dentalkeramik unterschiedlich aus und bewegen sich zwischen ca. 60 und 450 MPa [27].

In zahlreichen Studien, einige in Tabelle 11 zusammengefasst, wurde der Schwickerath-Test ebenfalls verwendet:

**Tabelle 11: Übersicht über einige Studien mit Verwendung des Schwickerath-Tests**

Autor	Zirkoniumdioxid	Verblendkeramik	Substratbehandlung sandgestrahlt/nichtgestrahlt	Verbundfestigkeit
Y. Terni, K. Sato et al. [42]	Ce-TZP/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Nanocomposite (P-NANOZR, Panasonic Health Care, Ehime, Japan)	1. CERABIEN ZR (Kuraray Noritake Dental, Tokyo, Japan) 2. VINTAGE ZR (Shofu, Kyoto, Japan) 3. Cercon Ceram Kiss (Degudent, Hanau-Wolfgang, Germany) 4. VITA VM <sup>®</sup> 9 (VITA Bad Säckingen, Germany)	1. Politur (Star Gloss edenta AG, Switzerland) 2. Regenerationsbrand bei 1000 °C, 5 min 3. Sandstrahlen 50 µm Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 10 s, 0,2 MPa 3. Sandstrahlen + Regenerationsbrand	alle Proben > 25 MPa
K. Tada, T.Sato [43]	TZP TZ-3YB-E (Tosoh, Tokyo,	CERABIEN ZR (Noritake, Nagoya,	1. Sandstrahlen 50 µm Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 10 s, 30 s, 0,4 MPa	alle Proben 26 - 28 MPa

	Japan)	Japan)	2. 125 µm Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 30 s, 0,4 MPa 3.Regenerations- brand 1000 °C 5 min	
M.N. Aboushelib C.J. Kleverlan et al. [44]	1. White Cercon Base (Degudent GmbH Hanau- Wolfgang, Germany) 2. Yellow Cercon Base (Degudent) 3. White Lava ( 3M ESPE AG, Germany) 4. Yellow Lava (3M ESPE) 5. Procera Zirconia ( Nobel Biocare AB, Goteborg, Sweden)	1. Nobel Rondo Zirconia (Nobel Biocare AB, Goteborg, Sweden) 2. Cercon Ceram Express (Degudent GmbH Hanau- Wolfgang, Germany)	1. CAD/CAM- gefräst 2. sandgestrahlt 3. Liner- Verwendung	alle Proben 18 - 50 MPa

In den oben aufgeführten Studien konnte größtenteils der von der ISO-Norm geforderte Haftverbundwert von 25 MPa erreicht werden. Dies kann an der Art der Probenherstellung gelegen haben. Es wird zum Beispiel das keramische Verblendvorgehen beschrieben welches beinhaltet, dass die Verblendmasse verdichtet und überschüssige Flüssigkeit abgesaugt wurde. Außerdem verwendete man einen Liner [42].

Zwei der oben genannten Studien kommen zu dem Schluss, dass eine unterschiedliche Oberflächenbearbeitung keinen signifikanten Einfluss auf den Haftverbund hat.

Verschiedene Ergebnisse in den Haftverbundwerten in Tabelle 11 können jedoch ebenso substratbedingt sein, wie in einer Studie beobachtet wurde [44].

Eingefärbtes Zirkonoxid enthält beispielsweise Farbpigmente, welche eine Wirkung auf die Substratstruktur haben und eine unterschiedliche Oberflächenbearbeitung erfordern [44]. Des Weiteren kommt es auf die Kompatibilität der verwendeten Verblendmasse zum Substrat an bezüglich der Einfärbemethode des Zirkoniumdioxidgerüstes [44]. In der vorliegenden Arbeit wurde nicht eingefärbtes Zirkonoxid verwendet. Ebenso kam eine andere Verblendkeramikmasse zum Einsatz: Die hier verwendete Creation ZI-F wurde bisher in keiner anderen Studie verwendet, somit liegen keine Vergleichswerte vor. Es konnte auch keine Literatur dazu gefunden werden, obwohl sich diese Masse schon seit ca. 10 Jahren auf dem Markt befindet. Ein Anruf bei der zugehörigen Herstellerfirma (Klema Dentalprodukte GmbH, Meiningen Austria) ergab bezüglich der Nachfrage nach einer Haftverbundprüfung zwischen Zirkoniumdioxid-Substrat und Verblendkeramik keine weiteren Fortschritte. Es wurde auf die Haftverbundergebnisse der Verblendkeramik verwiesen, welche in den Herstellerangaben zu finden sind.

In der vorliegenden Arbeit erhielt man durch gleichmäßigen Aufbau einer Druckbelastung in der Prüfvorrichtung (Zwick-Prüfgerät) für jede Probe eine Maximalkraft bei Frakturieren der Verblendkeramik. Ziel war hierbei zu untersuchen, ob die Daten der Testpersonen stark differieren, obwohl gleiche Herstellungs-Voraussetzungen für die Prüfkörper gegeben waren.

Die Werte aller Probanden streuen stark, liegen aber innerhalb der Wertebreite der bisher durchgeführten Studien, in denen die Prüfkörper jedoch immer von einer Person hergestellt wurden.

#### **4.2.1 Krafteinzelwerte**

Die erreichten Krafteinzelwerte der Probanden sprechen für eine Beeinflussung durch die unterschiedliche Verarbeitungsart, wie sie in Abschnitt 4.2 beschrieben wurde.

Die Kraftwerte des Probanden 1 (Zahntechniker) liegen am höchsten.

Bei Proband 2 ergibt sich eine fast gleichmäßige Punktwolke (Abb. 13) mit Kraftwerten um 13 N. Genau wie bei Proband 4 wurde die Arbeitsanleitung akribisch eingehalten und so ergaben diese Krafteinzelwerte der Probanden 1, 2 und 4 nach Durchlaufen des Rechenflows der ISO-Norm 9693 (s. 2.6) die höchsten Verbundfestigkeitswerte der vorliegenden Arbeit. Mit Hilfe der vorgelegten Verarbeitungsanleitung und ihrer dokumentierten Einhaltung, konnten 2 Testpersonen ohne Verblenderfahrung zu guten Krafteinzelwerten gelangen und so Haftverbundergebnisse erreichen, die über den von der ISO-Norm 9693 geforderten 25 MPa liegen.

#### 4.2.2 Verbundfestigkeit

Auch die Auswertung der Haftverbundwerte mit Darstellung im Balkendiagramm für die Mittelwerte mit Standardabweichung lässt Rückschlüsse auf die jeweilige Arbeitshaltung und unterschiedliche Vorgehensweise der 5 Probanden zu.

So fällt im Balkendiagramm des Probanden 3 (Abb. 30) auf, dass die ersten 10 Proben die von der ISO festgelegten 25 MPa für den Haftverbund im metallkeramischen System im Gegensatz zu den weiteren 20 Proben der Testperson, knapp verfehlen. Es stellt sich die Frage, ob hierfür das unsorgfältige Schichten der Masse mit vielen Lufteinschlüssen ein Grund war. Diese führen nach zahntechnischem Know-how zu Rissen und Sprüngen, da sie beim Brennvorgang Porositäten im Gefüge verursachen [37].

Proband 2 konnte konstante Werte erzielen, die im Vergleich zu denen von Proband 1 niedriger lagen. Proband 2 ließ die Keramikmasse durch langsames Arbeiten ebenso stark austrocknen wie Proband 3, welcher die fertigen Plättchen vor dem heißen Ofen bei gefühlter Raumtemperatur von über 35°C stehen ließ. Dazu ließ Proband 3 das Verdichten der Masse weg. Man verhindert ohne Verdichten, dass die Pulverteilchen beim Brennvorgang zusammensintern. Eine größtmögliche Verdichtung ist wichtig für die

Vermeidung von Rissbildung beim Trockenvorgang im Ofen und für eine verringerte Brennschwindung und Porenbildung. Daraus resultieren Hohlräume und eine geringere Festigkeit der Verblendung [28].

Wird die Masse durch sogenanntes Riffeln oder Klopfen verdichtet, tritt die überschüssige Flüssigkeit an die Oberfläche, vermindert die für die Keramik charakteristische Brennschwindung und gewährleistet die Standfestigkeit der Schichtung [37].

Proband 4 übertrifft den Normwert teilweise um das Doppelte, seine Haftverbundwerte resultieren jedoch in einer größeren Standardabweichung. Die Standardabweichung veranschaulicht, wie stark die Werte innerhalb eines Datensatzes streuen und beschreibt die einzelnen Abweichungen vom Mittelwert [45]. Dem Betrachter kann mit diesem Streuparameter ein genaues Bild über die Gesamtlage vieler gemessener und errechneter Daten vermittelt werden.

Das bedeutet für die Proben von Proband 4, dass sie ähnlich hohe Verbundfestigkeitswerte wie die eines erfahrenen Zahntechnikers erreicht haben, jedoch mit hoher Standardabweichung.

Abweichungen sind zwar bei einem Vorgehen durch Handarbeit unvermeidlich, doch ist die Streuung bei Proband 4 um sehr viel größer als bei Proband 2, welcher ebenfalls nicht über zahntechnische Vorkenntnisse verfügte.

Man könnte dies in beiden Fällen dahingehend deuten, dass es nicht nur allein auf Routine oder das Verständnis und Wissen über Materialverhalten ankommt, sondern auch auf die Fähigkeit des Einzelnen, beispielsweise eine vorgegebene Gebrauchsanweisung exakt umzusetzen um zu einem guten Resultat zu kommen, welches für eine sichere klinische Anwendung stehen kann.

Bei Proband 5 fällt die Verbundfestigkeit der Proben kleiner aus als bei den Probanden 1, 2, 4 und z. T. 3. Ursache hierfür kann sein, dass die Verblendproben zwischen den einzelnen Bränden eine gewisse Zeitspanne (z. B. 14 Tage) nicht weiterverarbeitet wurden, wie vom Probanden angegeben. Die Standardabweichung der Probekörper des Probanden 5 ist im Diagramm (Abb. 21) mit Hilfe des zahntechnischen Vorwissens geringer als die Standardabweichung im Diagramm von Proband 3 (Abb. 19). Die auffälligen Unterschiede aller Haftverbundwerte kann man in diesem Fall auf die hohe Streuung zurückführen, welche auf der für Proband 3 dokumentierten, teilweise sehr unsorgfältigen Arbeitsweise basieren können.

Proband 2 ließ seine Proben vor dem Brennvorgang lange austrocknen, ging jedoch mit Bedacht vor und saugte überschüssige Modellierflüssigkeit mit dem Kosmetiktuch ab. Befindet sich beim Brennen zu viel Flüssigkeit in der Keramikmasse, bilden sich beim Verdampfen des Wassers Blasen, welche die Verbundfestigkeit durch Zerreißen der Masse herabsetzen [37]. Durch genaues Einhalten der Vorgaben erreicht Proband 2 sehr gleichmäßige Verbundfestigkeitswerte seiner Probeplättchen.

#### 4.2.3 Probengeometrie

Alle Prüfkörper wurden mit einer digitalen Schieblehre vermessen und einer mikroskopischen Auswertung unterzogen. Des Weiteren ist eine visuelle Begutachtung der Probekörper durchgeführt worden. Für die mikroskopische Analyse nahm man nur die nichtgestrahlten Verblendproben, da sich zu den sandgestrahlten kein Unterschied im Haftverbund zeigte. Zur Untersuchung der Probengeometrie konnten nur die Probenplättchen verwendet werden bei denen sich die Verblendung nach dem Schwickerath-Test noch auf dem Substrat befand (die Anzahl wurde nicht dokumentiert).

Bei visueller Analyse wird erkennbar, dass von den beurteilten Proben von Proband 1 keine mit „schlecht“ (Kriterien s. 2.5.1 und 2.5.2) zu bewerten ist, Kantenabplatzungen und Ablösung von der Substratbasis bei einigen Proben

jedoch vorkommen, ebenso wie eine mittige Kuhlenbildung, eine konkave Form auf der geraden Oberfläche des Verblendkeramikbereiches. Die Ursache hierfür kann in nicht ausreichendem Verdichten dieser Verblendungen liegen und zu höherem Brennschwund an dieser Stelle. Wenn Verblendkeramik beim Brennen im Keramikofen eine Schwindung erfährt, besitzt die Masse die Tendenz, durch Kohäsion ihrer Partikel und eine gewisse Oberflächenspannung, sich vom dünneren zum dicksten Masseteil hinzuziehen und Kugelgestalt anzunehmen [28]. Es muss daher darauf geachtet werden, mit gleichmäßigen Pinselportionen Keramikmasse aufzutragen.

Bei Proband 2 ist nur eine Probe als „schlecht“ einzustufen. Es kommen bei zwei Probekörpern Abplatzungen vor und bei nur einer die mittlere Kuhlenbildung. Proband 2 hat sehr intensiv verdichtet und immer wieder Flüssigkeit abgesaugt. 5 Proben schneiden bei Proband 3 mit „schlecht“ ab, dabei treten bei mehreren Proben Merkmale auf wie Abplatzungen mit Ablösung der Verblendkeramik von der Basis, Rissbildungen durch die ganze Verblendfläche, Absteigen der Verblendung vom Substrat und Luftblasen. Des Weiteren können vermehrte Kuhlenbildung und flache Verblendflächen auch von dem für Proband 3 dokumentierten unordentlichen, unkoordinierten Schichten herrühren.

Drei „schlechte“ Proben bei Proband 4 und eine bei Proband 5 sowie Abplatzungen, Ablösungen und Blasenbildung bei beiden sind auf Verarbeitungsfehler zurückzuführen. Bei Proband 5 sind Probenverblendungen mit schräger Fläche dabei. Hier liegt ein unregelmäßiger Brennschwund durch eventuell versäumtes oder zu schwaches Verdichten der Masse und ungleichmäßiges Schichten (s. o.) vor. Blasenbildung bei den Probanden 4 und 5 sind in Zusammenhang mit unsauberem Auftragen der Verblendmasse zu bringen oder mit Lufteinbringung beim Anmischvorgang der Keramik.

Auf schleiftechnische Dimensionskorrekturen des Verblendkeramikrechtecks wurde verzichtet, um eventuelle zusätzliche Fehlerquellen wie z. B. Rissbildung zu vermeiden.

Bei der mikroskopischen Messung aller Probenflächen (Verblindlänge, Verblinddicke) stellte sich heraus, dass sämtliche Messwerte aller Probanden prozentual über den in der ISO-Norm 9693 beschriebenen geometrischen Daten liegen. Eine minimale Abweichung unter 6 % ergaben die Verblinddicke-Werte der Probanden 2, 4 und 5. Die Messungen wurden mit dem Mikroskop durchgeführt, da es im Vergleich zur Schieblehre eine geringfügig genauere Erfassung der Probekörperflächen zulässt. Beim Vorgang zur Erfassung der Probengeometrie mittels einer Schieblehre kann man durch unterschiedliches Ansetzen des Instruments an den Probeflächen Abweichungen der Messdaten herbeiführen.

Auch die Werte der Messung mit Schieblehre ergeben ein prozentuales Übertreten der ISO-Norm-Maße für die Probenlänge, -breite und -dicke. Geringe Abweichungen (< 3 %) betreffen die Probenlängen von Proband 5. Es ist generell ein Nachteil des Schwickerath-Tests, dass die Verblinddicke nicht in das Flussdiagramm der ISO-Norm einfließt und somit für die Messwerte praktisch keinen Einfluss hat.

#### 4.2.4 Akustisches Signal

Das akustische Signal in Millivolt (mV) wurde während des Schwickerath-Tests nach ISO 9693 aufgenommen und macht deutlich, ob ein Rissbeginn mit der Maximalkraft  $F_{\max}$  übereinstimmt oder nicht [31]. Im Kraft-Weg-Diagramm ist eine vorzeitig auftretende Rissbildung teilweise nicht sichtbar. Sie kann aber im dazugehörigen Diagramm mit akustischem Signal als leichter Peak vor  $F_{\max}$  erfasst werden (s. unterer Teil des Diagramms in Abbildung 49). Bei einigen Proben konnten etwas schwächere Signale vor  $F_{\max}$  aufgenommen werden, was bedeutet, dass diese Proben vor dem Versagen durch  $F_{\max}$  schon Risse bildeten die einen kleineren Peak im Diagramm verzeichneten. Diese Tatsache deutet auf eine mindere Qualität der betreffenden Probe hin.

Jeweils die Probe 1d, also Probe 4 jedes Probanden wurde unter dem Rasterelektronenmikroskop (REM) untersucht. Diese Verblindproben weisen aber kein akustisches Signal vor Erreichen der Maximalkraft auf. Anders die Probe 4 von Proband 3, welche zwei schwächere akustische Signale vor  $F_{\max}$  verzeichnet (s. Tabelle Anhang). Vergleicht man die REM-Abbildungen 10-19 aus Kapitel 3.1, sind auf allen Bildern ähnliche Oberflächenrauheitsmuster festzustellen. Auch die Abbildungen 14 und 15 der Probe 4 zeigen keine auffälligen Oberflächendefekte wie zum Beispiel sehr tiefe Rillen oder Krater, welche in Zusammenhang mit den kleineren akustischen Signalen vor  $F_{\max}$  und einer vorzeitigen Rissbildung gebracht werden könnten. Somit gibt es keine Übereinstimmung des Sandstrahlprozesses mit besserer oder schlechterer Probenqualität.

Exemplarisch wird an Probe 10 des Probanden 5 in Abbildung 49 gezeigt, wie beim 1. akustischen Signal nach etwa 0,05 mm ein kleinerer Peak von etwa 750 mV auftritt. Im Kraft-Weg-Diagramm (Abb. 49) ist an gleicher Stelle (0,05 mm) ein leichtes Ansteigen der Messkurve sichtbar. Demnach hat an dieser Stelle der Probe 10 bereits ein Rissbeginn und sehr frühes Versagen der Verblindung stattgefunden.

Auffällig ist die Auswertung des akustischen Signals von Proband 2, die mit seiner gleichmäßig perfektionistischen Arbeitshaltung korreliert: Die Probenreihe von Proband 2 enthält lediglich eine Probe mit akustischem Signal vor dem zweiten Signal, auf welches  $F_{\max}$  und das Verblindungsversagen folgte (Probe 20 s. Anhang). Trotzdem konnte für diese Verblindprobe ein Krafteinzelwert gemessen werden, der innerhalb des Durchschnittswertes von 13 N für Proband 2 liegt.

Betrachtet man die Balkendiagramme für die Haftverbundmittelwerte beim ersten akustischen Signal der Probanden 3 und 4 (Abb. 33 und 34) so fällt auf, dass Proband 3 mit den ersten 10 Prüfkörpern an die von ISO 9693 festgelegten 25 MPa für die Verbundfestigkeit nicht herankommt. Proband 4

liegt mit  $n = 1-10$  und  $n = 21-30$  doppelt so hoch, jedoch mit signifikant hoher Standardabweichung der Werte. Die Fehlerquellen hierfür können primär fehlende Übung und auch die vorübergehende Beeinträchtigung des Sehvermögens durch Vergessen der Brille bei Proband 4 sein.

Bei der Übersichtsdarstellung aller Daten in Abb. 47 wird sichtbar, dass die Verbundfestigkeit beim ersten akustischen Signal von allen Probanden außer Proband 1 und 4 geringer ist als bei Erreichen der Maximalkraft  $F_{\max}$ . Proband 3 und 5 erfüllen den ISO-Norm-Wert zum Teil nicht. Auch hier liegen die Datenreihe der Probanden 2 und 4 mit dem sorgfältigsten und genauesten Arbeitsstil sowie die von Proband 1 mit langer Erfahrung in der Dentalkeramik über dem ISO-Sollwert. Trotzdem verzeichneten 6 Prüfkörper des Probanden 1 ein akustisches Signal mit Rissbeginn vor erreichter  $F_{\max}$ .

Da die Haftverbundwerte der ISO-Norm von den Probanden erfüllt werden und teilweise höher liegen, könnte man ein erstes akustisches Signalauftreten mit kleinem mV-Wert vor  $F_{\max}$  auch dahingehend deuten, dass es sich bei zunehmender Druckbelastung dabei um abbrechende kleinere Verblendkeramikreste oder -überschüsse vom Zirkoniumdioxid-Substrat handelt. Es kann aber ebenso angenommen werden, dass die Verblendkeramik schon zu Beginn der Kraftereinwirkung zu versagen beginnt. In diesem Fall tritt das akustische Signal nicht bei der Maximalkraft  $F_{\max}$  auf. Bei Proband 1 trat ein erstes akustisches Signal bei 6 Prüfkörpern auf, bei Proband 2 bei einer Probe, bei den Probanden 3 und 4 kam es 5 mal vor und Proband 5 hatte 11 Probekörper mit akustischem Signal vor Erreichen der Maximalkraft. Dementsprechend war das Aufzeichnen eines akustischen Signals für die Auswertungen der Prüfkörperdaten in dieser Studie hilfreich.

#### 4.2.5 Bruchmodus

Sämtliche Proben weisen ein adhäsives Bruchverhalten auf obwohl von allen Probanden gute Ergebnisse im Haftverbund ( $> 25$  MPa) erzielt werden konnten.

Bei makroskopischer Analyse blieb auf allen Zirkoniumdioxidplättchen nach Ablösen der Verblendkeramik eine blanke Fläche ohne Keramikreste übrig.

In der Literatur wird adhäsives und kohäsives Bruchverhalten unterschieden. Dabei bleiben bei der kohäsiven Variante Verblendkeramikrückstände auf dem Zirkoniumdioxid haften. Dies steht für einen guten Haftverbund zwischen beiden Materialien, welcher dementsprechend nicht die größere Schwachstelle darstellt, sondern vielmehr die Verblendkeramik [32]. Demnach liegt beim adhäsiven Bruchmodus das Versagen im Bereich des Interface der beiden Werkstoffe und kommt bei guten Haftverbundwerten nicht vor.

In anderen Studien konnte jedoch ähnlich wie in der vorliegenden das Auftreten von adhäsiven Frakturen bei Haftverbundwerten gleich oder höher dem ISO-Soll beobachtet werden [32]. Der vorliegende Frakturmodus kann hier mit den Verbundfestigkeitswerten der 5 Probanden nicht in Zusammenhang gebracht werden.

#### 4.3 Weibull-Berechnung

Die Weibull-Verteilung kann als Exponentialverteilung für eine Datenmenge verwendet werden, um die Versagenswahrscheinlichkeit von Werkstoffen mit Sprödbbruchverhalten wie der Dentalkeramik zu beschreiben. So lässt sich das Streuverhalten der Keramikfestigkeit errechnen. Man erhält damit einen Zusammenhang zwischen der Belastungskraft und der Materialbruchwahrscheinlichkeit. In der Literatur wird mit diesem Verfahren die Biegefestigkeit von keramischen Dentalwerkstoffen (Silikat- und Oxidkeramik) beschrieben [12]. Für die Ermittlung der Weibullfestigkeit und des Weibullmoduls wurde in einer Studie die Statistik-Berechnung nach ISO 6872 (s. Kapitel 2.9) erstmals auf die Haftverbundwerte angewandt um zu untersuchen, ob es einen Unterschied zwischen sandgestrahlten und nicht sandgestrahlten Zirkonproben im Haftverbund gibt [31]. In der vorliegenden Arbeit fließen in die Weibull-Statistik ebenfalls die Haftverbundmittelwerte der 5 Probanden ein. Verwendet werden dafür sowohl die 20 nicht sandgestrahlten als auch die 10 sandgestrahlten Verblendproben. Die Regressionsdiagramme wurden erstellt,

um mehr über die Verbundfestigkeit der Prüfstücke beider Gruppen aussagen zu können. Man nimmt hierfür die metrische Zielgröße, den Haftverbund (als natürlichen Logarithmus, damit die sog. Ausreißer-Werte keine zu große Gewichtung erhalten) und erhält mit der Steigung den Weibullmodul  $m$  für jeden Probanden als Maß für die Festigkeitsstreuung der Verblendung. Für die Probanden 3 und 4 ergeben sich Regressionsgeraden mit hoher Streuung ihrer Werte-Punkte der nichtgestrahlten 20 Proben und entsprechend niedrigem Weibullmodul (s. Tabelle 10). Ein hoher Weibullmodul ist erwünscht, da er eine hohe Werkstoffhomogenität bedeutet. Gefügedefekte sind dabei gleichmäßig über das Keramikvolumen verteilt [46]. Je weiter die einzelnen logarithmierten Haftverbundwerte von der Ausgleichsgeraden entfernt sind, desto geringer ist die Steigung dieser Geraden (s. Abbildung 62 und 63) und umso schwieriger, die Versagenswahrscheinlichkeit der Probengruppe zu bestimmen, da diese starke Streuung nicht dem zugrunde gelegten Verfahren (Weibull-Statistik) entspricht [45].

Einen Weibull-Modul von 2,51 des Probanden 3 kann man mit den dokumentierten zahlreichen Lufteinschlüssen beim Verarbeiten der Keramikmasse erklären. Eine niedrige Werkstoffhomogenität ist bei Proband 4 mit der starken Ergebniss-Streuung im Haftverbund durch die teilweise veränderte Verarbeitungspräzision ohne Sehhilfe und damit das Zustandekommen interner Materialgütefehler in Zusammenhang zu bringen. Trotz dieser Fehlerverteilung resultiert die Arbeitshaltung (s. Kapitel 2.4.2) des Probanden 4 insgesamt in der höchsten Weibullfestigkeit (s. Tabelle 10) für die nichtgestrahlten und sandgestrahlten Proben. Bei den Probanden 1, 2 und 5 fällt auf, dass deren Werte-Punkte dichter an der Ausgleichsgeraden zusammenliegen (s. Abbildungen 60, 61 und 64). Hier kann man eine genauere Vorhersage für die Versagenswahrscheinlichkeit für beide Probengruppen (sandgestrahlt und nichtgestrahlt) treffen [45]. Geradensteigung und Punktestreuung der sandgestrahlten und nichtgestrahlten Prüfkörper unterscheiden sich hierbei kaum.

Der Parameter Sandstrahlen wirkt sich zwar auf den Weibullmodul mit höherer Verblendhomogenität der Proben  $n = 1-10$  aller Probanden aus (s. Tabelle 10), stimmt jedoch nicht mit einer (im Anhang) berechneten höheren Weibullfestigkeit für jeden Probanden überein. Die oben erwähnte Studie [31] erhielt bei der Anwendung der Weibull-Statistik auf die Haftverbundwerte einen minimal geringeren Weibullmodul für die sandgestrahlten Proben als für die nichtgestrahlten, auch die Weibullfestigkeit beider Gruppen unterschied sich kaum [31]. Betrachtet man die Statistik-Berechnung nach Weibull der vorliegenden Arbeit für die sandgestrahlten Proben der Probanden 2 und 3, so liegen ihre Festigkeitswerte niedriger als die der nichtgestrahlten Proben bei höherem Weibullmodul der sandgestrahlten Verblendproben.

Somit hat der Parameter des Sandstrahlprozesses auch hier keinen nennenswerten Einfluss auf den Haftverbund. Die Untersuchungen der Verblendprobengüte und -geometrie (s. o.) wurden aus diesem Grund mit den nichtgestrahlten Probekörpern durchgeführt.

Das Hauptaugenmerk wurde in dieser Studie auf den Einfluss des unterschiedlichen zahntechnischen Vorkenntnisstands des Probandenkollektivs auf den Haftverbund zwischen Verblend- und Zirkoniumdioxidkeramik gerichtet.

#### **4.4 Bewertung der Gebrauchsanleitung**

Die Arbeitsanleitung (s. Kapitel 2.4.2) enthält die Hersteller- und ISO-Normangaben um einheitliches Verarbeiten zu erreichen.

In der zahntechnischen Ausbildung lernt man das genaue Einhalten von vorgegebenen Arbeitsschritten für eine größtmögliche Vermeidung von Fehlern, die sich in die meisten zahntechnischen Herstellungsprozesse schnell einschleichen können und sich negativ auf den Langzeiterfolg der

zahntechnischen Restauration auswirken. Die Laien-Probanden der vorliegenden Studie bekamen im Vorfeld etwas Zeit sich mit den Materialien, den Instrumenten und der Verarbeitungsanleitung vertraut zu machen. Letztere wurde eine Woche vor Beginn der Probenherstellung ausgehändigt.

Ein Zahntechniker ist in der Regel erst mit einigen Jahren Berufserfahrung in der Lage, ästhetisch ansprechenden Zahnersatz anzufertigen und dabei die korrekte Verarbeitungskette der Materialien und Geräte präzise einzuhalten.

Im Bereich des keramischen Zahnersatzes ist ein optisch ansprechendes Ergebnis zusammen mit einer einwandfreien Funktion Grundvoraussetzung. Das nötige Rüstzeug für die dentalkeramische Verarbeitung als höchster Schwierigkeitsgrad erlernt man im letzten Lehrjahr der Zahntechnikerausbildung [47]. Erst die individuellen Situationen und Anforderungen des späteren Berufsalltags bringen die Weiterentwicklung in diesem anspruchsvollen Bereich des Zahntechnikhandwerks.

Da die Dentalkeramik besonders misserfolgsanfällig ist, ließ der Verfasser dieser Studie zahntechnisches Wissen mit in die Verarbeitungsanleitung für die Probanden einfließen. Die richtige Konsistenz der Masse, ihre gleichmäßige Applikation in die Formschablone und der richtige Brennvorgang beispielsweise sind essentiell für Keramikmassen (s. Kapitel 2.4.2) und sollen dem Anwender bekannt sein.

#### **4.5 Vorgehensweise zur Verarbeitung der Verblendkeramik**

Das Keramikpulver wird mit Modellierflüssigkeit angemischt um einen guten Zusammenhalt der Pulverpartikel zu erhalten. Durch leichtes Klopfen auf die Tischfläche oder Riffeln mit einem geeigneten Instrument sammelt sich überschüssige Flüssigkeit an der Oberfläche und kann mit einem Kosmetiktuch oder Fließpapier abgesaugt werden [37]. Auf diese Weise verdichten sich die Keramikpartikel, die Masse zerfließt nicht mehr und lässt eine anatoforme

Zahnkronenmodellation zu. Um für die Krone die individuelle Patientenzahnfarbe nachzuempfinden werden verschiedene, mehr oder weniger opaque und transluzente Keramikmassen im Schichtverfahren auf das Zirkoniumdioxidgerüst aufgetragen und im Keramikofen gesintert.

Proband 1 ging als Zahntechniker beim Aufbrennen mit der Verblendmasse so vor, als handele es sich um zu verblendende Zahnersatzkronen, stellte jedoch fest, dass es nicht ganz vergleichbar ist: Durch die Verblendvorrichtung nach Schwickerath erhält man eine definierte Fläche mit vorgegebenen Maßen, trägt also auf jedes Zirkoniumdioxidplättchen ungefähr eine gleich große Verblendkeramikportion auf um mit zwei Dentinbränden eine Verblenddicke von 1,1 mm zu erhalten (wie von der ISO-Norm 9693 gefordert). Um der Festigkeit der Zirkoniumdioxidverblendkeramik Rechnung zu tragen, darf die Schichtstärke einer zahntechnischen Verblendkrone maximal 1,5 mm betragen [48]. Das bedeutet für die Kronenästhetik, dass Platz-, Form- und Lichtverhältnisse in der Mundhöhle für diese Verblenddicke bedacht werden müssen.

Für die Dentinschichtung einer 10er-Gruppe Verblendproben benötigte Proband 1 maximal ca. 15 Minuten, für ein Plättchen somit ungefähr 1,5 Minuten. Bei einer Zahnkrone gilt es, soviel Masse aufzutragen, bis ein biomimetisches Ergebnis in korrektem Kontakt zum Nachbarzahn und der Kauebene geschaffen ist. Das ist nicht nur zeitintensiver (für eine Einzelkrone benötigt man mindestens 20 Minuten), der Zahntechniker muss zusätzlich den Brennschwund dentalkeramischer Massen (ca. 40 Volumen-%) einkalkulieren. Für eine richtige Minimierung des Keramikbrennschwundes durch Volumenänderung der Dentalkeramikmasse ist die zahntechnische Vorkenntnis des ausreichenden Verdichtens der Keramikpulverpartikel durch richtiges Portionieren und Entfernen von überschüssiger Modellierflüssigkeit von Vorteil [2]. Proband 1 arbeitete ohne Riffeln, hatte aber aufgrund der Verarbeitungserfahrung kaum überschüssige Flüssigkeit. Mit der sehr flüssigen Masse voller Lufteinschlüsse sowie dem langen Austrocknen vor dem

Brennvorgang lassen sich die geringen Haftverbundwerte des Probanden 3 erklären im Vergleich zu den Probanden 2 und 4, die beide nach der Gebrauchsanleitung arbeiteten.

Bei Proband 5 führen Abweichungen von der klassischen Verblendkeramikverarbeitung wie große Zeitintervalle zwischen den Bränden zu minderen Werten, mithilfe des zahntechnischen Vorwissens erreichte dieser jedoch eine geringe Standardabweichung, also konstantere Haftverbundwerte.

Proband 4 war mit dem Auftragen von Keramik auf 10 Proben etwa 45 Minuten, Proband 2 eine Stunde und Proband 3 eine halbe Stunde beschäftigt. Das Beschicken eines Zirkoniumdioxidplättchens mit Keramikmasse gibt das Gestalten einer Zahnkrone aus Keramik nicht annähernd wieder (s. o.). Ein Laie würde für die Herstellung einer Keramikkrone eventuell mehr Zeit benötigen, als die Probanden dieser Studie für die Verblendung der 10 Probenplättchen mit vorgegebener Form und ohne schleiftechnische Korrekturen zwischen den einzelnen Bränden, wie es bei der Kronengestaltung oft nötig ist. Denkbar wären die Verblendung anatomischer Zahnkronen zur erweiterten Untersuchung von Haftverbundergebnissen im vollkeramischem System.

Durch mehr oder weniger exaktes Einhalten der Verarbeitungsanleitung des Autors war es allen Probanden in dieser Studie möglich, gute Ergebnisse zu erzielen, selbst den Laien.

Es konnten sogar die Mindestanforderungen der Norm-Bestimmung eingehalten werden. Dies ist auf die in der Gebrauchsanleitung enthaltenen, wichtigen Parameter zur Verarbeitung von Verblendkeramik zurückzuführen, welche weder in der ISO-Norm 9693 (s. Kapitel 2.4.2) noch von den Herstellern für Verblendkeramikmassen angegeben werden.

Daher sind die Angaben in der ISO-Norm 9693 eher nicht ausreichend zur Herstellung von Prüfkörpern für das vollkeramische System.

Basierend auf zahntechnischer Erfahrung sollten genaue Angaben zum Verblendvorgang in der Norm enthalten sein. Vom anfänglichen Anmischen der Keramikmasse bis hin zum zeitnahen Brennvorgang.

Für die Herstellung von Vollkeramik sollte als Voraussetzung die zahntechnische Vorkenntnis eingehalten werden, da die Erfahrung im Umgang mit dem Werkstoff und auch genaue materialspezifische Verarbeitungsvorgaben bessere Ergebnisse garantieren [49].

In der vorliegenden Arbeit wurden verschiedene Studien genannt, die nach Anwendung des Schwickerath-Tests Haftverbundergebnisse beschreiben, welche im Bereich der 25-28 MPa liegen (s. Tabelle 11). Die Messwerte für den Haftverbund der Prüfkörper der 5 Testpersonen aus dieser Studie übertreffen alle den von der ISO-Norm geforderten Mindestwert von 25 MPa. Es wäre daher zu überlegen, ob der Mindestwert für die Vollkeramik von 25 auf 30 MPa erhöht werden könnte in Zusammenhang mit Haftverbund-Untersuchungen an anatomisch verblendeten Zahnkronen.

## 5 Zusammenfassung

Einleitung: Zirkoniumdioxid ist für zahnmedizinische Restaurationen zum heutigen Standardwerkstoff geworden, besonders für die fest zementierbare Kronen- und Brückentechnik.

Zu dieser Erfolgsentwicklung trug nicht nur die hohe Biokompatibilität des Materials bei, sondern auch eine im Vergleich zur Metallkeramik verbesserte Ästhetik. Für die Verbundfestigkeit im vollkeramischen System, die für den klinischen Langzeiterfolg entscheidend ist, existierte zu Beginn der Studie keine standardisierte Prüfmethode.

Aufgabenstellung: Ziel dieser Studie war es festzustellen, ob sich die unterschiedliche zahntechnische Erfahrung von 5 Testpersonen bei der Anwendung der ISO-Norm 9693 zur Prüfkörperherstellung (zum Zeitpunkt der Prüfkörperherstellung für das Metallkeramiksystem standardisierte Prüfnorm) auf die Haftverbundergebnisse im vollkeramischen System auswirkt.

Material und Methoden: Um ein einheitliches Vorgehen bei der Prüfkörperherstellung zu gewährleisten, arbeitete jeder Proband nach den Angaben der ISO-Norm 9693 und zusätzlicher Verblendanleitung. Auch das Verblendinstrumentarium lag für alle Testpersonen identisch vor.

Jeder Proband brannte auf 30 Zirkoniumdioxidplättchen (Nacera Pearl 1 Doceram MC) mit Hilfe einer Formschablone in Anlehnung an die ISO-Norm 9693 eine Verblendkeramik (ZI-F Creation W. Geller) auf. Jeweils 10 Proben wurden vorher mit Aluminiumdioxid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  110  $\mu\text{m}$ , 2 bar) abgestrahlt.

Alle 30 Probeplättchen wurden dem 3-Punkt-Biegetest nach Schwickerath mit zusätzlicher Rissbeginnaufnahme durch ein Mikrofon unterzogen und danach mikroskopisch untersucht. Des Weiteren wurde eine statistische Auswertung nach Weibull erstellt.

Ergebnisse: alle Probekörper der 5 Probanden erfüllten den von der ISO-Norm 9693 vorgegebenen Mindestwert von 25 MPa für den Haftverbund.

Der Sandstrahlvorgang hatte keine signifikante Auswirkung auf die Ergebnisse. Die Probanden ohne zahntechnische Vorkenntnisse (P2, P3, P4) erreichten niedrigere Kraffteinzelnwerte im Schwickerath-Test. Daraus resultierend ergab

sich bei ihnen ein niedrigerer Haftverbund zwischen Verblend- und Oxidkeramik als bei dem Probanden (P1) mit langer Dentalkeramik Erfahrung, dessen Werte am höchsten lagen. Die Verbundergebnisse von 2 Probanden (P2 und P4) ohne zahntechnische Erfahrung erreichten annähernd die Verbundwerte des Probanden (P1) mit Verblenderfahrung. Die Weibullmodulwerte der Probanden P1, P2 und P5 stehen für eine hohe Homogenität im Materialgefüge.

Der beobachtete Bruchmodus aller Proben ist zu 100% adhäsiv.

Schlussfolgerung: Obwohl alle 5 Probanden die gleichen Arbeitsanweisungen (Vorgehen nach ISO-Norm 9693 und Verblendanleitung) erhielten, konnten sehr unterschiedliche Arbeitshaltung und Vorgehensweisen festgestellt werden. Eine hohe Standardabweichung der Medianwerte bei den Probanden P2 - P5 für den Haftverbund ist als ein Indiz für Unterschiede im Herstellungsprozess zu werten.

Eine Probekörperherstellung, die ausschließlich auf den in der ISO-Norm 9693 enthaltenen Angaben basiert, ohne zusätzliche zahntechnische Verblendanleitung, hätte bei den Testpersonen ohne zahntechnische Erfahrung evtl. nicht den ISO-Mindestwert für den Haftverbund erbracht.

Deshalb sollten einzelne, für die Verblendkeramik essentielle Verblendschritte der ISO-Norm hinzugefügt werden. Fehlende zahntechnische Erfahrung kann durch solche Anweisungen kompensiert werden und zu einer Qualitätssteigerung in der Prüfkörperherstellung führen.

## 6 Schlussfolgerung

Durch akribisches Arbeiten und sorgfältiges Einhalten einer Verarbeitungsvorlage gelangten alle 5 Probanden an die Mindestanforderungen einer Normbestimmung.

Mit zahntechnischem Vorwissen konnten jedoch höhere Verbundfestigkeitswerte erreicht werden. Ohne dieses Vorwissen wurde eine zum Teil schlechtere Verblendqualität erreicht.

Man kann daraus ableiten, dass für die Verarbeitung von Vollkeramik zahntechnische Verblendkenntnisse Voraussetzung sein sollten.

Die Gebrauchsanleitung des Verfassers der vorliegenden Arbeit, die die Grundlage für die Probenherstellung durch die Probanden war, enthält nicht nur Herstellerangaben und Wissen aus der Werkstoffkunde- und Zahntechnikliteratur, sondern vor allen Dingen auch zahntechnisches Erfahrungswissen.

Es waren solche in der ISO-Norm nicht enthaltene Informationen zum zahntechnischen Vorgehen, die den unbedarften Testpersonen dieser Studie möglicherweise zu mäßig bis guten Ergebnissen verhalfen.

Es sind als Vorschlag folgende ausschlaggebende Parameter zu nennen, die der ISO-Norm 9693 (Teil 1 und 2 der Ausgabe 2016) hinzuzufügen wären:

- Keramikmasse beim Modellieren durch Riffeln verdichten, damit Pulverteile zusammenfließen
- Überschüssige Flüssigkeit absaugen
- Lufteinschlüsse beim Anmischen und Schichten vermeiden
- Zügiges Brennen, ohne die Massen lange vorher austrocknen zu lassen

## 7 Literaturverzeichnis

[1] Groten, M. : *Der optische Vorsprung; Ästhetische Frontzahnrestaurationen*; ZWL 05 (2006): 00 - 03.

[2] Marxkors, R./ Meiners, H./ Geis-Gerstorfer, J. : *Taschenbuch der zahnärztlichen Werkstoffkunde; Vom Defekt zur Restauration*. Deutscher Zahnärzte Verlag Auflage (2008).

[3] Ramos, Carla Müller, et al.: *Bond strength and Raman analysis of the zirconia-feldspathic porcelain interface*. The Journal of prosthetic dentistry (2014): 886 - 894.

[4] Kulis, A.: *Verbundfestigkeiten verschiedener dentaler Zirkoniumdioxid-Gerüstmaterialien und Verblendkeramiken*. Med. dent. Diss. Universität Freiburg (2006).

[5] Schmitter, M.: *Chipping bei Zirkoniumdioxid-gestütztem Zahnersatz*. Wissen kompakt 4.4 (2010): 25 - 34.

[6] Koutayas, S. et al.: *Zirkonoxid in der Zahnmedizin: Teil 2. Evidenzbasierter klinischer Durchbruch*. The European Journal of Esthetic Dentistry. Jahrgang 4, Nr. 4, (2009).

[7] DIN EN ISO 9693-2: 2:2016: *Zahnheilkunde - Kompatibilitätsprüfung - Teil 2: Keramik-Keramiksysteme*. Beuth, Berlin (2016).

[8] Slotosch, S. C.: *In-vitro-Untersuchungen zum Einfluss von mechanischen Oberflächenbearbeitungsverfahren auf den Verbund von Zirconia-TZP zu ausgewählten Verblendkeramiken*. Diss. Medizinische Fakultät Charité-Universitätsmedizin Berlin (2010).

[9] Wehnert, L., Slotosch, S. C. et al.: *Einfluss von mechanischen Oberflächenbearbeitungsverfahren auf den Verbund von Y-TZP zu vier Verblendkeramiken*. Quintessenz Zahntechnik (2011); 37(3): 342 - 356.

- [10] Aboushelib, M. et al.: *Microtensile bond strength of different components of core veneered all-ceramic restorations*. Dental Materials (2005); 984-991.
- [11] Kaddick, C., Blömer, W.: *Sinn und Grenzen von Prüfnormen*. Orthopädie (2014), 43: 511 - 514.
- [12] Tinschert, J./Natt, G. (Hrsg.): *Oxidkeramiken und CAD/CAM-Technologien; Atlas für Klinik, Labortechnik und Werkstoffkunde*. Deutscher Zahnärzte Verlag Auflage (2007).
- [13] Papanagiotou, H., Morgano, S., Giordano, R. et al.: *In vitro evaluation of low-temperature aging effects and finishing procedures on flexural strength and structural stability of Y-TZP dental ceramics*. J. Prosthet. Dent. (2006); 96: 154-5464.
- [14] Guazzato, M., Quach, L., Albakry, M. et al.: *Influence of surface and heat treatments on the flexural strength of Y-TZP dental ceramic*. J. Dent. (2005); 33: 9-18.
- [15] Fokas, G.: *Influence of the surface and heat treatment on the flexural strength and reliability of Y-TZP dental ceramic*. Diss. Medizinische Fakultät der Universität Tübingen (2010).
- [16] Geis-Gerstorfer, J.: *Probleme bei der klinischen Bearbeitung von keramischen Restaurationen und die Auswirkungen auf die Stabilität*. ZWT (2013) Georg Thieme Verlag; 122 (9): 420-430.
- [17] Abels, F.: *Die klinische Bewertung von vollkeramischen drei- und viergliedrigen Brücken nach 36 Monaten*. Univ. Erlangen, Nürnberg, Diss. (2010).
- [18] Groten, M., Walter, C., Klink, A.: *Vollkeramische Restaurationen- Teil 1 Gerüstkeramiken- ihre klinische Anwendung und Stand der Technik*. ZBW6 (2006) Fortbildung 36 - 41.
- [19] Reinshagen, J.: *Die vollanatomische Zirkonoxidrestauration*. Zahntech. Mag. 16,6 (2012); 356-363.

[20] Al-Amleh, B., Lyons, K. et al.: *Clinical trials in zirconia: a systematic review*. Journal of oral rehabilitation 37.8 (2010): 641 - 652.

[21] Dierkes, S., Busemann, S. et al.: *Einfluss der Oberflächen-aktivierung auf den Haftverbund von Verblendkeramik auf Zirkonoxid*. Quintessenz Zahntech. (2014); 40(8): 966 - 978.

[22] Goldammer, C.: *Einfluss der Oberflächenbearbeitung auf die Biegefestigkeit von verblendetem Zirkoniumdioxid*. Diss. Medizinische Fakultät der Universität Tübingen (2012).

[23] Frankenberger, R., Kern, M.: *Feine Formsache*. Arbeitsgemeinschaft für Keramik e.V. (2007).

[24] Fischer, J. et al.: *Effect of Zirconia Surface Treatments on the shear strength of zirconia/ veneering ceramic*. Dent Mater J. (2008); 27: 448 - 454.

[25] Erbe, C. O.: *Standards und Normen sind der Kompass der Medizintechnik*. VDE Med Tech Expertenbeiträge, Ausgabe 1, April (2014).

[26] Hartlieb, B., Kiehl, P. et al.: *Normung und Standardisierung, Grundlagen*. Beuth Verlag (2009), Herausgeber DIN.

[27] Craig, R. G., Powers, J. M. et al.: *Zahnärztliche Werkstoffe, Eigenschaften und Verarbeitung*. Elsevier Verlag Urban & Fischer (2008).

[28] Eichner, K., Kappert, H. F.: *Zahnärztliche Werkstoffe und ihre Verarbeitung. Band 1. Grundlagen und Verarbeitung*. Thieme Verlag Auflage (2005).

[29] Jacobs, M.: *Vergleichende Untersuchung zum Haftverbund zwischen unterschiedlichen Verblendkeramiken auf Metall- bzw. Keramikgerüsten in vitro auf einer Frontzahnkrone mittels des VOSS-Versuchs*. Diss. Medizinische Fakultät Charité-Universitätsmedizin Berlin (2013).

[30] Hobkirk, J.: *Internationale Normen in der Zahnheilkunde*. Quintessenz Zahntech (2015); 41(3):361 - 366.

[31] Schille, Ch., Wieland, K., Geis-Gerstorfer, J.: *Influence of sandblasting of zirconia veneered with Zirox on bond strength and static fatigue behaviour by Schwickerath-Test*. Biomed Tech (2012); 57 (Suppl.1).

[32] Kosyfaki, P., Swain, M. V. et al.: *Verbundfestigkeit verschiedener Verblendkeramiken zu Zirkonoxid*. Dtsch Zahnärztl Z (2013); 68: 678 - 694.

[33] Spintzyk, S., Wölz, G., Geis-Gerstorfer, J.: *Ein System zur Herstellung reproduzierbarer Probekörper*. Quintessenz Zahntech. 38 (2012), Nr.5; 542-549.

[34] Zahnfabrik Rauter, H. GmbH & Co.KG Bad Säckingen: *Gebrauchsanleitung Vita Vacumat 40*. (2004); 17-19.

[35] DIN EN ISO 6872: 2015-11: *Zahnheilkunde - Keramische Werkstoffe*. Deutsche Fassung (2015).

[36] Zugfil, H., Schille, Ch., Geis-Gerstorfer, J.: *Influence of different parameters during polishing: a pilot study with 10 dental technicians*; International Poster Journal (2011), Heft 2.

[37] Hohmann, A., Hielscher, W.: *Zahntechnik, Lernfeld 9 Keramik, CAD/CAM*. Quintessenz Verlag (2012).

[38] Mall, G., Mall, H.: *Sicherheit und Gesundheitsschutz für Zahntechniker. Tipps für einen gesundheitsverträglichen Zahntechnikerarbeitsplatz*. 2. Auflage. Dortmund: (2006).

[39] Wissenschaftliche Stellungnahme Stand 5/89: Deutsche Gesellschaft für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde DGZMK: *Unterstützende Sehhilfen in der Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde*. DZZ 53 (1989).

[40] Bundesarbeitsblatt 7 - 811979: *Arbeitsstätten-Richtlinien ASR 7/3 Künstliche Beleuchtung*.

[41] DIN 67505: *Beleuchtung zahnärztlicher Behandlungsräume und zahntechnischer Laboratorien*. Beuth, Berlin-Köln (1986).

[42] Terni, Y., Sato, K. et al.: *Compatibility of Ce-TZP/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanocomposite frameworks and veneering porcelains*. Dental Mater Journal (2013); 32(5): 839 - 846.

[43] Tada, K., Sato, T. et al.: *Influence of surface treatment on bond strength of veneering ceramics fused to zirconia*. Dental Mater Journal (2012); 31(2): 287 - 296.

[44] Aboushelib, M. N., Kleverlaan, C. J. et al.: *Effect of zirconia type on ist bond strength with different veneer ceramics*. Journal of Prosthodontics 17 (2008): 401 - 408.

[45] Rowe, P.: *Statistik für Mediziner und Pharmazeuten*. Wiley-VCH Verlag Auflage (2012).

[46] Dr. Pagliosa, C.: *Mechanisches Verhalten von Keramik, 4.2 Weibull-Statistik*.

[47] Hohmann, A./Hielscher, W.: *Lehrbuch der Zahntechnik Band III*. Quintessenz Bibliothek Auflage (2005).

[48] Kern, M. Bauer, H.-G., Kimmich, H.: *Das 1x1 der Zirkonoxid-Behandlung*. Zahntech Mag 14 (2010): 28 - 32.

[49] Niebuhr, geb. Rapp, C. C.: *Einfluss verschiedener Sinterparameter auf Farbe, Festigkeit und Oberflächengüte dentaler Verblendkeramiken*. Dissertation Universität Tübingen, (2015).

## 8 Tabellen- und Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: gelb markiertes Rechteck: geschwärzte Abstrahlflächen auf dem Zirkoniumdioxidsubstrat.....	21
Abbildung 2: Kalibrierung des Keramikofens.....	25
Abbildung 3a: Arbeitsinstrumente für die Probenherstellung.....	26
Abbildung 4: Verblendete Proben auf dem Brennträger mit Reihenfolge a - j...26	
Abbildung 5: Proben auf der Brennmuffel vor Brennstart bei offenem Keramikofen .....	28
Abbildung 6: Schieblehre.....	34
Abbildung 7: Stereomikroskop mit Fotoaufsatz und Probenträger .....	35
Abbildung 8: Foto vom Versuchsaufbau in der Universalprüfmaschine mit Mikrofon als Übersichtsaufnahme .....	38
Abbildung 9: Detailaufnahme des Mikrofons unter der Biegevorrichtung.....	38
Abbildung 10: Proband 1 Probe 1 d, 1000 x.....	41
Abbildung 11: Proband 1 Probe 1 d, 5000 x.....	41
Abbildung 12: Proband 2 Probe 1 d, 1000 x.....	41
Abbildung 13: Proband 2 Probe 1 d, 5000 x.....	41
Abbildung 14: Proband 3 Probe 1 d, 1000 x.....	42
Abbildung 15: Proband 3 Probe 1 d, 5000 x.....	42
Abbildung 16: Proband 4 Probe 1 d, 1000 x.....	42
Abbildung 17: Proband 4 Probe 1 d, 5000 x.....	42
Abbildung 18: Proband 5 Probe 1 d, 1000 x.....	43
Abbildung 19: Proband 5 Probe 1 d, 5000 x.....	43
Abbildung 20: Substratoberfläche nicht sandgestrahlt, 1000 x.....	44
Abbildung 21: Substratoberfläche nicht sandgestrahlt, 5000 x.....	44
Abbildung 22: Mittelwert von Ra der sandgestrahlten 10 Proben von jedem Probanden und der 20 nichtgestrahlten (NS) als Referenz.....	45
Abbildung 23: Kraffteinzelwerte Proband 1: lila Werte n = 10 SB (sandgestrahlt), blaue Werte n = 20 NS (nicht gestrahlt) .....	46
Abbildung 24: Kraffteinzelwerte Proband 2: lila n = 10 SB, blau n = 20 NS .....	47
Abbildung 25: Kraffteinzelwerte Proband 3: lila n = 10 SB, blau n = 20 NS .....	47
Abbildung 26: Kraffteinzelwerte Proband 4: lila n = 10 SB, blau n = 20 NS .....	48
Abbildung 27: Kraffteinzelwerte Proband 5: lila n = 10 SB, blau n = 20 NS .....	48
Abbildung 28: Ermittelte Verbundfestigkeit aller 30 Proben von Proband 1 in Abhängigkeit der Bearbeitung; n = 1 - 10 SB, n = 11 - 30 NS.....	50
Abbildung 29: Ermittelte Verbundfestigkeit aller 30 Proben von Proband 2 in Abhängigkeit der Bearbeitung; n = 1 - 10 SB, n = 11 - 30 NS.....	50
Abbildung 30: Ermittelte Verbundfestigkeit aller 30 Proben von Proband 3 in Abhängigkeit der Bearbeitung; n = 1 - 10 SB, n = 11 - 30 NS.....	51
Abbildung 31: Ermittelte Verbundfestigkeit aller 30 Proben von Proband 4 in Abhängigkeit der Bearbeitung; n = 1 - 10 SB, n = 11 - 30 NS.....	51
Abbildung 32: Ermittelte Verbundfestigkeit aller 30 Proben von Proband 5 in Abhängigkeit der Bearbeitung; n = 1 - 10 SB, n = 11 - 30 NS.....	52
Abbildung 33: Berechnete Verbundfestigkeiten für jeden Probanden P 1 - 5: SB = sandgestrahlt (n = 10), NS = nicht gestrahlt (n = 20) .....	53

Abbildung 35: Mittelwerte und Standardabweichung der mikroskopisch vermessenen Verblendlängen der Probanden 1 - 5.....	57
Abbildung 36: Mittelwert und Standardabweichung der mikroskopisch gemessenen Verblendicken der Probanden 1 - 5.....	57
Abbildung 37: Mittelwert + Standardabweichung der gemessenen Verblendbreiten von P 1 - 5.....	59
Abbildung 38: Mittelwert + Standardabweichung der gemessenen Verblendicken von P 1 - 5.....	60
Abbildung 39: Mittelwert + Standardabweichung der gemessenen Verblendlängen P 1 - 5.....	60
Abbildung 40: Abweichung der mikroskopischen Messdaten (l = Probenlänge, d = Probendicke) von der ISO-Norm (blaue Linie).....	62
Abbildung 41: Abweichung der Messdaten mit Schieblehre (b = Probenbreite, d = Probendicke, l = Probenlänge) von der ISO-Norm (blaue Linie).....	63
Abbildung 42: Verbundfestigkeit beim 1. akustischen Signal Proband 1, Proben n = 1 - 30.....	64
Abbildung 43: Verbundfestigkeit beim 1. akustischen Signal Proband 2, Proben n = 1 - 30.....	64
Abbildung 44: Verbundfestigkeit beim 1. akustischen Signal Proband 3, Proben n = 1 - 30.....	65
Abbildung 45: Verbundfestigkeit beim 1. akustischen Signal Proband 4 Proben n = 1 - 30.....	65
Abbildung 46: Verbundfestigkeit beim 1. akustischen Signal Proband 5, Proben n = 1 - 30.....	66
Abbildung 47: VERBUNDFESTIGKEIT Probanden 1 - 5: graue Datenreihe: nach ISO sandgestrahlt (SB), blaue Datenreihe: nach ISO nicht gestrahlt (o. SB), türkisfarbene Datenreihe: beim 1. akustischen Signal sandgestrahlt (SB), lilafarbene Datenreihe: beim 1. akustischen Signal nicht gestrahlt (o. SB).....	66
Abbildung 48: oberes Diagramm Kraft-Weg-Diagramm Probe 1 Proband 1 und im unteren Diagramm das dazugehörige akustische Signal der Probe 1 mit Rissbeginn bei $F_{max}$ .....	68
Abbildung 49: oberes Diagramm Kraft-Weg-Diagramm Probe 10 Proband 5 und im unteren Diagramm das dazugehörige akustische Signal der Probe 10 mit Rissbeginn vor $F_{max}$ .....	69
Abbildung 50: Proband 1 Probe 15: gerade Oberfläche mit symmetrischer Verblendform.....	71
Abbildung 51: Proband 1 Probe 30: mittige Kuhlenbildung.....	71
Abbildung 52: Proband 2 Probe 13: leichte mittige Kuhlenbildung.....	71
Abbildung 53: Proband 2 Probe 17: gleichmäßige Verblendform.....	71
Abbildung 54: Proband 3 Probe 25: auf der rechten Seite beginnende Ablösung von der Substratbasis.....	72
Abbildung 55: Proband 3 Probe 26: annähernd gleichmäßige Verblendung....	72
Abbildung 56: Proband 4 Probe 11: von rechts beginnende Ablösung der Verblendung vom Substrat bei ungleichmäßiger Verblendform.....	72
Abbildung 57: Proband 4 Probe 30: annähernd gleichmäßige Verblendform....	72
Abbildung 58: Proband 5 Probe 11: gleichmäßige Verblendform.....	72

Abbildung 59: Proband 5 Probe 13: mittige Kuhlenbildung bei unregelmäßiger Verblenddicke rechts .....	72
Abbildung 60: Weibullmodul 5,89 mit Regressionsgeraden Proband 1 der nichtgestrahlten Proben.....	73
Abbildung 61: Weibullmodul 5,25 mit Regressionsgeraden Proband 2 der nichtgestrahlten Proben.....	74
Abbildung 62: Weibullmodul 2,51 mit Regressionsgeraden Proband 3 der nichtgestrahlten Proben.....	74
Abbildung 63: Weibullmodul 2,47 mit Regressionsgeraden Proband 4 der nichtgestrahlten Proben.....	75
Abbildung 64: Weibullmodul 4,93 mit Regressionsgeraden Proband 5 der nichtgestrahlten Proben.....	75
Abbildung 65: Regressionsgeraden y1 für die sandgestrahlten und y2 für die nichtgestrahlten Proben für Proband 1 .....	76
Abbildung 66: Regressionsgeraden y1 für die sandgestrahlten und y2 für die nichtgestrahlten Proben für Proband 2.....	77
Abbildung 67: Regressionsgeraden y1 für die sandgestrahlten und y2 für die nichtgestrahlten Proben für Proband 3.....	77
Abbildung 68: Regressionsgeraden y1 für die sandgestrahlten und y2 für die nichtgestrahlten Proben für Proband 4.....	78
Abbildung 69: Regressionsgeraden y1 für die sandgestrahlten und y2 für die nichtgestrahlten Proben für Proband 5.....	78
Tabelle 1: Übersicht über einige Verblendkeramiken für Zirkonoxid .....	12
Tabelle 2: Brennparameter für ZI-F Geller Creation .....	27
Tabelle 3: Probandenkollektiv.....	29
Tabelle 4: Zusammenfassung der Verblendgüte nach optischer Auswertung ..	54
Tabelle 5: Übersicht zur Qualität der ausgewählten Proben für jeden Probanden mikroskopisch betrachtet.....	55
Tabelle 6: MW Verblendlänge und -dicke (mikroskopisch gemessen) aller Proben (n = 1 - 30) und ISO-Norm .....	58
Tabelle 7: Abweichungen der mikroskopisch gemessenen Probenfläche und – dicke in % aller Proben.....	58
Tabelle 8: Mittelwerte MW nach Messung der Verblendbreiten (b), -dicken (d) und –längen (l) der Probanden P1 - 5 und ISO-Norm .....	61
Tabelle 9: Darstellung der prozentualen Abweichungen der taktilen Messwerte von der ISO-Norm .....	61
Tabelle 10: Weibullfestigkeit und -modul der Probanden P1 - 5 der nichtgestrahlten (NS) und der sandgestrahlten (SB) Proben .....	79
Tabelle 11: Übersicht über einige Studien mit Verwendung des Schwickerath-Tests.....	86

## 9 Anhang

Der prozentuale Unterschied der mikroskopisch vermessenen Verblendungen zu den geforderten ISO-Norm-Werten wurde mit Hilfe des Dreisatzes errechnet:

Proband 1	$8 \text{ mm}^2 = 100 \%$	$1,1 \text{ mm} = 100 \%$
	$1 \text{ mm}^2 = 12,5 \%$	$1 \text{ mm} = 90,9 \%$
	$9,63 \text{ mm}^2 = 120 \%$	$1,32 \text{ mm} = 119 \%$
Proband 2	$8 \text{ mm}^2 = 100 \%$	$1,1 \text{ mm} = 100 \%$
	$1 \text{ mm}^2 = 12,5 \%$	$1 \text{ mm} = 90,9 \%$
	$7,55 \text{ mm}^2 = 94 \%$	$1,05 \text{ mm} = 95 \%$
Proband 3	$8 \text{ mm}^2 = 100 \%$	$1,1 \text{ mm} = 100 \%$
	$1 \text{ mm}^2 = 12,5 \%$	$1 \text{ mm} = 90,9 \%$
	$9,18 \text{ mm}^2 = 114 \%$	$1,17 \text{ mm} = 106 \%$
Proband 4	$8 \text{ mm}^2 = 100 \%$	$1,1 \text{ mm} = 100 \%$
	$1 \text{ mm}^2 = 12,5 \%$	$1 \text{ mm} = 90,9 \%$
	$8,02 \text{ mm}^2 = 100 \%$	$1,03 \text{ mm} = 94 \%$
Proband 5	$8 \text{ mm}^2 = 100 \%$	$1,1 \text{ mm} = 100 \%$
	$1 \text{ mm}^2 = 12,5 \%$	$1 \text{ mm} = 90,9 \%$
	$8,44 \text{ mm}^2 = 105 \%$	$1,09 \text{ mm} = 99 \%$

Der prozentuale Unterschied der taktil gemessenen Verblendungen 1-30 jedes Probanden zu den geforderten ISO-Norm-Werten wurde mit Hilfe des Dreisatzes errechnet:

Proband 1	$3 \text{ mm} = 100 \%$	$1,1 \text{ mm} = 100 \%$	$8 \text{ mm} = 100 \%$
	$1 \text{ mm} = 33 \%$	$1 \text{ mm} = 90,9 \%$	$1 \text{ mm} = 12,5 \%$
	$3,15 \text{ mm} = 103 \%$	$1,78 \text{ mm} = 161 \%$	$8,10 \text{ mm} = 101 \%$
Proband 2	$3 \text{ mm} = 100 \%$	$1,1 \text{ mm} = 100 \%$	$8 \text{ mm} = 100 \%$

	1 mm = 33 %	1 mm = 90,9 %	1 mm = 12,5 %
	3,13 mm = 103 %	1,65 mm = 150 %	8,03 mm = 100 %
Proband 3	3 mm = 100 %	1,1 mm = 100 %	8 mm = 100 %
	1 mm = 33 %	1 mm = 90,9 %	1 mm = 12,5 %
	3,06 mm = 100 %	1,69 mm = 153 %	8,02 mm = 100 %
Proband 4	3 mm = 100 %	1,1 mm = 100 %	8 mm = 100 %
	1 mm = 33 %	1 mm = 90,9 %	1 mm = 12,5 %
	3,11 mm = 102 %	1,65 mm = 150 %	8,05 mm = 100 %
Proband 5	3 mm = 100 %	1,1 mm = 100 %	8 mm = 100 %
	1 mm = 33 %	1 mm = 90,9 %	1 mm = 12,5 %
	3 mm = 100 %	1,59 mm = 144 %	7,77 mm = 97 %

Die folgenden Tabellen beinhalten alle Werte für die akustischen Signale bei Maximalkraft sowie die auftretenden akustischen Signale vor  $F_{\max}$ .

Prob 1	Peak zu $F_{\max}$ in (mV)	Peak vor $F_{\max}$ 1.) Peak in (mV)	Peak vor $F_{\max}$ 2.) Peak in (mV)
P1	3427,96 mV		
P2	2520,23 mV		
P3	1481,91 mV		
P4	2061,17 mV		
P5	2836,23 mV		
P6	2023,62 mV	1,03213 mV	
P7	1705,32 mV	1213,47 mV	
P8	1418,87 mV		
P9	1999,48 mV		
P10	2689,23 mV		

P11	2406,46 mV		
P12	1630,38 mV		
P13	1724,38 mV		
P14	2156,60 mV		
P15	1856,89 mV		
P16	2175,58 mV		
P17	1540,02 mV	138,147 mV	
P18	2910,62 mV		
P19	2088,80 mV		
P20	2338,66 mV		
P21	5084,29 mV		
P22	2752,70 mV	934,478 mV	133,622 mV
P23	1372,10 mV	492,646 mV	
P24	2429,25 mV		
P25	4033,50 mV	24,93 mV	
P26	3068,06 mV		
P27	2401,86 mV		
P28	2303,01 mV		
P29	2560,65 mV		
P30	3398,90 mV		

Prob 2	Peak zu $F_{\max}$ in (mV)	Peak vor $F_{\max}$ 1.) Peak in (mV)	Peak vor $F_{\max}$ 2.) Peak in (mV)
P1	3966,25 mV		
P2	3667,57 mV		
P3	2808,44 mV		
P4	2570,01 mV		
P5	1396,32 mV		
P6	2635,04 mV		
P7	1843,23 mV		

P8	3996,34 mV		
P9	2786,60 mV		
P10	2161,13 mV		
P11	2613,60 mV		
P12	2495,07 mV		
P13	3714,89 mV		
P14	3092,12 mV		
P15	3133,1 mV		
P16	1621,72 mV		
P17	2356,36 mV		
P18	2202,97 mV		
P19	3136,97 mV		
P20	2708,08 mV	3013,91 mV	715,587 mV
P21	3587,62 mV		
P22	5326,45 mV		
P23	3515,05 mV		
P24	3536,57 mV		
P25	2760,24 mV		
P26	3544,75 mV		
P27	3051,39 mV		
P28	4813,79 mV		
P29	2826,78 mV		
P30	2499,51 mV		

Prob 3	Peak zu $F_{\max}$ in (mV)	Peak vor $F_{\max}$ 1.) Peak in (mV)	Peak vor $F_{\max}$ 2.) Peak in (mV)
P1	3904,56 mV	272,007 mV	221,512 mV
P2	1795,60 mV		
P3	2221,23 mV		
P4	2358,98 mV	25,56 mV	410,47 mV
P5	2955,32 mV		

P6	44,77 mV		
P7	2728,80 mV		
P8	1828,62 mV		
P9	3037,02 mV		
P10	834,917 mV		
P11	4652,78 mV		
P12	3930,61 mV		
P13	2585,65 mV		
P14	3205,09 mV		
P15	3774,59 mV		
P16	2333,66 mV		
P17	1661,02 mV		
P18	2330,56 mV	566,165 mV	363 mV
P19	3961,97 mV		
P20	3843,83 mV		
P21	3064,15 mV		
P22	2042,59 mV		
P23	2403,44 mV		
P24	1880,55 mV		
P25	18,49 mV	15,46 mV	
P26	2508,46 mV		
P27	1723,66 mV		
P28	2697,84 mV		
P29	4471,13 mV		
P30	1508,74 mV	147,67 mV	

Prob 4	Peak zu $F_{\max}$ in (mV)	Peak vor $F_{\max}$ 1.) Peak in (mV)	Peak vor $F_{\max}$ 2.) Peak in (mV)
P1	2032,88 mV	780,827 mV	
P2	4277,80 mV		
P3	2287,39 mV		

P4	2399,48 mV		
P5	1574,75 mV		
P6	2731,23 mV		
P7	2920,80 mV		
P8	2337,08 mV		
P9	4207,30 mV		
P10	2078,37 mV		
P11	5118,48 mV	1018,58 mV	
P12	2414,01 mV	146,544 mV	
P13	4187,46 mV		
P14	2904,52 mV	430,582 mV	
P15	800,832 mV		
P16	2744,64 mV		
P17	1761,07 mV	92,32 mV	930 mV, 683,73 mV
P18	1786,37 mV		
P19	4579,94mV		
P20	5340,04mV		
P21	3058,21 mV		
P22	2399,40 mV		
P23	3512,05 mV		
P24	3709,17 mV		
P25	2889,76 mV		
P26	1812,19 mV		
P27	2357,64 mV		
P28	1399,39 mV		
P29	1414,47 mV		
P30	3262,87 mV		

Prob 5	Peak zu $F_{\max}$ in (mV)	Peak vor $F_{\max}$ 1.) Peak in (mV)	Peak vor $F_{\max}$ 2.) Peak in (mV)
P1	1921,77 mV	757,216 mV	
P2	1441,17 mV		
P3	1291,24 mV		
P4	3332,07 mV		
P5	3533,51 mV		
P6	1884,94 mV		
P7	3519,23 mV	376,782 mV	
P8	2865,35 mV		
P9	3058,47 mV	313,046 mV	
P10	3135,78 mV	1978,36 mV	
P11	3062,99 mV		
P12	2174,81 mV		
P13	1861,29 mV		
P14	2476,43 mV		
P15	2794,71 mV		
P16	1538,16 mV	1036,61 mV	784,44 mV, 40,63 mV
P17	2212,67 mV	398,61 mV	
P18	1803,98 mV		
P19	2821,70 mV		
P20	2175,84 mV	30,876 mV	
P21	1423,07 mV		
P22	1723,66 mV	34,1303 mV	26,27 mV
P23	3980,22 mV	350,272 mV	
P24	1992,25 mV		
P25	2574,69 mV	645,697 mV	
P26	2263,23 mV		
P27	3554,79 mV	184,383 mV	712,449 mV
P28	1947,49 mV		
P29	1749,69 mV		

P30	2150,44 mV		
-----	------------	--	--

Berechnung der Weibullfestigkeit  $\sigma_0$  (MPa) der nichtgestrahlten Proben aller Probanden nach ISO 6872:

Proband 1:  $5,896x - 23,445 = 0$

$$x = 23,445/5,896 = 3,97$$

$$e^x = e^{3,97} = 53,30 \text{ MPa}$$

Proband 2:  $5,2527x - 19,881 = 0$

$$x = 19,881/5,2527 = 3,78$$

$$e^x = e^{3,78} = 44,03 \text{ MPa}$$

Proband 3:  $2,5151x - 9,2227 = 0$

$$x = 9,2227/2,5151 = 3,66$$

$$e^x = e^{3,66} = 39,13 \text{ MPa}$$

Proband 4:  $2,4778x - 10,03 = 0$

$$x = 10,03/2,4778 = 4,04$$

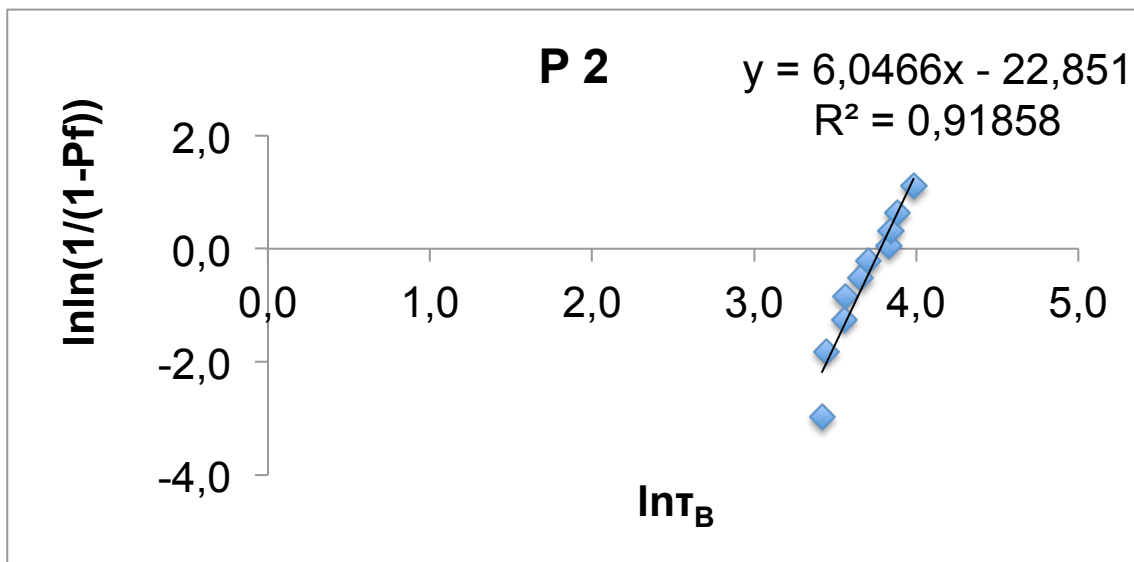
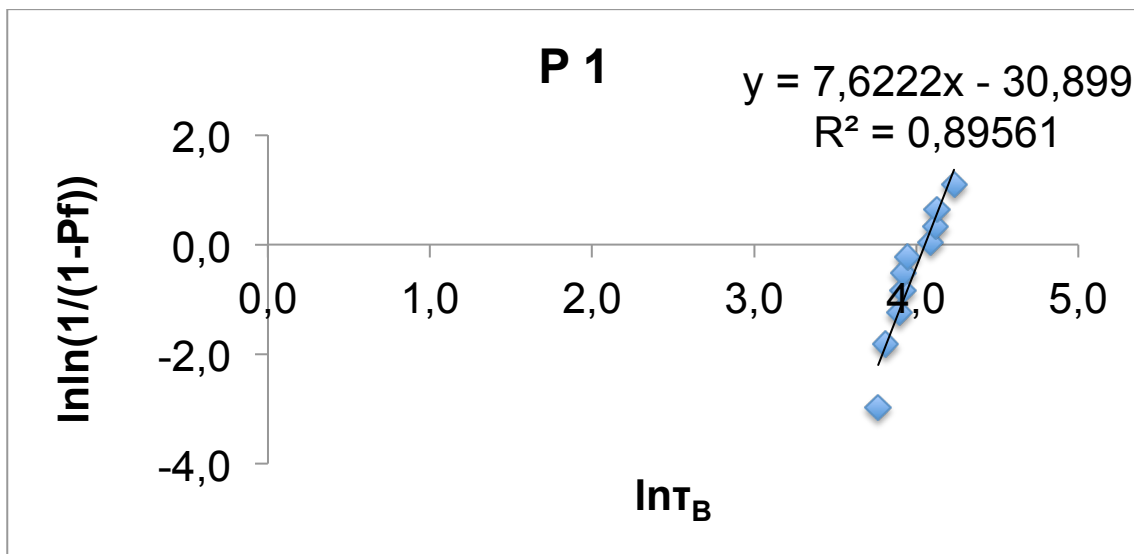
$$e^x = e^{4,04} = 57,27 \text{ MPa}$$

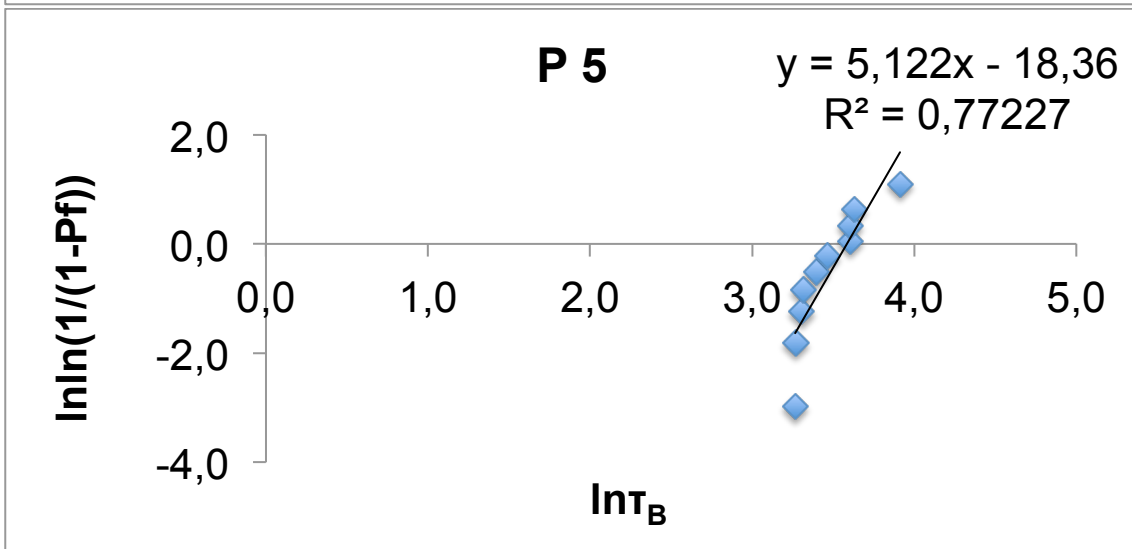
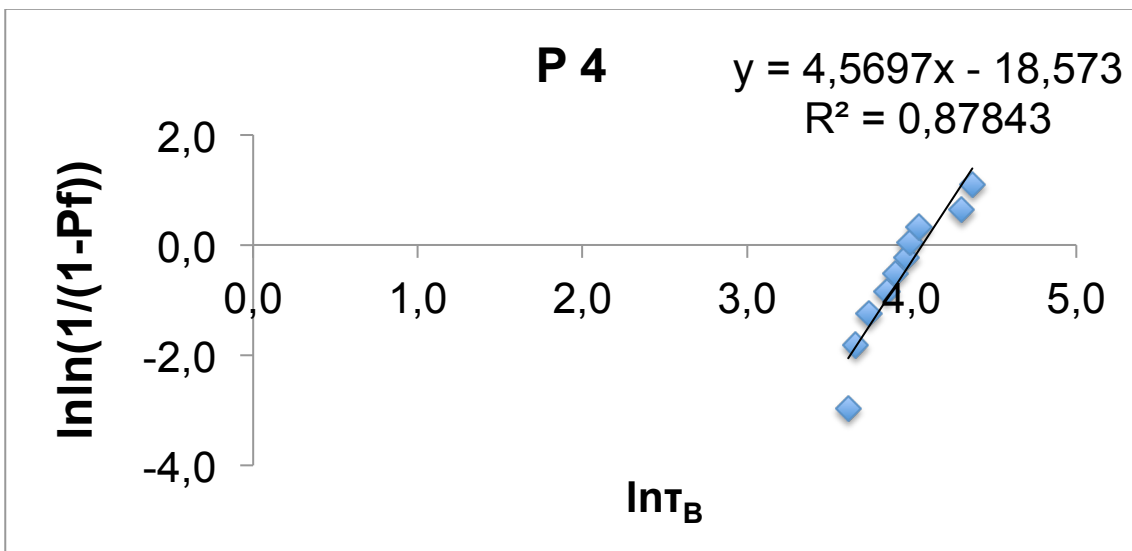
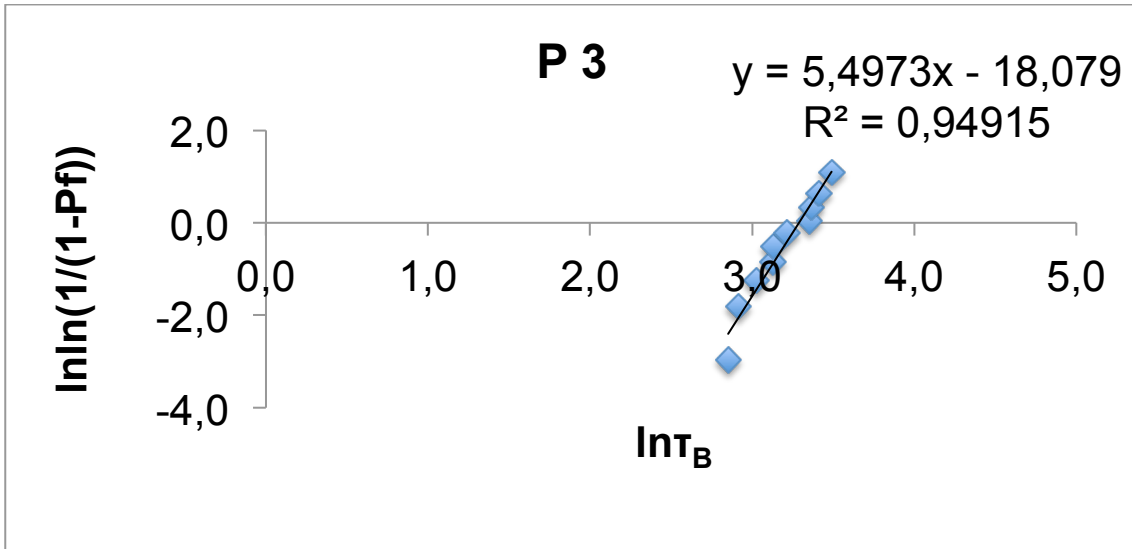
Proband 5:  $4,9335x - 17,512 = 0$

$$x = 17,512/4,9335 = 3,54$$

$$e^x = e^{3,54} = 34,79 \text{ MPa}$$

Regressionsgeraden der 10 sandgestrahlten Proben der Probanden 1 - 5:





Berechnung der Weibullfestigkeit  $\sigma_0$  (MPa) der 10 sandgestrahlten Proben  
Probant 1-5 nach ISO 6872:

Probant 1:  $7,6222x - 30,899 = 0$

$$x = 30,899/7,6222 = 4,05$$

$$e^x = e^{4,05} = 57,40 \text{ MPa}$$

Probant 2:  $6,0466x - 22,851 = 0$

$$x = 22,851/6,0466 = 3,77$$

$$e^x = e^{3,77} = 43,38 \text{ MPa}$$

Probant 3:  $5,4973x - 18,079 = 0$

$$x = 18,079/5,4973 = 3,29$$

$$e^x = e^{3,29} = 26,84 \text{ MPa}$$

Probant 4:  $4,5697x - 18,573 = 0$

$$x = 18,573/4,5697 = 4,06$$

$$e^x = e^{4,06} = 57,97$$

Probant 5:  $5,122x - 18,36 = 0$

$$x = 18,36/5,122 = 3,58$$

$$e^x = e^{3,58} = 35,87 \text{ MPa}$$

## 10 Danksagung

Herrn Prof. Dr. J. Geis-Gerstorfer danke ich für dieses Thema, mit dem ich mich sehr gerne intensiv beschäftigt habe, da es sowohl für meinen ersten Beruf als Zahntechnikerin als auch für meinen jetzigen Beruf als Zahnärztin relevant ist.

Herzlich möchte ich mich bei Frau Ch. Schille dafür bedanken, dass sie immer Zeit und Geduld für mich hatte und mich in einer angenehmen und entspannten Atmosphäre äußerst hilfreich unterstützte. Ihre hohe fachliche Kompetenz war mir nicht nur in der Welt der Excel-Formeln eine wertvolle Stütze.

Auch Herr S. Spintzyk stand mir als hilfreicher Ratgeber und Proband zur Seite, wofür ich ihm danke.

Außerdem gilt dem Praxisteam aus der Zahnarztpraxis, in deren Praxislabor die Probenherstellung stattfinden durfte und das mir teilweise als Probanden mit Selbstverständlichkeit seine Zeit zur Verfügung stellte, großer Dank.

Der ständige Zuspruch und die Unterstützung meiner lieben Familie navigierten mich zum Ziel.