

**Untersuchungen zur Verbundfestigkeit von Zirkoniumoxid mit  
verschiedenen Kompositklebern  
– eine In-Vitro-Studie –**

**Inaugural-Dissertation**

zur Erlangung des Doktorgrades  
der Hohen Medizinischen Fakultät  
der Rheinischen Friedrich–Wilhelms–Universität  
Bonn

Cabrail Ciftcioglu

aus Altinözü/ Türkei

2008

Angefertigt mit Genehmigung der  
Medizinischen Fakultät der Universität Bonn

Gutachter: Prof. Dr. med. dent. Helmut Stark

Gutachter: Prof. Dr. med. dent. Matthias Frentzen

Tag der Mündlichen Prüfung:

05.03.2008

Aus der Abteilung für Zahnärztliche Propädeutik / Experimentelle  
Zahnheilkunde der Rheinischen Friedrich–Wilhelms–Universität Bonn

Direktor: Prof. Dr. med. dent. Helmut Stark

## **Meiner Familie**



# Inhaltsverzeichnis

	Seite	
<b>1</b>	<b>Einleitung und Problemstellung</b>	<b>8</b>
1.1	Zielsetzung	14
<b>2</b>	<b>Literaturübersicht</b>	<b>15</b>
2.1	Historie der Adhäsivbrücken	15
2.1.1	Aktueller Stand der Adhäsivbrücken	17
2.2	Historie der Dentalkeramiken	18
2.2.1	Aktueller Stand der Dentalkeramiken	19
2.3	Werkstoffkundliche Grundlagen von Zirkoniumoxid	24
2.4	Grundlagen zum Verbund zwischen Zahnhartsubstanz und Kleber	27
2.4.1	Grundlagen zum Verbund zwischen Kleber und Zirkoniumoxid	28
<b>3</b>	<b>Material und Methode</b>	<b>31</b>
3.1	Prüfkörperherstellung	31

3.2	Prüfkörpervorbehandlung	33
3.3	Verklebung der Prüfkörper	34
3.4	Versuchsdurchführung und Zugscherversuch	38
3.5	Temperaturlastwechsel	40
<b>4</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>42</b>
4.1	Hafffestigkeitswerte von BIFIX–QM ohne und nach Langzeitlagerung mit thermischer Wechsellast	42
4.1.1	Bruchflächenanalyse von BIFIX–QM mit den dazu–gehörigen rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen und Abzugsdiagrammen	45
4.2	Hafffestigkeitswerte von Panavia F 2,0 ohne und nach Langzeitlagerung mit thermischer Wechsellast	54
4.2.1	Bruchflächenanalyse von Panavia F 2,0 mit den dazu–gehörigen rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen und Abzugsdiagrammen	56
4.3	Hafffestigkeitswerte von Rely X™ Unicem ohne und nach Langzeitlagerung mit thermischer Wechsellast	62
4.3.1	Bruchflächenanalyse von Rely X™ Unicem mit den dazu–gehörigen rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen und Abzugsdiagrammen	65

4.4	Statistische Präsentation und Zusammenfassung der Ergebnisse	71
<b>5</b>	<b>Diskussion und Schlussfolgerungen</b>	<b>88</b>
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>96</b>
<b>7</b>	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>97</b>
<b>8</b>	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>102</b>
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>103</b>
<b>10</b>	<b>Danksagung</b>	<b>121</b>

## 1 Einleitung und Problemstellung

Der Wunsch, minimal invasiv und ästhetisch anspruchsvolle Restaurationen herzustellen, die eine ausgezeichnete Biokompatibilität besitzen, lenkt das Interesse auf die Adhäsivbrückentechnik sowie auf Zirkoniumoxid (synonym = Zirkonoxid, Zirkoniumdioxid). Die Anwendung von Adhäsivbrücken zur Versorgung von Zahnlücken verlangt eine klare Indikationsstellung mit strenger Patientenselektion [Behr und Rosentritt 2000; Kerschbaum et al. 1993; Strub et al. 2003].

Nach abgeschlossenem Durchbruch der Eckzähne können Adhäsivbrücken in jeder Altersklasse eingesetzt werden. Das Fehlen von Front- und Seitenzähnen bei Jugendlichen, bedingt durch genetische (Nichtanlage), traumatische (Totalluxation) oder iatrogene (Lückenbildung nach KFO-Therapie) Ursachen stellt eine Indikation dar. Bei Erwachsenen sind es meist parodontale Probleme, die den Zahnverlust bewirken [Kohlmeyer et al. 2004; Strub et al. 2003]. Die Gebissssituation hat für die Verwendung von Adhäsivbrücken als Zahnersatz eine enorme Bedeutung, zum Beispiel müssen die Pfeilerzähne kariesfrei sein. Zudem wird noch darüber diskutiert, ob sie Füllungen haben dürfen oder nicht [Strub et al. 2003]. Auch die Größe der Lücke in mesiodistaler Richtung kann die Indikation einschränken. So sollte die zu ersetzende Zahnkrone der Breite der Lücke entsprechen. Hierbei ist auch die Kooperation des Patienten bezüglich der Mundhygiene und der Recalls von großer Bedeutung [Holste und Kerschbaum 1994b].

Die Kontraindikationen für diese alternative Zahnersatztechnik liegen in der ungünstigen Pfeilerstellung (Kippung, Rotation, Elongation), sowie ungünstigen okklusalen Verhältnissen wie ein tiefer Biss oder Parafunktionen (Bruxismus). Auch ein zu geringes Schmelzangebot an den Pfeilerzähnen, welches durch große Füllungen und kurze klinische Kronen verursacht wird, bietet keinen ausreichenden Halt für die Befestigung. Die Pfeilermobilität ist von besonderer Bedeutung für die Adhäsivbrücke, da unterschiedliche Lockerungsgrade der Pfeilerzähne sich nachteilig auf den Erfolg der Brücke auswirken können [Behr und Rosentritt 2000; Bothelo et al. 2002; Haastert et al. 1992; Holste und Kerschbaum 1994a; Kern 2005a; Strub et al. 2003].



Die besonderen Vorteile dieser alternativen Technik sind geringere Schmelzabtragungen bei der Präparation (10 % Hartschmelzverlust verglichen mit 40 – 60 % bei der konventionellen Kronenpräparation) [Strub et al. 2003], also eine minimale Invasivität. Aufgrund der minimalen Präparation der Pfeilerzähne ist unter Umständen eine Anästhesie nicht nötig. Die Irritation der Pulpa ist auf ein Minimum beschränkt, zumal es sich um eine schmelzbegrenzte Präparation handelt. Überdies sind Ästhetik und Kosmetik bei Adhäsivbrücken nicht eingeschränkt, da labiale bzw. bukkale Zahnanteile unberührt bleiben. Die Parodontalprophylaxe ist tadellos, da hier die Präparationsgrenze supragingival liegt [Strub et al. 2003].

Entsprechende Nachteile bei der Adhäsivbrückentechnik sind zunächst die beschränkte Indikation. Ein weiterer Nachteil liegt im Verfahren der Herstellung der Adhäsivbrücken. Da sich die Materialien für die Brückengerüste zeitgemäß ändern, liegen keine Langzeiterfahrungen vor. Bei Adhäsivbrücken mit Metallflügeln besteht die Gefahr des grauen Durchscheinens des Metalls und eine Kariesbildung durch das unbemerkte Lösen eines Klebeflügels. Unter anderem wächst bei der Verwendung von Klebeflügeln aus Nichtelegierungen die Korrosionsanfälligkeit und Allergenität. Zudem kann bei Vorliegen verschiedener Legierungen ein elektrochemisches Potential generiert werden [Kern et al. 1994; Wirz et al. 1987; Sato et al. 1991]. Also gibt es nicht nur Nachteile aus ästhetischer Sicht, sondern auch in der Biokompatibilität. Selbst bei hochgoldhaltigen Legierungen kann es aufgrund von Gefügefehlern oder Mikrospalten sowie der für die Keramikhaftung notwendigen Oxidschicht zu Korrosionserscheinungen kommen [Pospiech et al. 2004]. Diese Feststellungen führten in den letzten Jahren zu einer Neuorientierung in der Gestaltung von feststehendem und kombinierbarem Zahnersatz. Die innovative Entwicklung der CAD/CAM Technologie macht es möglich, glasinfiltrierte und vor allem glasfaserfreie Keramiken rationell und wirtschaftlich zu bearbeiten, um so einen hochwertigen vollkeramischen Zahnersatz herzustellen [Mehl 2000; Suttor et al. 2001].

Ehemals stand man vollkeramischen Restaurationen eher skeptisch gegenüber, da sie denn Ruf hatten, unbeständig zu sein. Erst durch die Entwicklung von Glaskeramiken und später der Oxidkeramiken, kam es zu einer routinierten Anwendung in der Prothetik. Die zur Verfügung stehenden Technologien werden

auch in der Adhäsivprothetik genutzt. Mit der Weiterentwicklung der Adhäsivtechnik, besonders durch Kleber und neue Präparationsformen der Pfeilerzähne sowie die Konditionierung, erreichen Adhäsivbrücken eine Lebensdauer von ca. 8 Jahren, die ihre Anwendung für eine Langzeitversorgung rechtfertigen [Behr und Rosentritt 2000]. So liegt die klinische Erfolgsrate für metallkeramische Adhäsivbrücken nach 6 Jahren bei 95 % [Rammelsberg et al. 1995] und entsprechen damit etwa den Erfolgsraten konventioneller Brücken [Kern 2005b].

Weitere Langzeitstudien, wie die von Stark et al. [1994], beschreiben eine Überlebenswahrscheinlichkeit von 53 % nach 5 Jahren, nach Wiederbefestigung eine von 74 %. In der Studie von Behr und Rosentritt [2000] sind nach 6 Jahren 82 % aller Brücken in situ. Creugers et al. [1992a], zeigen nach 4 Jahren eine Überlebenswahrscheinlichkeit von 74 %. Kerschbaum et al. [1988] ermitteln in einer multizentrischen Studie eine Überlebenswahrscheinlichkeit von 82 % nach 5 Jahren. Weitere Aufsätze von Kerschbaum et al. [1993] präsentieren für 1637 Klebebrücken nach 5 Jahren eine Retentionsquote von 82 % mit der Möglichkeit der Wiederbefestigung. Eine Untersuchung von Haastert et al. [1992] dokumentiert bei 1310 eingegliederten Brücken nach 5 Jahren eine Erfolgsquote von 86 %. Scheller et al. [2004] hingegen geben nach 15 Jahren eine Erfolgswahrscheinlichkeit von 65 % an mit der Möglichkeit der Wiederbefestigung.

Ein direkter Vergleich der genannten Studien ist möglich, da sie nach dem gleichen statistischen Verfahren berechnet wurden. Es wurde das Verfahren nach Kaplan–Meier angewendet. Danach hängt die Überlebenswahrscheinlichkeit der Brücken besonders von der Gerüstkonditionierung, Pfeilermobilität und der Präparationsform ab [Behr und Rosentritt 2000; Behr et al. 1998; Bothelo et al. 2002; Haastert et al. 1992; Holste und Kerschbaum 1994a und 1994b; Kerschbaum et al. 1993 und 1988; Kohlmeyer et al. 2004; Stark et al. 1994; Van Dalen et al. 2000].

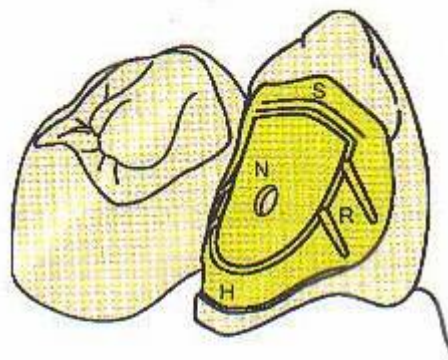
Alternativ zu den dreigliedrigen Adhäsivbrücken (zweiflügelig), gibt es die Variante der einflügeligen Adhäsivbrücke mit nur einem Pfeiler und einem Anhänger. Diese Adhäsivbrücke bringt besondere Vorteile mit sich. Neben ihrer einfacheren Herstellung ist sie kostengünstiger und erfordert weniger Schmelzabtrag als die zweiflügeligen Brücken. Zudem ergibt sich keine unphysiologische Verblockung von Pfeilerzähnen. Zusätzlich ist sie schneller zu präparieren, leichter abzuformen sowie

einfacher zu befestigen. Außerdem besteht nicht mehr die Gefahr der einseitigen Dezentierung von Brückenankern und der folglich Kariesbildung, wie es bei dreigliedrigen Adhäsivbrücken der Fall ist [Bothelo 2001; Kern 2005b].

Folgende Studien über Einfeiler–Freiendbrücken zeigen eine gleiche meist sogar eine höhere Retentionskraft als die zweiflügeligen Brücken [Bothelo 2001]. Bothelo et al. [2001] haben in mehreren Studien die Retentionsraten von 919 Adhäsivbrücken untersucht. Von diesen 919 Brücken waren 160 Freiendbrücken, die höhere Retentionsraten aufzeigten als beidseitig verklebte Brücken. In eigenen Untersuchungen ermittelten Bothelo et al. [2000] für 33 Brücken bei einer mittleren Verweildauer von 30 Monaten eine 97 % Erfolgsquote. In einer anderen Studie zeigten sie eine Erfolgsquote von 95,1 % für 82 Brücken in einem Untersuchungszeitraum von 40 Monaten [Bothelo und Alex 2002]. Brabant [1997] hatte in einem Untersuchungszeitraum von 1984 – 1994 eine Erfolgsquote von 97 %, jedoch wurde die durchschnittliche Lebensdauer und die Anzahl der Freiendbrücken nicht genannt. Hussey und Linden [1996] gaben für 142 Brücken bei einer Verweildauer von 36 Monaten eine Erfolgsquote von 88 % an. Briggs et al. [1996] berichteten von 54 Brücken, die 27 Monate untersucht wurden, davon waren 80 % in situ. Hussey et al. [1991] haben 70 Freiendbrücken eingesetzt und durchschnittlich 32,4 Monate beobachtet. Ihre Retentionsrate lag bei 83 %. Eine weitere Studie von Dunne und Millar [1993] zeigte für 47 Freiendbrücken bei einer Beobachtungszeit von 101 Monaten eine Retentionsrate von 79 %. Weitere Langzeitstudien von bis zu 7 Jahren lieferten primäre Erfolgsraten für metallgestützte Klebebrücken von etwa 95%, die denen des konventionellen Zahnersatz entsprechen [Barrack 1993a und 1993b; Dürr et al. 1992; Hammer et al. 1993; Pospiech et al. 1993; 1994b und 1995b].

Wichtig für den Erfolg der metallgestützten ein– oder zweiflügeligen Adhäsivbrücken, ist die Retentionsform der Pfeilerzähne. Diese soll mit approximalen Rillen und einer oralen Noppe präpariert sein, inzisal eine seichte Hohlkehle und zervikal eine feine Stufe aufweisen [Barrack 1993a; Behr und Rosentritt 2000 und 1998; Besimo et al. 1996; Bothelo et al. 2002 und 2001; Kern 2005b; Haastert et al. 1992; Holste und Kerschbaum 1994b; Stark et al. 1994; Van Dalen et al. 2004].

Abbildung 1 zeigt eine schematische Darstellung einer schmelzbegrenzten Präparation an Frontzähnen für einflügelige Metallklebebrücken. Im Prinzip geht man bei den zweiflügeligen Brücken genauso vor, nur die Einschubrichtung muss beachtet werden, besonders die der parallelen Rillen, deshalb wird das Benutzen eines Mundparallelometers empfohlen [Behr und Rosentritt 2000; Bothelo 2001; Barrack 1993b; Kern 2005b; Holste und Kerschbaum 1994b].



Metall-Klebeflügel  
 H – Seichte Hohlkehle  
 R – Feine Rillen  
 N – Noppe  
 S – Feine Stufe

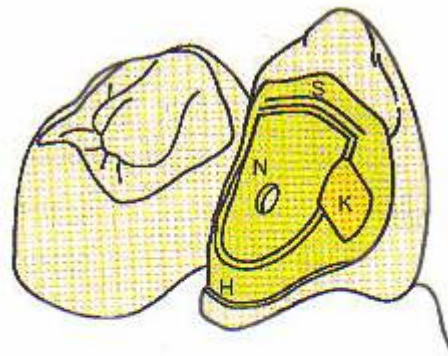
*Abbildung 1: Adhäsivpräparation an einem Eckzahn für eine metallkeramische einflügelige Adhäsivbrücke, zum Ersatz des seitlichen Schneidezahns [aus Kern 2005b].*

Eine Schwachstelle bei den metallischen Klebebrücken bildet der Verbund zwischen Metall und Kleber, deshalb ist eine retentive Präparation und ein adhäsives Einsetzen der Klebebrücken unabdingbar [Barrack 1993b; Besimo et al. 1996; Behr und Rosentritt 2000; Behr et al. 1998; Bothelo 2001; Haastert et al. 1992; Holste und Kerschbaum 1994b; Kerschbaum et al. 1993 und 1998; Kern et al. 1989; Kohlmeyer et al. 2004; Rammelsberg et al. 1995; Stark et al. 1994; Strub et al. 2003].

Für eine vollkeramische Adhäsivbrücke wird anstatt der approximalen Rillen ein seichter Kasten zur Anhängerseite hin präpariert. Der Kasten soll den Konnektor, der die Verbindungsstelle zwischen dem Brückenglied und dem Klebeflügel darstellt, verstärken und mindestens 0,5 mm tief und 2 x 2 mm breit sein. Für die Dimension der Konnektoren gibt es klare Vorstellungen, die Kern in seinen Studien ermittelt hat.

Die Problematik der Konnektoren wird in einem anderen Abschnitt diskutiert.

In Abbildung 2 ist die Präparationsform für eine vollkeramische Adhäsivbrücke schematisch dargestellt.



Vollkeramik-Klebeflügel

H – Seichte Hohlkehle

R – Seichter Kasten

N – Noppe

S – Feine Stufe

*Abbildung 2: Adhäsivpräparation an einem Eckzahn für eine vollkeramische einflügelige Adhäsivbrücke, zum Ersatz des seitlichen Schneidezahns [aus Kern 2005b].*

Verglichen mit metallkeramischen Adhäsivbrücken, für die viele Langzeitstudien existieren, liegen für vollkeramische Klebebrücken nur limitierte Langzeitstudien vor. Eine Langzeitstudie von Kern [2005a] in der zwei- sowie einflügelige vollkeramische Adhäsivbrücken eingegliedert wurden, zeigt folgendes: Zunächst wurde eine glasinfiltrierte Aluminiumoxidkeramik, In-Ceram, für das Brückengerüst verwendet. Im Verlauf der Jahre 1996 – 1998 wurde stattdessen die Keramik In-Ceram Alumina und später von 1999 – 2001 die Keramik In-Ceram Zirconia verwendet, um den Patienten die Verbesserung der Keramikmaterialien zugute kommen zu lassen. Die Ergebnisse zeigen, dass nach 5 Jahren eine Überlebensrate von 73,9 % für die zweiflügeligen Brücken vorlag und 92,3 % für die einflügeligen Brücken. Jedoch sinkt die Erfolgsrate bei zweiflügeligen Brücken auf 67,3 %, wenn die einseitige Fraktur als Misserfolg gezählt wird. Infolgedessen scheinen einflügelige Adhäsivbrücken aus

hochfester Oxidkeramik für den Frontbereich zuverlässiger und somit geeigneter zu sein, als die zweiflügeligen Adhäsivbrücken [Kern 2005a].

In der Habilitationsschrift von Pospiech [1997] ist dokumentiert, dass 41 eingegliederte Adhäsivbrücken nach 3 Jahren eine Retentionsrate von 66 % zeigten. Gegenwärtig liegen viele klinische Studien über vollkeramische Kronen und Brücken auf der Basis von Yttriumoxid stabilisiertes Zirkonoxid (Y-TZP) vor, sowie umfangreiche werkstoffkundliche Untersuchungen [Kern 2005b; 2004a und 2004b; Kern und Suttor 2005c; Kern und Wegner 2000b; Kurbad und Reichel 2004; Luthardt 2005; Pospiech et al. 2004; Rinke 2006; Suttor et al. 2001; Völkl 2001].

Aufgrund der Ergebnisse, die in den In-Vitro Studien erzielt wurden, ist es zu erwarten, dass sich Brückengerüste aus Zirkonoxid positiv auf die klinische Erfolgsrate von vollkeramischen Zahnersatz, Adhäsivbrücken inbegriffen, auswirken werden.

## 1.1 Zielsetzung

Im Hinblick auf das prothetische Potential, das Yttriumoxid stabilisiertes Zirkonoxid als Gerüstwerkstoff hat, ist das Ziel dieser experimentellen Studie, festzustellen, wie hoch die Verbundfestigkeit der hier verwendeten Kompositkleber zu Zirkonoxid im Zugscherversuch nach unterschiedlicher Vorbehandlung ist. Anhand der Analyse der erzielten Messresultate soll die Eignung der unterschiedlichen Kompositkleber als Befestigungszement für Adhäsivbrücken mit Zirkonoxid als Gerüstmaterial beurteilt werden.

## 2 Literaturübersicht

### 2.1 Historie der Adhäsivbrücken

In der restaurativen Zahnheilkunde wurde die Adhäsivtechnik zuerst im Sinne einer provisorischen Versorgung frisch entstandener Lücken verwendet.

*Ipsen* und *Buonocuore* zeigten die Möglichkeit, frisch entstandene Lücken mit den Kronen der extrahierten Zähne oder auch Prothesenzähne aus Kunststoff, mittels Kompositen zu verkleben, um so die Lücke zu schließen [aus *Kistler 1998*]. Diese Möglichkeit der Befestigung beruhte auf der Säure-Ätz-Technik, die 1955 von *Buonocuore* eingeführt wurde.

Positiv an dieser Methode war, dass kein Labor benötigt wurde und daher Kosten und zusätzliche Behandlungssitzungen wegfielen. Nachteilig ist allerdings die eingeschränkte Funktion und Haltbarkeit der Konstruktion, nur geeignet als kurzzeitige provisorische Versorgung. *Rochette* stellte 1973 erstmals eine Methode vor, bei der ein perforiertes Metallgerüst mittels Klebung an den Pfeilerzähnen befestigt wurde, wobei ein modelliertes Brückenglied die Lücke schloss. Die Pfeilerzähne wurden nicht beschliffen. Zur Befestigung benutzte *Rochette* einen Polymethylmethacrylat-Kleber. 1977 gingen *Howe* und *Deney* in gleicher Weise vor, wobei sie erstmals einen Kompositzement zum Einsetzen benutzten. *Livaditis et al. [1980]* wandte diese Brückentechnik im Seitenzahnbereich an, wobei er das Gerüst ohne Perforationen gestaltete. In Anlehnung an die anglo-amerikanische Literatur wurde für diese Art Restaurationen der Begriff „Adhäsivbrücke“ gebräuchlich. Die häufig verwendete Bezeichnung „Maryland-Brücke“ bezieht sich streng genommen ausschließlich auf die an der Universität von Maryland von *Livaditis et al.* entwickelten Brücken für den Seitenzahnbereich [aus *Kistler 1998*]. Die Überlebensrate der Adhäsivbrücken mit Lochretentionen betrug nach 2 Jahren 60%, wobei der Misserfolg hauptsächlich auf das Versagen der Klebung zwischen Metall und Kunststoff begründet war. *Simonsen et al. [1981]* führte als erster die Möglichkeit

ein, die Metalloberfläche durch Ätzung zu konditionieren und so auf Lochretentionen zu verzichten. Gerade an diesen Stellen versagte die Klebung durch Abrasion des Klebers an den Retentionen. Durch die Technik von *Simonsen* wurde so die Klebefläche vergrößert. Die Restaurationen wurden ohne Präparation der Pfeilerzähne eingesetzt, da im Vordergrund der adhäsiven Prothetik die Reversibilität der Behandlung im Sinne eines Langzeitprovisoriums stand [*Charleston 1980; Marinello und Belser 1985*]. *Holste* und *Berling* [1980] verließen erstmals die präparationsfreie Technik und präparierten Rillen in den Schmelz um zusätzlichen Halt gegen extraaxiale Kräfte zu bekommen. Die perforierten Gerüste von *Rochette* setzten sich aus den vorher erwähnten Gründen nicht durch, zumal der Kunststoffzement an den Perforationen einer starken Quellung und Degradation durch das Mundmilieu ausgesetzt war, welches seine Hafteigenschaften deutlich herabsetzte [*Charleston 1980; Gütschow 1991; Marinello und Belser 1985*].

Die Adhäsivprothetik befasste sich eingehend mit der Entwicklung einer neuen Präparationsmethode, gleichzeitig aber auch mit der Entwicklung und Verbesserung der Klebebrückentechnik. Hierbei konzentrierte man sich auf eine Haftsteigerung der Verbindung Metall – Kunststoff. Die Verbindung Schmelz – Kunststoff stand nicht zur Debatte, da dies nicht die Schwachstelle des Klebeverbundes Schmelz – Kunststoff – Metall war. Die bisher angewendete Säureätzung erfolgt entweder durch den Zahnarzt oder durch eine elektrolytische Ätzung im Labor. Für den Erfolg der Konditionierung spielten mehrere Faktoren eine Rolle, wie zum Beispiel die Legierung, Ätzzeit und Stromstärke [*Besimo et al. 1996*]. Die Konditionierung der Oberfläche durch Bestrahlung des Gerüsts mit Aluminiumoxidpartikel führte zur Oberflächenvergrößerung und Flächenaktivierung, welche die Haftwerte des Klebers steigerten.

Die notwendige chemische Verbindung wurde durch Auftragen eines Haftsilans erreicht. Die großen Vorteile dieses Verbundes sind die Hydrolysestabilität zwischen Silan und Metall sowie die gute Bindung des Klebers an das doppel funktionelle Silan [*Holste und Kerschbaum 1994b; Wirz et al. 1989b; Beldner und Marx 1992; Guggenberger 1989*]. Alle Verfahren, die es heute zur Konditionierung gibt, also Korundstrahlung, Silicoater–MD, Kevloc und Rocatec, bewirken eine Steigerung der Verbundfestigkeit. *Holste* und *Berling* veröffentlichten erstmals 1992 ihre



Untersuchungen über approximale Rillenpräparationen und einer Bohrung im Tuberkulum bei Adhäsivfeilern im Frontzahnbereich. Die In-Vitro gemessenen Haftwerte zeigten gegenüber unpräparierten Zähnen eine Steigerung um 100 %. *Simonsen* und *Barrack* haben ähnliche Ergebnisse erreicht [aus *Kistler 1998*]. *Schwickerath* und *Mokbel* haben Haftwerte von 7 N/mm<sup>2</sup> gemessen [aus *Kistler 1998*]. In allen Veröffentlichungen wurde vorausgesetzt, dass die Pfeilerzähne kariesfrei sind und die Präparation schmelzbegrenzt ist. Diese Methode hat sich durchgesetzt und wird heute noch so praktiziert.

### 2.1.1 Aktueller Stand der Adhäsivbrücken

Viele Autoren die sich mit der Adhäsivbrückentechnik befasst haben, sind der Meinung, dass Adhäsivbrücken durchaus auch als definitiver Zahnersatz angewendet werden können [*Bothelo et al. 2000; Dunne und Millar 1993; Holste und Kerschbaum 1994b; Kern 2005a und 2005b; Kohlmeyer et al. 2004; Rinke 2006; Stark et al. 1994; Stark und Holste 1992; Strub et al. 2003*]. Die Indikationen und die Vorgaben für die Präparation und die Herstellung der Adhäsivbrücken sind streng zu beachten, damit der gewünschte maximale Erfolg erreicht wird.

Mit der Entwicklung der Oxidkeramiken, vor allem dem Zirkonoxid, ist es möglich, alle Nachteile, die eine Adhäsivbrücke auf Metallbasis hat, zu eliminieren. Hinsichtlich der Ästhetik und der Biokompatibilität sind Brückengerüste aus Zirkonoxid nicht zu übertreffen [*Luthardt 2005; Kern 2005b und 2004b; Kurbad und Reichel 2004; Pospiech et al. 2004*]. Auch die Stabilität hat sich in In-Vitro-Studien bewährt [*Kurbad und Reichel 2004; Pospiech et al. 2004; Pröbster 2002; Suttor et al. 2001*]. Mittlerweile werden auch einflügelige Adhäsivbrücken hergestellt, die höhere Überlebensraten als die zweiflügeligen Adhäsivbrücken aufweisen [*Kern 2005a und 2005b*]. In-Vivo-Studien über Langzeitergebnisse stehen noch aus.

## 2.2 Historie der Dentalkeramiken

Die Fähigkeit, Keramik (griechisch: keramos = Tongegenstand) herzustellen stammt wahrscheinlich aus dem Gebiet des heutigen Nahen Ostens und ist wohl zwischen sieben- und achttausend Jahre alt [Charleston 1980]. Die Chinesen stellten Porzellan als Weiterentwicklung der Keramik erstmals um 700 n. Chr. her. Hierbei wurde als Ausgangsmaterial der Stein Tun verwendet, der aus Quarz und Glimmer zusammengesetzt ist. Erst um 1450 n. Chr. gelangte das Porzellan durch portugiesische Händler nach Europa.

Die erste Porzellanmasse, die in der Zahnheilkunde Verwendung fand, wurde 1774 durch den französischen Apotheker Duchateau eingesetzt, der sich sein Gebiss in einer Porzellanmanufaktur herstellen ließ. Der Grund für seine Idee war die Unzufriedenheit mit dem damals üblich benutzten knöchernen Zahnersatz. 1788 veröffentlichte der Dentist Dechemant eine Dissertation über künstliche Gebisse, wobei er Duchateau`s Idee aufgriff.

Die ersten Porzellanzähne stellte um 1808 der italienische Dentist Fonzi her. Er benutzte einen Retentionsdraht aus Gold um die Zähne miteinander zu verbinden. Die erste Zahnfabrik entstand 1825 durch Stockton in Philadelphia in den USA. In Deutschland wurde die erste Zahnfabrik 1893 durch Wienand gegründet. Charles Land entwickelte 1903 die erste gebrannte Porzellan-Jacketkrone. Die hohe Frakturanfälligkeit dieser Kronen gab den Anlass, nach stabileren Möglichkeiten der Versorgung mit keramischen Werkstoffen zu forschen. Anfang des zwanzigsten Jahrhunderts wurde die Metallkeramikkrone entwickelt. Die Zahnfabrik Vita (Bad Säckingen) führte 1968 die Feldspatkeramik Vita VMK 68 ein, die zur Verblendung von Kronen- und Brückengerüsten eingesetzt wurde. Die Keramik bestand aus einer Glasmatrix mit eingelagerten Leuzitkristallen. Die Kristalle beeinflussten nicht nur die optischen Eigenschaften des Materials, sondern auch den Wärmeausdehnungskoeffizienten (WAK). Allerdings zeigte sich bei der Metallkeramikkrone bald ein Nachteil, und zwar, dass sich der Randbereich am marginalen Gingivasaum dunkel färbte. Dieser dunkle Bereich schränkte die Ästhetik der Kronen erheblich ein.

Daraus entwickelte sich der Wunsch nach mehr Ästhetik, nach günstigem Zahnersatz ohne teure Edelmetalle und vor allem nach einer hohen Biokompatibilität. Aufgrund der genannten Nachteile, kam es zur Entwicklung verschiedener vollkeramischer Systeme. Inzwischen ist es möglich, vollkeramische Inlays, Veneers, Kronen und dreigliedrige Brücken herzustellen, die hohe Ansprüche erfüllen.

### 2.2.1 Aktueller Stand der Dentalkeramiken

Die Dentalkeramiken werden in zwei übergeordnete Gruppen unterteilt:

Die Silikatkeramiken, die mehrphasig sind und einen hohen Glasanteil besitzen, und die Oxidkeramiken, die einphasig sind und einen geringen Anteil an einer Glasphase besitzen. Die Silikatkeramiken unterteilen sich nochmals in die Feldspat- und Glaskeramiken. Die Feldspatkeramiken bestehen aus einer ca. 70 %-igen Verbindung aus Kieselsäure in Kombination mit Basen wie Kali, Natron, Eisen oder Tonerde. Feldspat dient aufgrund seines niedrigen Schmelzpunktes als Flussmittel innerhalb des keramischen Systems und beeinflusst zusätzlich die Transparenz der Keramik. Ein weiterer Bestandteil ist Quarz, welcher chemisch als Kieselsäure ( $\text{SiO}_2$ ) bezeichnet wird und mit seiner kristallinen Struktur einen großen Einfluss auf die Festigkeit der Keramik hat.

Die Feldspatkeramiken sind ursprünglich aus dem Geschirrporzellan abgeleitet worden, hierzu gehören die gebräuchlichen Verblendkeramiken. Demgegenüber stehen die Glas- und Silikatkeramiken neuerer Generation, bei denen eine amorphe Struktur durch einen kontrollierten Prozess teilweise auskristallisiert wird. Dadurch reduziert sich der Anteil der Glasmatrix zu Gunsten von kristallinen Anteilen und die Keramik wird so besser stabilisiert. Das bedeutet, je mehr Kristalle vorhanden sind, desto stabiler ist die Keramik.

Die Oxidkeramiken teilen sich ebenfalls in zwei Gruppen auf:

Die glasinfiltrierten Keramiken, die eine geringe Glasphase besitzen und die polykristallinen Oxidkeramiken, die keine Glasphase besitzen und ein gleichmäßiges

Gefüge haben. In Abbildung 3 werden die einzelnen Gruppen nochmals in einer Übersicht gezeigt.



Abbildung 3: Einteilung der Keramischen Gruppen [aus Pospiech et al. 2004]

Alle Keramiken haben die Eigenschaft, dass sie auf Druck höher belastbar sind als auf Zug oder Biegung. Die Zug–Biegebelastung ist somit die erste kritische Größe die in speziellen Prüfverfahren ermittelt wird. Bei einer gegebenen chemischen Zusammensetzung und Struktur wird die Biegefestigkeit durch Größe und Anzahl der Defekte bestimmt bzw. kontrolliert, also je größer und häufiger ein Defekt auftritt umso niedriger ist die Biegefestigkeit. Die Biegefestigkeit ist abhängig von der Materialdefektverteilung, die Streuung des Materialdefekts wird als Weibull–Modulus bezeichnet. Je größer die Streuung, desto kleiner ist der Weibull–Modul. Die Biegefestigkeit wird daher auch als Weibullfestigkeit angegeben [Pospiech et al. 2004].

Die Materialdefekte können sich sowohl an der Oberfläche wie auch im Volumen der Keramik befinden. So fungieren Defekte oder Poren an der Oberfläche der Keramik als Rissursprünge welche bei entsprechender Belastung weiterwachsen können

*[Pospiech et al. 2004]*. Unter Einfluss von Feuchtigkeit wird diese Entwicklung begünstigt. Deshalb ist es wichtig, eine möglichst perfekte Oberflächenqualität durch Brennen oder einer Politur zu erreichen, um die effektive Oberfläche so klein wie möglich zu lassen. Dies ist wichtig, damit die Festigkeit der Keramik bewahrt wird. Hierbei werden auch zwei Phänomene unterschieden, die die Festigkeit der Keramik herabsetzen können. Man unterscheidet den Rebinder-Effekt, der besagt, dass oberflächenaktive Flüssigkeiten die mechanische Festigkeit von Festkörpern herabsetzen können. Dies funktioniert so, dass Flüssigkeiten in Mikrorisse eindringen und einen nach innen gerichteten Druck erzeugen, der zur Vergrößerung bestehender Risse beiträgt. Daher kann Speichel ebenfalls rissfördernd wirken *[Pospiech et al. 2004]*.

Der zweite Effekt ist die Spannungskorrosion, die das Wachsen von Rissen in silikatischen Werkstoffen, die unter Zugspannung stehen, fördert. In die durch Zugspannung geöffneten Risse dringt Feuchtigkeit hinein und spaltet die Bindungen der Siliziumoxiddtetraeder an der Risspitze. Aus diesem Grund kann auch unter relativ geringer Belastung eine keramische Arbeit über die Zeit geschädigt werden oder versagen. Deshalb muss es das Ziel sein, Glasschwächen oder Glasanteile weitestgehend im Gerüst zu vermeiden und Oberflächendefekte durch Politur oder einer gebrannten Oberfläche zu versiegeln *[Pospiech et al. 2004]*.

Ein weiterer Parameter, der die Festigkeit der Keramik beurteilt, ist die Bruchfestigkeit. Die Bruchfestigkeit wird an Kronen und Brücken gemessen, wobei die Proben bis zum Bruch belastet werden. Die Belastungen werden in Newton gemessen, sind von Methode zu Methode unterschiedlich, so dass kein werkstofftypischer Wert entsteht.

Die Risszähigkeit hingegen beschreibt die Fähigkeit der Keramik, Risse an ihrem Fortschreiten zu hindern. Je langsamer ein Riss wächst, der unter Zugspannung gerät, umso günstiger ist dies für die Langzeitfestigkeit. Daher spielt der Spannungsintensitätsfaktor eine wichtige Rolle, welcher angibt, bei welcher Spannung sich ein Riss der Länge nach erweitert. Der kritische Spannungsintensitätsfaktor stellt den Wert dar, bei dem instabiles Risswachstum auftritt. Das bedeutet, dass der Riss auch durch Entlastung nicht mehr am Fortschreiten gestoppt werden kann.

Die Keramiken werden nicht nur nach ihrer Anfangsfestigkeit gemessen und beurteilt, sondern auch wie sie sich unter dem Einfluss von Belastung und Zeit verändern. Dafür wird eine bruchstatistische Vergleichsgröße über ein sogenanntes S (strength), P (probability), T (time) – Diagramm ermittelt. Die Vergleichsgröße dient zum Abschätzen des Dauerfestigkeitspotenzials und der Bewertung von unterschiedlichen keramischen Materialien [Pospiech et al. 2004]. Für den Erfolg einer keramischen Arbeit sind diese Faktoren, also die Oberflächenqualität, Bruchfestigkeit, Weibullfestigkeit (Biegefestigkeit), Weibull-Modul, Dauerfestigkeit und die Risszähigkeit von enormer Bedeutung. Hieraus entwickelt sich der Gedanke, die Keramik so homogen wie möglich herzustellen, damit sich der Anwender über die Konstanz der Biegefestigkeit sicher sein kann. Hier setzt die CAD/CAM-Technologie an, die durch industrielle und standardisierte Verfahren die bestmögliche Werkstoffqualität zu erzielen versucht. Das Prinzip ist, dass aus einem industriell gefertigten Keramikblock, der höchste Gefügequalität bietet, der Zahnersatz in einer standardisierten gleichmäßigen Materialverarbeitung hergestellt wird. Zuvor wird das Sägemodell mittels Scanner erfasst und der Zahnersatz im Computer konstruiert. Weitere Herstellungsverfahren sind zum Beispiel: die Presstechnik beim Empress-System, bei der eine leuzitverstärkte Glaskeramik verwendet wird. Die Restauration wird in der „Lost-Wax“-Technik hergestellt, wobei die bei 1100° C erweichte Keramik mit passender Farbe mit 3,5 bar in die Hohlform gepresst wird. Der Rohling wird anschließend bemalt oder mit Feldspatkeramik verblendet. Mit diesem Verfahren können Inlays, Verblendschalen, Onlays und Kronen hergestellt werden [Schwickerath 1992].

Im Gegensatz zur Presstechnik ist die neu entwickelte Gusstechnik mit der Dicor-Glaskeramik die erste fließfähige Keramik. Zur Festigkeitssteigerung wird bei dieser Keramik Glas mit Magnesiumfluorid verunreinigt, so dass nach einer als Keramisierung bezeichneten Wärmebehandlung eine Glaskeramik mit nur noch 45% Glasanteil entsteht. Die Restauration wird durch Gießen von Glasrohlingen im Lost-Wax-Verfahren hergestellt [Schwickerath 1992].

In der Schichttechnik (Sintertechnik) wird die Optec-Keramik verwendet, die eine Feldspatkeramik ist. Eine Festigkeitssteigerung wird durch die Leuzitkristalle bewirkt. Durch einen abschließenden Glasbrand wird bei der Verblendkeramik, ein Ausbreiten

von Rissen verhindert. Die Herstellung erfolgt durch ein schichtweises Aufbrennen der Keramik auf feuerfesten Stümpfen.

Eine weitere Keramik in der Schichttechnik ist die Miragè-Keramik, eine Feldspatkeramik, verstärkt mit hochverdichteten Zirkonoxidfasern. Problematisch bei beiden Keramiken, ist die Inhomogenität der Faserverteilung und die daraus resultierenden Festigkeitsunterschiede.

Bei der Glasinfiltrationstechnik, wie es bei dem In-Ceram- und dem Spinell-System angewendet wird, entsteht die Restauration in zwei Schritten. Aluminiumoxid wird auf dem feuerfesten Stumpf aufgeschlickt und einem Sinterbrand ausgesetzt. Im nächsten Schritt wird das Gerüst im Glasinfiltrationsbrand mit Lanthan-Silikat-Glas infiltriert. Hierdurch entsteht eine innige Verbindung zwischen der kristallinen und der amorphen Phase, was eine Festigkeitssteigerung bewirkt. Der Unterschied der beiden Keramiken ist, dass bei dem Spinell-System als kristalline Phase nicht reines Aluminiumoxid verwendet wird, sondern dieses mit Magnesiumoxid gemischt ist, um die Transluzenz zu erhöhen [Creugers et al. 1992b; Kistler 1998].

Zu den abtragenden Systemen gehört das Celay-System, das auf der Kopierfräsung beruht. Basierend auf die CAD/CAM-Technologie gibt es verschiedene Systeme die sich durch die Formgebung unterscheiden. Die Formgebung der Restauration aus industriell hergestellten Keramikrohlingen kann sowohl vor als auch nach der Sinterung der Oxidkeramik erfolgen. Man unterscheidet die Grünbearbeitung (Cercon Base, Lava Frame, Procera AllCeram), die vor der Dichtsinterung der Keramik erfolgt, von der Weißbearbeitung (In-Ceram Alumina, In-Ceram Zirconia, YZ-Cube), bei der der Rohling in einem vorgesintertem Zustand bearbeitet wird. Die Hartbearbeitung (Digizon, Everest Z-Blank, DC-Zirkon) bezieht sich auf die endgültig dichtgesinterte Keramik. Der Nachteil der Hartbearbeitung ist der höhere Zeit- und Arbeitsaufwand beim Schleifen der Rohlinge mit diamantierten Schleifkörpern. Zudem besteht die Gefahr, dass durch die Bearbeitung der dichtgesinterten Rohlinge, Oberflächen- und Gefügedefekte entstehen. Dies wirkt sich negativ auf die Dauerfestigkeit der Keramik aus. Es ist eine sinnvolle Alternative die Keramikrohlinge im Grünzustand zu bearbeiten. Den Grünzustand erreichen die Keramikrohlinge indem sie thermisch vorbehandelt werden, wodurch die Eigenfestigkeit erhöht wird.

Bei der Berechnung der Gerüstkonturen muss berücksichtigt werden, dass im nachfolgenden Sinterprozess eine Schrumpfung von 20 – 25% eintritt. Diese Schrumpfung muss bereits beim Schleifen der Grünkörper berücksichtigt werden, damit eine Passgenauigkeit am Rand der Krone zwischen 50 und 100  $\mu\text{m}$  erreicht wird [Kurbad und Reichel 2004; Pospiech et al. 2004; Suttor et al. 2001].

### 2.3 Werkstoffkundliche Grundlagen von Zirkoniumoxid

Zirkoniumoxid (synonym = Zirkonoxid) kommt abhängig von der Temperatur in drei Modifikationen vor.

Bei einer Temperatur von 1170 °C ist die monokline Gitterstruktur stabil. Bei steigender Temperatur wandelt sich diese in eine tetragonale Struktur um und bleibt bis zu einer Temperatur von 2370 °C bestehen. Oberhalb dieser Temperatur liegt die kubische Kristallstruktur bis zu einem Schmelzpunkt von 2680 °C. Für die Zahnmedizin ist besonders die Phasenumwandlung von der tetragonalen zur monoklinen Form bedeutsam. Die Phasenumwandlung wird auch als die sogenannte t/m Umwandlung bezeichnet, also die Umwandlung von der tetragonalen zur monoklinen Form und erfolgt bei einer Abkühlung auf Zimmertemperatur mit einer Volumenvergrößerung von 3 – 5 %. Abbildung 4 zeigt graphisch die Umwandlung oder Phasentransformation des Zirkonoxids.

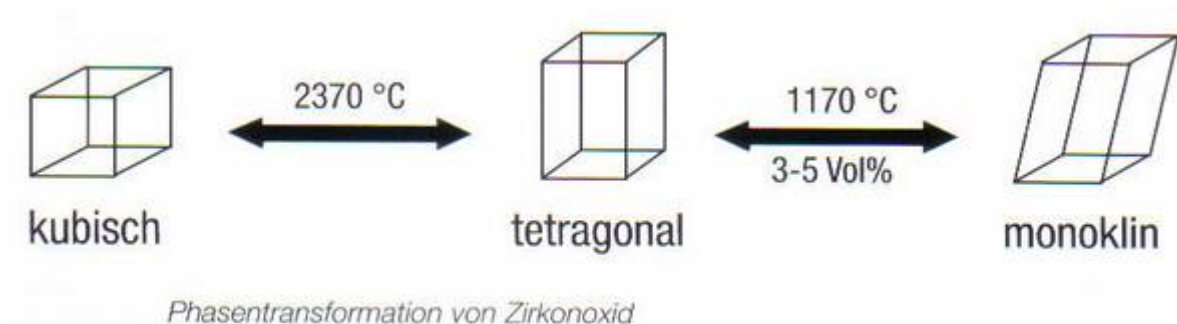


Abbildung 4: Phasentransformation von Zirkonoxid [aus Pospiech et al. 2004]



Bei reinem Zirkoniumoxid führt diese Volumenvergrößerung zu unerwünschten Rissbildungen im Keramikgefüge. Andererseits kann dieser Effekt auch positiv genutzt werden um eine Festigkeitssteigerung von Zirkoniumoxid, wie es in der Zahnmedizin genutzt wird, zu erreichen. Grundlage dieses Konzepts ist die in weiten Bereichen gegebene Löslichkeit einiger oxidischer Verbindungen in Zirkoniumoxid, die zu einer Stabilisierung der tetragonalen Kristallphase führt und hierdurch die kritische  $t/m$  Umwandlung unterdrückt [Pospiech et al. 2004]. Diese Oxide werden im Kristallgitter des Zirkoniumoxids eingebaut und liegen nicht als isolierte Oxidkristalle neben den Zirkonoxidkristallen vor. Die wichtigsten Oxide, die zur Stabilisierung von Zirkonoxid eingesetzt werden, sind Magnesiumoxid (MgO), Calciumoxid (CaO), Yttriumoxid (Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) und Ceroxid (CeO<sub>2</sub>). Letztendlich hat sich die Dotierung mit Yttriumoxid am besten bewährt, weil sie zur Bildung von mechanisch hochbelastbaren Zirkonoxidkeramiken führt. Abhängig von Art und Gehalt an oxidischen Verbindungen lassen sich verschiedene Zirkonoxidkeramiken unterscheiden. Das vollstabilisierte Zirkonoxid (FSZ: Fully Stabilized Zirconia) wird durch Zugabe von Fremdoxiden in der kubischen Form bis auf Raumtemperatur stabilisiert, dabei wird die  $t/m$  Umwandlung umgangen. Dem FSZ gegenüber ist beim teilstabilisierten Zirkonoxid (PSZ: Partially Stabilized Zirconia) die Menge der Fremdoxide so weit verringert, dass neben der kubischen Form auch die umwandlungsfähige tetragonale Form des Zirkonoxids vorliegt. Beim Abkühlen wandelt sich diese weiter in die monokline Form um. Somit besteht teilstabilisiertes Zirkonoxid aus der kubischen, tetragonalen und monoklinen Form. Untersuchungen haben gezeigt, dass die mechanischen Eigenschaften von Zirkonoxid linear mit dem Gehalt an verbleibender tetragonaler Phase gesteigert werden können [Pospiech et al 2004; Kurbad und Reichel 2004]. Daraus entwickelte sich ein Zirkonoxid mit weniger als 5 Gew.-% (~ 3 mol-%) Yttriumoxid, das vollständig aus tetragonaler Phase besteht. Diese Werkstoffklasse wird auch als tetragonaler Zirkonoxid Polykristall (TZP: Tetragonal Zirconia Polycrystals) oder bei der Dotierung mit Yttriumoxid als Y-TZP bezeichnet. In der Zahnmedizin wird ausschließlich tetragonales Zirkonoxid Polykristall in der Form von Y-TZP eingesetzt. Das Y-TZP hat mit einer Biegefestigkeit von 900 MPa und einer Härte von 1200 HV hervorragende mechanische Eigenschaften. Eine weitere Eigenschaft bietet Y-TZP,

um die Entstehung von festigkeitsmindernden Rissen und deren Wachstum vorzubeugen. Diese Eigenschaft beruht auf dem Konzept der Phasentransformationsfestigung, welche auf zwei Mechanismen zurückzuführen ist. Zum einen kann eine spontane t/m Umwandlung von Zirkonoxidteilchen die Bildung von feinen Mikrorissen in der Umgebung hervorrufen, die auf dem größeren Volumen der monoklinen Kristallform beruht. Ein sich ausbreitender Riss läuft sich dann in den Mikrorissen tot oder wird an den Zirkonteilchen abgelenkt. Die t/m Umwandlung kann auch durch eine Zugspannung, die an jeder Risspitze vorherrscht, induziert werden. Dabei vermindern die vorliegenden Zugspannungen den Matrixdruck auf die umgebenden Zirkonteilchen und begünstigen somit die t/m Umwandlung. Da die monokline Kristallform ein größeres Volumen hat, führt dies im Keramikgefüge zu lokalen Druckspannungen, die das weitere Risswachstum durch das Zusammendrücken der Rissflanken erschweren. Also besitzt das Y-TZP eine gewisse Schadenstoleranz, die nicht so empfindlich auf oberflächliche Defekte reagiert. Natürlich darf hier die kritische Rissgröße nicht überschritten werden, da sonst das Versagen der Keramik nicht zu vermeiden ist.

Der Phasentransformationseffekt und die fehlende Glasphase bewirken, dass das Y-TZP auch ein viel besseres Langzeitverhalten gegenüber herkömmlichen Dentalkeramiken zeigt. Aufgrund dessen ist es nicht nur möglich, einfache Kronen und Adhäsivbrücken mit ästhetisch sehr gutem Ergebnis herzustellen, sondern auch drei- bis fünfgliedrige Brücken. Bei den Brückengerüsten ist es wichtig die Konnektorstärke, also die Verbindungsstellen zwischen den Gliedern in ausreichender Dimensionierung zu gestalten. Die Hersteller geben unterschiedliche Werte an, die in Laborstudien festgelegt wurden. Im Allgemeinen wird empfohlen die Querschnittsflächen der Brückengerüste in vertikaler-ovaler Form zu wählen. Die Konnektorstärke für dreigliedrige Brücken sollte im Frontzahnbereich bei 7 mm<sup>2</sup> und im Seitenzahnbereich bei 9 mm<sup>2</sup> liegen. Hingegen sind bei viergliedrigen Brücken im Seitenzahnbereich (zwei Zwischenglieder) hintereinander 9 – 12 – 9 mm<sup>2</sup> erforderlich. Bei fünfgliedrigen Brücken (drei Zwischenglieder) sollte die Konnektorfläche 11 mm<sup>2</sup> betragen [Guggenberger 1989; Kern 2005a; Luthardt 2005; Pröbster 2002; Pospiech et al. 2004; Rinke 2006].

## 2.4 Grundlagen zum Verbund zwischen Zahnhartsubstanz und Kleber

Die Einführung der Schmelz-Ätz-Technik durch *Buonocore [1955]*, ermöglichte die Anwendung von Kompositen als Füllungsmaterialien.

Die Systeme und Techniken sind weiter entwickelt worden und zeigen einen außerordentlich guten Verbund zum Schmelz bzw. zum Dentin.

Bei den gängigen Techniken, werden Schmelz- sowie Dentinkonditionierung vorgenommen. Die Schmelzkonditionierung bewirkt eine bessere Benetzbarkeit, eine Oberflächenvergrößerung sowie ein Mikroretentionsrelief [*Buonocore 1955*]. Aus diesem Grund kommt es zu einem verbesserten Kontakt zwischen Komposit bzw. Kompositkleber und Zahnhartsubstanz. Beim Ätzen geht eine Schmelzschicht von ca. 10 µm irreversibel verloren, geätzt wird mit Phosphorsäure. Es bildet sich ein Ätzmuster, wobei man hier drei verschiedene Muster unterscheidet. Beim ersten Ätztyp, werden die Schmelzprismen angelöst, beim zweiten wird die Peripherie, also der zwischenprismatische Schmelz angelöst. Das dritte Ätzmuster besteht aus einer Kombination der beiden, das jedoch eine geringere Retentionswirkung hat.

Die Ätztiefe liegt bei 30 – 50 µm. Wird nun diese veränderte Schmelzoberfläche mit einem niedrigviskösen Kompositmaterial, wie es Kleber sind, oder auch mit Schmelzvermittler (Bonding) benetzt, so dringen diese in die schwammartigen Strukturen ein und haften mikromechanisch an der Zahnhartsubstanz aufgrund von rheologischer und geometrischer Effekten. Die so geschaffene Verbindung Schmelz-Kompositzement erreicht Haftwerte von ca. 20 MPa [*Craig 1989; Janda 1992; Kistler 1998*]. Die Dentinkonditionierung verläuft etwas anders, da die chemische und strukturelle Zusammensetzung des Dentins, wie Dentinkanälchen mit Dentinliquor, organischen Bestandteilen und die Smear-Layer (Schmierschicht), eine mikromechanische Haftung eines hydrophoben Kompositzements nicht zulässt. Es werden Dentinhaftvermittler benutzt, bestehend aus hydrophilen Monomeren, Dimethacrylaten und Aldehyden (Primer). Diese Monomerbestandteile sind meist bivalent, das heißt, sie besitzen sowohl hydrophile als auch hydrophobe Gruppen, die eine Verbindung zwischen dem hydrophilen Dentin und dem hydrophoben

Adhäsiv ermöglichen. Diese infiltrieren die durch Säureätzung freigelegte Schmier- schicht und gehen eine Verbindung mit dem oberflächlich freigelegten Kollagen des Dentins ein. Nach dem Auftragen des Dentinadhäsivs (verschiedene Monomere), bildet sich eine Hybridschicht zwischen hydrophilen Monomeren und dem Kollagen des Dentins aus. Es entstehen zudem „tags“ in den Dentintubuli [Strub et al. 2003; Way Ming Tay 1995]. Tags sind ausgehärtete Zapfen von Primer und Teilen des Dentinadhäsivs in den Dentinkanälchen [Hellwig et al. 1999]. Die Haftung der Dentinadhäsive liegt primär an der Ausbildung einer mikromechanischen Retention im Bereich des intertubulären Dentins und nicht an der Ausbildung der „tags“ in den Dentinkanälchen. Mittlerweile hat sich die „Total-etch-Technik“ etabliert, bei der zuerst der Schmelz und dann das Dentin angeätzt werden und schließlich das Dentinadhäsivsystem aufgetragen wird. Auf dem Markt gibt es viele verschiedene Dentinadhäsivsysteme, die in kleinen Dosierflaschen angeboten werden. Es gibt Mehrflaschensysteme und Systeme, bei denen Ätzelgel, Primer und Adhäsiv gemeinsam in einer Dosierflasche vereint sind. Bei den Klebern ist es meist eine Dosierflasche, die das Adhäsiv beinhaltet, womit man die Zahnoberfläche konditioniert. Es handelt sich meist um eine hydrophile Flüssigkeit, die den Verbund zur Zahnoberfläche gewährleistet. Mittlerweile werden Produkte angeboten, die sogar auf die Ätzung und auf Haftvermittler ganz verzichten, dazu gehört das in dieser Studie benutzte Rely X Unicem von Espe. Dies bedeutet für den Praktiker einen erheblichen Zeitvorteil und eine einfache Handhabung des Klebers.

#### 2.4.1 Grundlagen zum Verbund zwischen Kleber und Zirkoniumoxid

Damit optimale Verbundfestigkeitswerte erreicht werden, muss das Zirkonoxid vorbehandelt werden. Anders als die Silikatkeramiken, besitzt Zirkonoxid keine Glasphase und lässt sich daher nicht anätzen [Derand und Derand 2000; Kern et al. 1991; Kern 2002; Pospiech et al. 2002; Piwowarczyk und Sorensen et al. 2002]. Um einen ausreichenden Verbund zu gewährleisten, können zwei Verfahren angewendet

werden, die die Arbeitsgruppe von *Kern et al.* angibt [*Friedrich und Kern 2002; Kern und Wegner 2000b und 1998; Kern et al. 1991 und 1994*]. Eines der Verfahren ist die Sandstrahlung (oder Korundstrahlung), wobei anschließend eine Verklebung mit modifizierten Bis-GMA (Bisphenol-A-Glycidylmethacrylat) Klebern erfolgen sollte. Diese enthalten eine reaktionsfreudige Phosphatgruppe, die die Silikatschicht gleichermaßen ersetzt [*Kern et al. 1991; Kern und Wegner 2000b; Kern und Thompson 1996; Pospiech et al. 2002*]. Da Zirkonoxid nur einen sehr geringen bis gar keinen Anteil an Silikat besitzt, aber diese Silikatschicht in der Regel bei den glashaltigen Keramiken für den chemischen Verbund sorgt, muss sie durch Alternativen ersetzt oder aufgebracht werden. Das Auftragen der Silikatschicht auf Zirkonoxid-Keramiken erfolgt z.B. mittels tribochemische Silikatisierung nach dem Rocatec-Verfahren. Hierbei wird zunächst die Oberfläche des Zirkonoxid mit Rocatec Pre gereinigt (Korund der Größe 110µm) und aufgeraut. Anschließend erfolgt mit dem Spezialstrahlmittel Rocatec Plus der wesentliche Teilschritt. Rocatec Plus enthält neben Korund geeignete schichtbildende Zusätze. Die auf die Keramikoberfläche auftreffenden Partikel werden abgebremst, ihre kinetische Energie wird in lokal sehr hohe Wärmeenergie umgewandelt, wodurch die im Strahlgut mitgeführten Siliziumpartikel mit der Keramikoberfläche verschmelzen und so eine Silikatschicht bilden [*Behr und Rosentritt 2000; Kern 2002*]. Abbildung 5 zeigt eine Schematische Zeichnung des Haftverbundes. Das Zirkonoxid ist mit dem Rocatec-System silikatisiert und mit dem Kompositkleber verklebt.

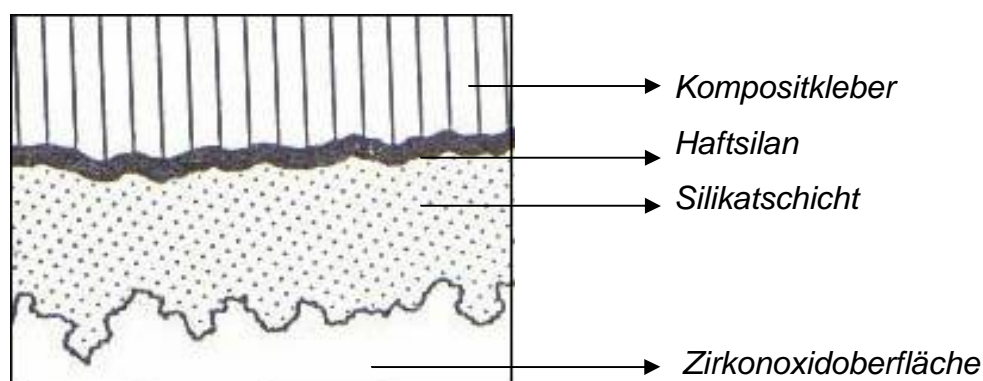


Abbildung 5: Schematischer Aufbau des Schichtsystems des Rocatecverfahrens

Die Schichtdicken sind nicht maßstäblich, die Silikatschicht ist zwischen 0,1 und 1 µm dick, die Silanschicht ist wenige Moleküllagen und der Kleber ca. 100 µm dick [Guggenberger 1989]. Nach der Silanisierung mittels einer speziellen Silanflüssigkeit, ist die Oberfläche des Zirkonoxids soweit konditioniert, dass sie eine chemische Bindung mit der Polymermatrix des Kompositzements eingeht.

Die Silane sind als polyfunktionelle Siliziumwasserstoffe chemisch zwischen anorganischen und organischen Verbindungen angesiedelt und eignen sich deshalb als Haftvermittler zwischen silikatisierter Keramikoberfläche und organischem Adhäsiv. Bei der Silanisierung der Keramikoberfläche reagieren die siliziumfunktionellen Gruppen mit den Hydroxylgruppen der Silikatmatrix unter Kondensation von Wasser, während zwischen Organogruppen des Silans und dem Kunststoffadhäsiv eine Polymerisationsreaktion über ungesättigte Doppelbindungen erfolgt [Hahn und Löst 1996; Müller 1988].

Bei dieser Konditionierungsart ist die Verwendung eines Kompositkleber auf Basis von Phosphatmonomeren nicht unbedingt nötig, ein dualhärtender Bis-GMA-Zement ist sicherlich auch ausreichend. Die Haftwerte des zu erreichenden Keramik – Kunststoff-Verbundes sind für beide Systeme so hoch, dass die Werte für den Verbund Schmelz – Komposit und sogar die Eigenfestigkeit der Zahnhartsubstanz übertroffen werden kann [Guggenberger 1989; Otto 1995; Praxis der Zahnheilkunde 2, 1999].

### 3 Material und Methode

#### 3.1 Prüfkörperherstellung

Bei der vorliegenden In-Vitro Untersuchung wird Zirkonoxid als Prüfkörper-Material mit drei verschiedenen dualhärtenden Kompositklebern verklebt, um anschließend im Zugscherversuch zu ermitteln, wie hoch die Verbundfestigkeit der Kleber ist. Der Zugscherversuch wurde zunächst nach 24 Stunden und dann nach 90 Tagen Wasserlagerung der verklebten Prüfkörper durchgeführt. Im Langzeitversuch über 90 Tage wurden jeweils nach 30 und 60 Tagen 2500 Temperaturzyklen durchgeführt. Bei dem hier verwendeten Zirkonoxid handelt es sich um LAVA™ von der Firma 3M Espe, es hat folgende technische Daten [3M ESPE 2005]:

Tabelle 1: Technische Daten von LAVA–Zirkonoxid

Biegefestigkeit (Punsch Test) (ISO 6872)	>1100 MPa
Weibullfestigkeit (s0) (3-Punkt)	1345 MPa
Beanspruchbarkeit (2% / 5 Jahre)	615 MPa
E-Modul (E)	205 MPa
Weibull Modul (m)	10,5
Risskoeffizient (n)	50
Risszähigkeit (KIC)	5-10 MPa m <sup>1/2</sup> (je nach Messmethode)
WAK	10 ppm
Vickershärte (HV 10)	1250
Schmelzpunkt	2700°C
Korngröße	0,5 µm
Dichte (O)	6,08 g/cm <sup>3</sup>
Löslichkeit (ISO 6872)	0 µg/ cm <sup>2</sup>

Die Herstellung der Prüfkörper wurde in Anlehnung an die Arbeit von *Stark et al. [1992]* und an die *DIN 53281 Teil 2*, durchgeführt. Bevor die Prüfkörper in Serie produziert werden konnten, sind vorab Zugscherversuche durchgeführt worden, um festzustellen, ob die Form der Prüfkörper, wie sie in Abbildung 6 dargestellt ist, den einwirkenden Kräften standhalten kann und nicht zu brechen droht. Die Konstruktion der Prüfkörper ist durch die Klebevorrichtung eingeschränkt. Das bedeutet, dass die Prüfkörper nicht dicker als 2,5 mm sein dürfen, da sie sonst nicht in die Klebevorrichtung passen. Die Stärke der Prüfkörper reicht allerdings nicht aus, um den einwirkenden Kräften während des Zugscherversuchs standzuhalten. Eine neue Konstruktion der Prüfkörper hatte zur Folge, dass die Klebevorrichtung modifiziert werden musste. Abbildung 6 zeigt die Konstruktionszeichnung der Prüfkörper.

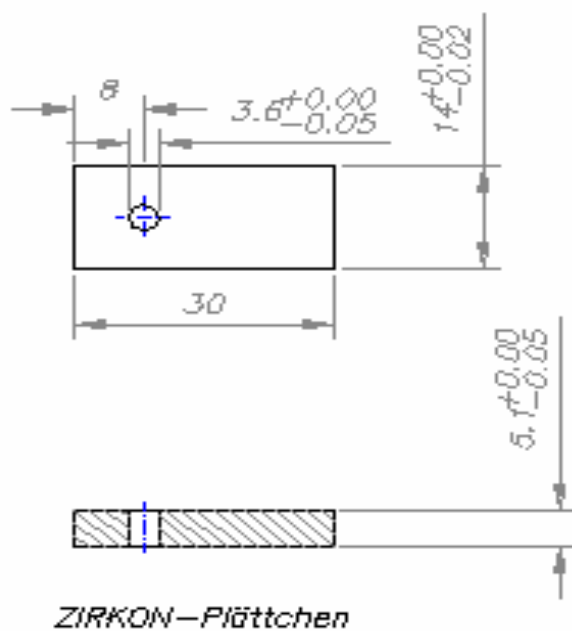


Abbildung 6: Konstruktionszeichnung der Prüfkörper, Oberflächen und Seitenansicht  
[Grüner, Universität Bonn]

Da die Zirkon-Plättchen nach dem CAD/CAM-Verfahren hergestellt wurden, mussten aus technischen Gründen Toleranzwerte angegeben werden, weil dies der Fräscomputer verlangte. Die anschließende Messung der Plättchen hat ergeben, dass sie in der Breite genau 14 mm und in der Höhe genau 5 mm groß sind.



Der kreisrunde Ausschnitt bildet die Bohrung für die Stahlstifte, die die verklebten Prüfkörper an den dafür konstruierten Adapter befestigen, um den Zugscherversuch durchführen zu können. Aus versuchsökonomischen Gründen sind für den Versuch 60 einzelne Prüfkörper hergestellt worden. Pro Kleber stehen für zwei Vorbehandlungsarten 20 Prüfkörper zur Verfügung und somit 5 Abzugsversuche pro Kleber mit entsprechender Vorbehandlung.

### 3.2 Prüfkörpervorbehandlung

Die Vorbehandlung der Prüfkörper ist in Anlehnung an die *DIN 53281 Teil 1*, auf zwei Arten durchgeführt worden. Vor der eigentlichen Konditionierung und der direkten Verklebung wurden die Prüfkörper zunächst für 5 Minuten in ein Ultraschallbad, das mit destilliertem Wasser gefüllt und auf 40°C gewärmt ist, gelegt. Anschließend erfolgte eine Reinigung unter kaltem fließendem Wasser. Die nassen Prüfkörper wurden mit ölfreier Luft aus dem Luftbläser getrocknet und in einer mit Alkohol desinfizierten Laborschale bis zur eigentlichen Vorbehandlung aufbewahrt.

Die Konditionierung der Prüfkörper erfolgte mit dem Rocatec<sup>TM</sup>, ein Korundstrahlgerät der Firma Espe. Die erste Konditionierungsart ist die Korundstrahlung, die mit Rocatec-Pre<sup>TM</sup>, einem hochreinem Korund der Körnung 110 µm, durchgeführt wurde. Die Prüfkörper wurden im Abstand von ca. 10 mm 13 Sekunden lang bei 2,5 bar bestrahlt [Guggenberger 1989]. Danach wurden die Prüfkörper wieder mit ölfreier Luft gesäubert und direkt verklebt.

Bei der zweiten Konditionierungsart ist in gleicher Weise vorgegangen worden. Nach der Korundstrahlung mit Rocatec-Pre<sup>TM</sup> wurden die Prüfkörper mittels tribochemische Beschichtung nach dem Rocatec-Verfahren silikatisiert, welches durch Bestrahlung mit Rocatec-Plus<sup>TM</sup> erfolgte. Anschließend wurden sie wieder mit ölfreier Luft gesäubert und mit Espe Sil<sup>TM</sup> bepinselt, wodurch eine Silanschicht aufgetragen wurde. Nach Trocknung der Flüssigkeit ist die Klebung durchgeführt worden. Die gleichen Prüfkörper wurden nach durchgeführtem Zugscherversuch für

die zweite Abzugsserie, der 90 Tage Wasserlagerung und Temperaturwechsellast, erneut verklebt. Die Prüfkörper wurden, bevor sie zur Reinigung ins Ultraschallgerät gelegt wurden, mit 110 µm Korundstrahlung bei 3 bar von Kleber und Kleberrückständen befreit. Danach erfolgte in analoger Weise wie vor der künstlichen Alterung und Temperaturwechsellast die Vorbehandlung und Reinigung der Prüfkörper sowie die anschließende Verklebung. Dabei wurden für die Prüfkörper immer die gleichen Kleber benutzt.

### 3.3 Verklebung der Prüfkörper

In dem Versuch wurden verschiedene Kleber benutzt um sie miteinander zu vergleichen, wurde die Verklebung in Anlehnung an die *DIN 53281 Teil 3*, *DIN 53283* und die *DIN EN 1465* durchgeführt. Dadurch lief die Verklebung standardisiert ab, ein Vergleich der Messresultate nach dem Zugscherversuch ist zulässig. Für die standardisierte Verklebung wurde eine Klebevorrichtung benutzt, die zwei Ebenen und pro Ebene jeweils 5 Führungsnute hat. Abbildung 7 zeigt die Klebevorrichtung.

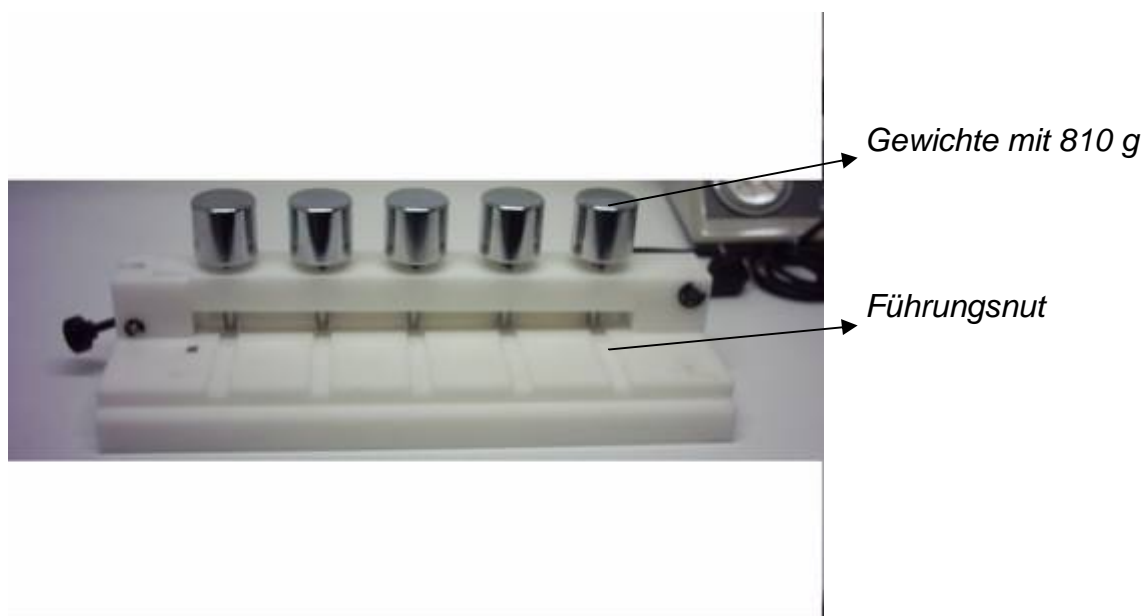


Abbildung 7: Klebevorrichtung (geschlossen)

Die Ebenen haben einen Niveauunterschied von 5 mm, um eine überlappende Klebung zu ermöglichen. Jede Nut hat eine Breite von  $14 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$ , die tiefer liegende Ebene hat eine Führungsrille von 5 mm Höhe, die obere Ebene eine Führungsrille von 2,5 mm Höhe. Durch diesen Ebenenunterschied trifft der Prüfkörper, der auf der oberen Ebene liegt, genau auf die Anschlagleiste des Schwenkbocks und wird so fixiert. Der Prüfkörper, der unten liegt, wird durch den Ebenenunterschied fixiert, somit wird eine überlappende Klebung von 4 mm erreicht. In Abbildung 8 wird dies schematisch dargestellt.

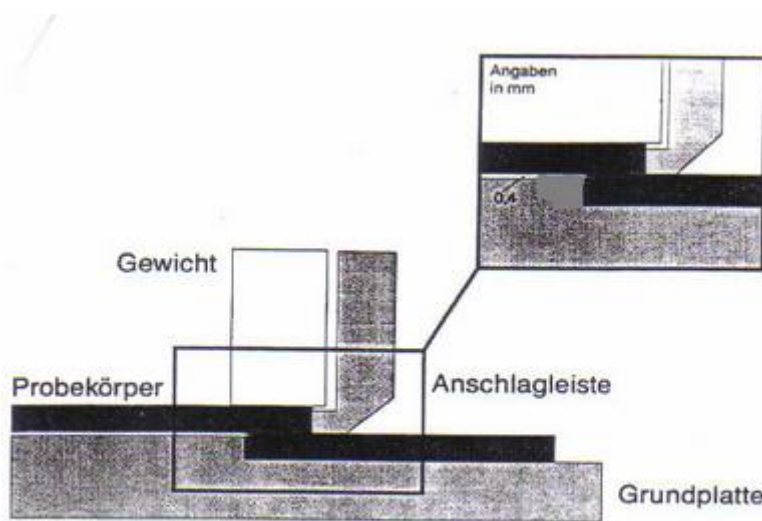


Abbildung 8: Überlappende Klebung der Prüfkörper [aus Stark und Holste 1992]

Die Prüfkörper liegen nicht starr in der Führungsrille. In dem Vergrößerungsausschnitt (Abb.8) erkennt man zwischen dem Prüfkörper und der Grundplatte einen Freiraum von 0,4 mm. Nach der überlappenden Verklebung der Prüfkörper wird ein Gewicht von 810 g (Abb.7), welches genau auf die Klebefläche zentriert ist, auf die Prüfkörper herabgelassen. Um zu gewährleisten, dass die Prüfkörper sich durch das Einwirken des Gewichtes frei zentrieren können, muss dieser Freiraum vorliegen. So erhält man eine überlappende präzise Klebung von  $4 \times 14 \text{ mm}$ , ohne ein Verkanten der Prüfkörper. Die Gefahr besteht, dass der Stempeldruck des Gewichtes durch ein Verkanten der Prüfkörper ungleichmäßig verteilt wird und deshalb der Kleber nicht korrekt auf die Klebefläche verteilt wird.

Durch die unregelmäßige Verteilung des Klebers auf die Klebefläche erhält man keine gleichmäßige Kleberfugenstärke und somit keine standardisierte Klebefläche von 56 mm<sup>2</sup>. Ein Schwenkbock sichert die Führung der Anschlagleiste, die in einem Aufnahmebock einrastet und mit einer Schraube verriegelt wird. Alle Kleber wurden auf den Prüfkörper aufgebracht, der sich auf der unteren Ebene befindet.

Da 5 Führungsrillen vorliegen, wurden auch direkt die 5 Klebung der jeweiligen Gruppen durchgeführt. Die Verarbeitungszeit der Kleber erlaubt dieses Vorgehen bei einer Zimmertemperatur von ca. 22°C. Alle verklebten Prüfkörper wurden 15 Minuten in der Klebevorrichtung belassen, bevor sie entfernt wurden. Die aufgetragenen Kompositkleber wurden nicht über Licht gehärtet, sondern es fand eine sogenannte Dunkelhärtung (chemische Härtung) statt. Die 15 Minuten Liegezeit der verklebten Prüfkörper in der Klebevorrichtung liegen über der Aushärtungszeit der Herstellerangaben für die Kleber. Daher kann man davon ausgehen, dass das Entfernen der Prüfkörper aus der Klebevorrichtung die Polymerisation der Kleber nicht manipuliert bzw. die Polymerisation der Kleber schon abgeschlossen ist. Der Zugscherversuch wurde nach 24 Stunden  $\pm$  2 Stunden nach Verklebung der Prüfkörper durchgeführt. Ebenfalls wurden die Prüfkörper erst 24 Stunden  $\pm$  2 Stunden bei Zimmertemperatur aufbewahrt, bevor sie in das Wasserbad bei 37°C gelegt wurden, um die simulierte Alterung vorzubereiten.

Die Kompositkleber, die in der Studie benutzt wurden, sind dualhärtend und werden auf verschiedener Weise angemischt. Panavia F 2,0 wurde auf einem Anmischblock im Verhältnis 1:1 ca. 20 Sekunden lang mit einem Kunststoff-Spatel angemischt und mit diesem auf den Prüfkörper aufgebracht. Anschließend wurde Oxyguard über die Verklebung aufgetragen, um eine anaerobe Umgebung zu erhalten. Wenn Panavia Kontakt mit Luft hat, kann es nur mit Hilfe ultravioletten Lichts aushärten.

Bifix QM befindet sich in einer Mischkanüle und wird direkt auf den Prüfkörper aufgebracht. Die ersten paar Millimeter des Klebers wurden verworfen.

Rely X™ Unicem befindet sich in einer Kapsel (Aplicap-Kapseln). Diese Kapsel wird in einem Aktivator mittels eines Aktivierungshebels bis zum Anschlag heruntergedrückt und in dieser Position für 2 Sekunden gehalten, anschließend im Rotomix (Firma Espe) für 10 Sekunden angemischt und danach in den Applier gegeben, um den Kleber über die Applikationsdüsen auf den Prüfkörper zu geben.

Die technischen Daten der Kleber werden in Tabelle 2 angezeigt [3M ESPE–Rely X – Unicem Produktdossier 2003; Kuraray–Panavia F 2,0 Produktinformation 2005; Voco–Bifix QM Produktinformation 2005].

Tabelle 2: Technische Daten der Kompositkleber

	RelyX Unicem	Panavia F 2,0	Bifix QM
Löslichkeit in $\mu\text{g}/\text{mm}$	- 4	1,49	4
Radiopazität in (mm)	2	0,9	keine Angabe
Biegefestigkeit in (Mpa)	$63 \pm 7$	$86 \pm 17$	101
Druckfestigkeit in (Mpa)	$241 \pm 9$	300	297
Härtungstiefe (mm)	2,5	0,7	4
Wasseraufnahme ( $\mu\text{g}/\text{mm}^3$ )	25	18,7	praktisch 0%

Diese Zahlen beziehen sich auf die Hersteller–Angaben. Die Vorbereitung und die Durchführung des Versuchs ist in Anlehnung an die DIN Nummern 53281 Teil 1 bis 3, DIN 53283, 53285, 53286 und 53287 sowie die EN 1465 durchgeführt worden.

### 3.4 Versuchsdurchführung und Zugscherversuch

Der Zugscherversuch wurde mit einer Universalprüfmaschine (Zwick 1445/Ulm) durchgeführt. Die verklebten Prüfkörper wurden in eigens dafür entwickelte Adapter eingespannt und in einer kardanischen Aufhängung mit vier Gelenken in die Prüfmaschine aufgehängt. Die Aufhängung ist somit flexibel, die Prüfkörper können sich optimal in der Längsachse bzw. in alle Raumebenen ausrichten um mögliche Scherkräfte zu reduzieren und kippende Kräfte zu vermeiden.

Abbildung 9 zeigt in einer Übersichtsaufnahme die Prüfmaschine mit eingehängten Prüfkörpern. Abbildung 10 ist ein vergrößerter Ausschnitt, wobei die Prüfkörper in den Adaptern abgebildet sind.

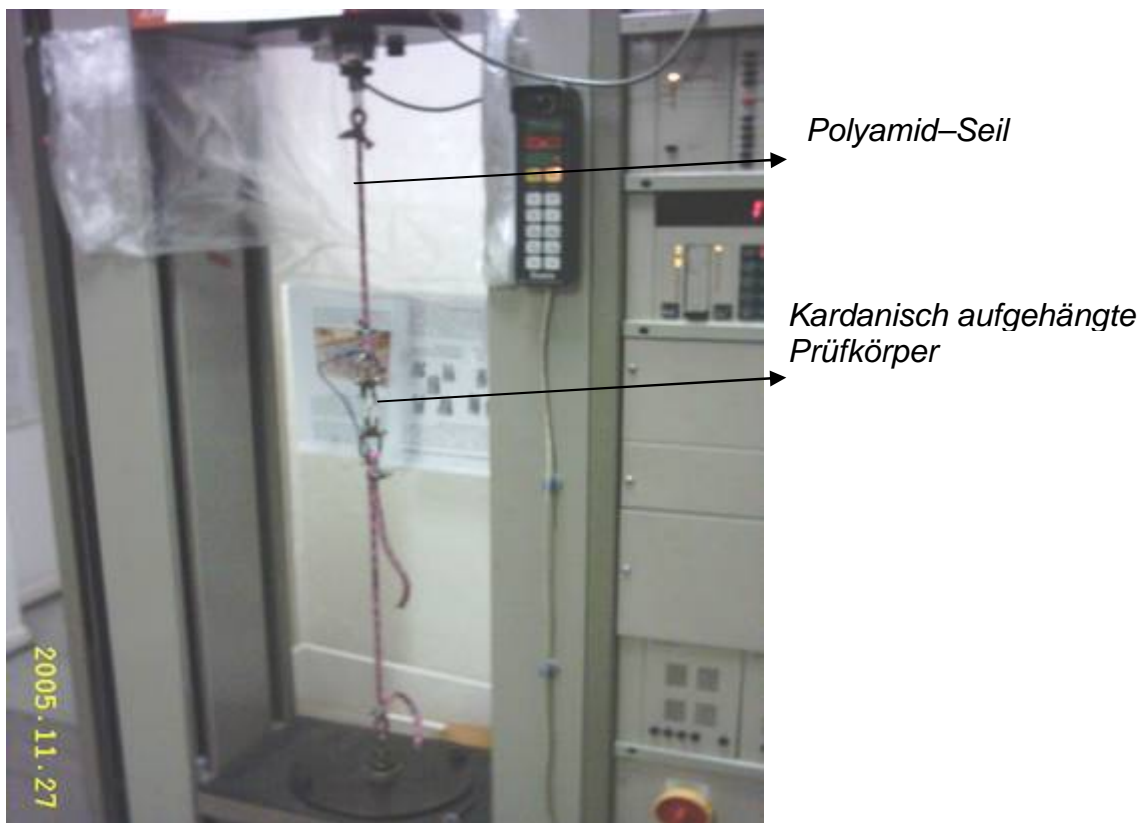


Abbildung 9: Überblick über die Kardanische Aufhängung der Prüfkörper in der Universalprüfmaschine

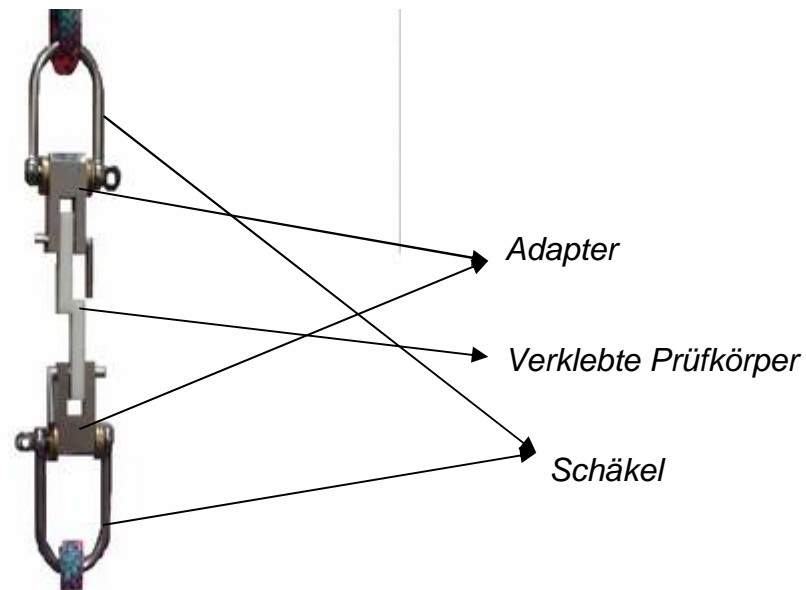


Abbildung 10: Vergrößerter Ausschnitt der verklebten Prüfkörper

Die Adapter wurden mittels Schäkel, die eine Belastung von 1000 kg aushalten, mit den Polyamid-Seilen verbunden.

Abbildung 11 und 12 zeigen eine Skizze von der Aufhängung der Prüfkörper in den Adaptern und von den Adaptern selbst.

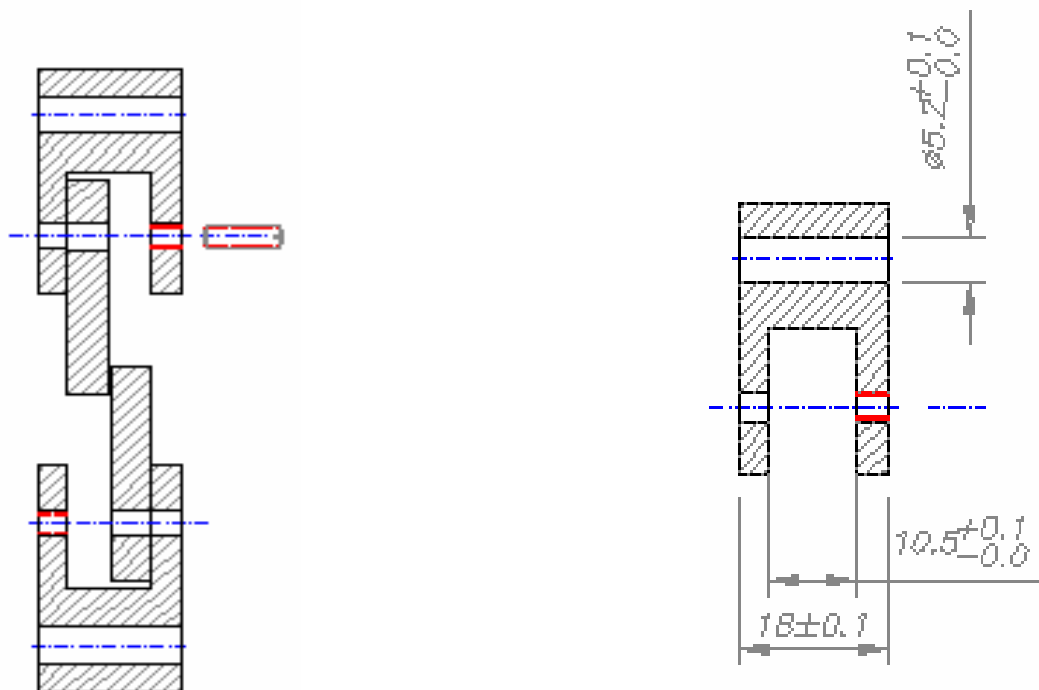


Abb. 11: Skizze der Kardanischen Aufhängung [Grüner]

Abb. 12: Skizze des Adapters [Grüner]

Um den Versatz der überlappenden Klebung zu kompensieren, ist eine flexible Aufhängung gewählt worden. Die kardanische Aufhängung wurde durch 30 cm lange Einfachseile an jeder Seite (Abbildung 9) angebracht. Das Seil besitzt eine Kernmantelkonstruktion und besteht aus Polyamid, mit einem Durchmesser von 9,8 mm.

Die Universalprüfmaschine wurde folgender Weise eingestellt:

Die Vorlaufgeschwindigkeit betrug 50 mm/min und die Prüfgeschwindigkeit 20 mm/min. Die Vorlaufgeschwindigkeit ist die Geschwindigkeit, mit der die Prüfmaschine bis zu einer einwirkenden Kraft von 20 N die verklebten Prüfkörper belastet. Danach erfolgte der eigentliche Abzugsversuch mit einer Prüfgeschwindigkeit von 20mm/min, bis die Verklebung versagte.

### 3.5 Temperaturwechsellast

Die Prüfkörper wurden 24 Stunden nach ihrer Verklebung in einem 37°C warmen Wasserbad aufbewahrt. Nach 30 Tagen wurden die Prüfkörper aus dem Wasserbad entnommen und in das Temperaturwechsellast-Gerät gestellt. Per hydraulischen Arm wurden die Prüfkörper, die in einem entsprechend perforierten Behälter waren, von den 5°C Becken in das 55°C Becken transportiert. Die Verweilzeit in jedem Becken betrug 27 Sekunden, der Wechsel erfolgte innerhalb von 3 Sekunden. Es wurden 2500 Zyklen absolviert. Nach den Temperaturzyklen wurde der Behälter mit den verklebten Prüfkörpern in das 37°C warme Wasserbad gestellt.



Abbildung 13 zeigt die Temperaturwechsellastapparatur.

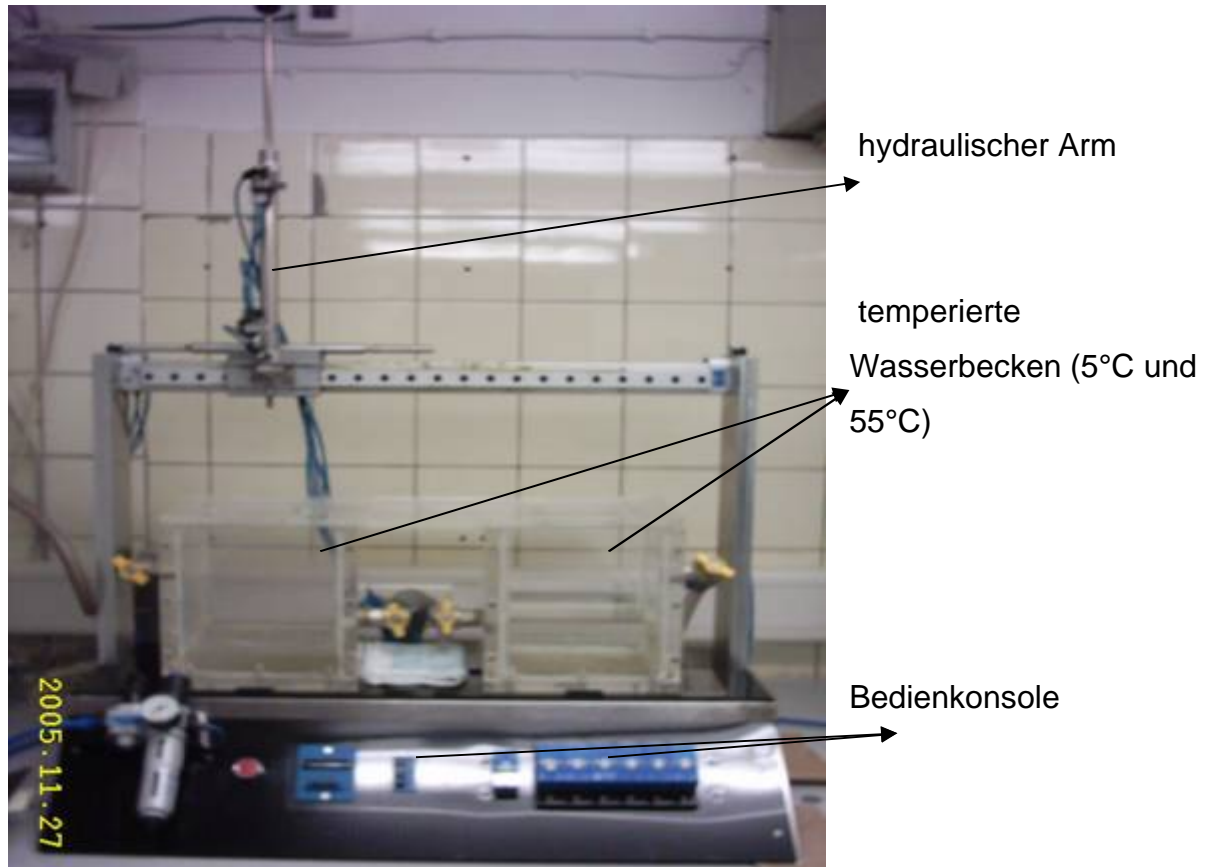


Abbildung 13: Temperaturwechsellastapparatur und ihre jeweils temperierten Becken, im linken 5°C und im rechten Becken 55°C.

Nach 60 Tagen wurden weitere 2500 Zyklen durchgeführt, somit waren die Prüfkörper insgesamt 5000 Zyklen ausgesetzt. Nach weiteren 30 Tagen im Wasserbad wurden die Prüfkörper heraus genommen und der Abzugsversuch gestartet. Die Wasserlagerung, die die Alterung simulierte, betrug insgesamt 90 Tage.

## 4 Ergebnisse

Es werden insgesamt 12 Prüfkörper-Gruppen unterschieden, die jeweils eine Kennung haben. Die Kennung besteht aus 3 Zeichen und beschreibt mit „**A**“, dass die Prüfkörper keiner Wasserlagerung und keiner Temperaturwechsellast (TWL) ausgesetzt waren, also keine künstliche Alterung simuliert wurde. Mit „**B**“ wird beschrieben, dass die Prüfkörper einer Wasserlagerung sowie einer Temperaturwechsellast ausgesetzt waren, also eine künstliche Alterung simuliert wurde. Die Zahlen an zweiter Stelle in der Kennung beschreiben, um welchen Kleber es sich handelt. Die „**1**“ steht für Bifix QM, die „**2**“ steht für Panavia F 2,0 und die „**3**“ steht für Rely X Unicem. Das letzte Zeichen in der Kennung beschreibt die Vorbehandlungsart, so steht „**a**“ für die Vorbehandlung mit Korund und „**b**“ für die Konditionierung mit dem Rocatec-System. Als Beispiel sei die Gruppe 1 mit der Kennung A.1.b genannt. Das „**A**“ sagt aus, dass die Prüfkörper keiner Wasserlagerung und keiner Temperaturwechsellast ausgesetzt waren. Die „**1**“ steht für Bifix QM und das „**b**“ sagt aus, dass die Prüfkörperoberfläche mit dem Rocatec-System konditioniert wurde.

### 4.1 Haftfestigkeitswerte bei Bifix QM ohne und nach Langzeitlagerung mit thermischer Wechsellast

In jeder Prüfkörper-Gruppe wurden 5 Abzugsversuche durchgeführt, jeder Abzugsversuch erhält zur Unterscheidung seiner Vorbereitungsmaßnahmen eine Kennung. Die Gruppen 1 und 2 zeigen die Werte für Bifix QM ohne Wasserlagerung und ohne Temperaturwechsellast (TWL) an, die Kennung dafür ist *A*. In Gruppe 1 wurde die Zirkonoxidoberfläche mit Korund gestrahlt (Kennung = *a*) und in der Gruppe 2 wurde die Zirkonoxidoberfläche mit dem Rocatec-System konditioniert (Kennung = *b*). In den Gruppen 3 und 4 wurden die Prüfkörper im Wasser gelagert und der Temperaturwechsellast ausgesetzt. Die Kennung für die Wasserlagerung und der Temperaturwechsellast ist das *B*, wobei in der Gruppe 3 die Prüfkörperoberfläche mit Korund und in der Gruppe 4 die Prüfkörperoberfläche mit

dem Rocatec-System bestrahlt wurde. In der Tabelle 3 werden die Abzugswerte für Bifix QM dargestellt.

*Tabelle 3: Abzugswerte der Prüfkörper für die Verklebung mit Bifix QM*

Gruppe	Kennung	Wert in N/mm <sup>2</sup>	Gruppe	Kennung	Wert in N/mm <sup>2</sup>
1	A.1.a	8,03	3	B.1.a	0
1	A.1.a	8,1	3	B.1.a	0
1	A.1.a	9,5	3	B.1.a	0
1	A.1.a	15,84	3	B.1.a	0
1	A.1.a	18,87	3	B.1.a	0
2	A.1.b	20,24	4	B.1.b	23,02
2	A.1.b	19,59	4	B.1.b	24,06
2	A.1.b	28,02	4	B.1.b	24,67
2	A.1.b	25,39	4	B.1.b	22,85
2	A.1.b	24,08	4	B.1.b	15,67

Legende für die Kennung:

*A = ohne Wasserlagerung und Temperaturwechsellast*

*B = mit Wasserlagerung und Temperaturwechsellast*

*1 = Bifix QM*

*a = Korundstrahlung*

*b = Rocatec-Konditionierung*

Die folgende Abbildung 14 zeigt im Säulendiagramm alle Abzugswerte für Bifix QM auf einen Blick. Die Legende zu den Abkürzungen ist in Tabelle 3 dargestellt.

Die Werte für die Gruppe 3 (Kennung = B.1.a) wurden mit „Null“ beschrieben, da die Verklebungen der Prüfkörper sich während der simulierten Alterung gelöst haben.

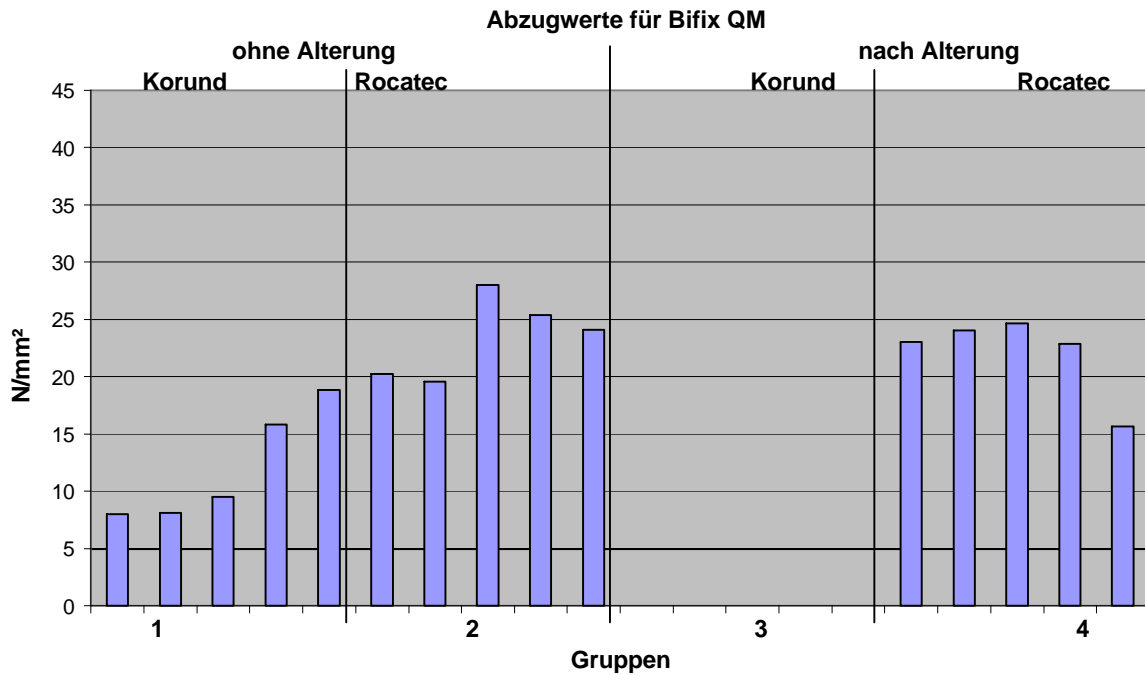


Abb. 14: Graphische Darstellung der Abzugswerte für Bifix QM

Die Ergebnisse wurden mittels SPSS 14.0 statistisch ausgewertet, die Tabelle 4 zeigt die Ergebnisse mit ihren Kenngrößen.

Tabelle 4: Statistische Auswertung der Bifix QM–Abzugswerte

Gruppe	N	Mittelwert	Standard– abweichung	Minimum	Median	Maximum
1	5	12,068	4,978	8,03	9,5	18,87
2	5	23,464	3,544	19,59	24,08	28,02
3	5	0	0	0	0	0
4	5	22,054	3,647	15,67	23,02	24,67

Aus der Grafik (Abb.14) bzw. aus den Tabellen (3 und 4) kann man erkennen, dass die höchsten Werte in Gruppe 2 liegen, also der Gruppe ohne Wasserlagerung und ohne Temperaturwechsellast und Rocatec als Konditionierungsverfahren (Kennung = A.1.b). Ebenfalls sind die Werte nach Temperaturwechsellast mit Rocatec als Vorbehandlungsmaßnahme höher als die einfache Korundstrahlung, sei es mit oder ohne Temperaturwechsellast. Die Mittelwerte für Gruppe 2 und 4 (mit Wasserlagerung und mit TWL, Konditionierung mit Rocatec, Kennung = B.1.b) sowie

deren Mediane liegen nah bei einander, was für die Reproduzierbarkeit des Versuchs spricht. Auch die Standardabweichung spricht dafür und zeigt, dass sich die Werte um den Mittelwert häufen. Aus der Auswertung kann man entnehmen, dass durch die Konditionierung mit dem Rocatec-System die Werte von Bifix deutlich erhöht werden. In der Gruppe 3 (nach Wasserlagerung und mit TWL, Vorbehandlung mit Korund (Kennung=B.1.a)) haben sich die verklebten Prüfkörper während der Wasserlagerung voneinander gelöst, es ist nicht ersichtlich, zu welchem Zeitpunkt sie sich gelöst haben, da die Prüfkörper zu keiner Zeit aus dem Temperaturwechsellast-Behälter entfernt wurden. Dies lässt schließen, dass durch Wasseraufnahme des Klebers sich der Verbund gelöst hat und somit eine einfache Korundstrahlung des Zirkonoxids als Vorbehandlung nicht ausreicht.

Man muss anmerken, dass Bifix QM für keramische Werkstoffe ein Bonding einsetzt. Dieses „Ceramic-Bond“ wurde hier nicht benutzt, da es für die Anwendung auf hochfester Oxidkeramik nicht konzipiert ist. Das „Ceramic-Bond“ ist für die Konditionierung von Silikatkeramiken geeignet. Beim Rocatec-System ist das „Espe-Sil“ benutzt worden, da es zum Verfahren dazugehört, bzw. durch die tribochemische Silikatisierung eine Benetzung mit Silan-Flüssigkeit und hierdurch eine Silanisierung möglich wird.

#### 4.1.1 Bruchflächenanalyse bei BIFIX QM mit den dazugehörigen rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen und Abzugsdiagrammen

Die Bruchart der Klebung wird unterschieden in adhäsiven (Bruchverlauf über 75% an der Grenzfläche der Keramik / Kleber) und kohäsiven (Bruchverlauf über 75% innerhalb des Klebers) Bruchverläufen sowie Mischbrüchen. Die Oberflächenanalyse bzw. die Bruchart wurde mittels einer 15 fachen Vergrößerung mit dem Rasterelektronenmikroskop (Philips® XL 30) durchgeführt.

Die Abbildungen 15 und 16 zeigen exemplarisch für Bifix QM den Bruch des Klebeverbundes mit dem entsprechenden Prüfkörpergegenstück.

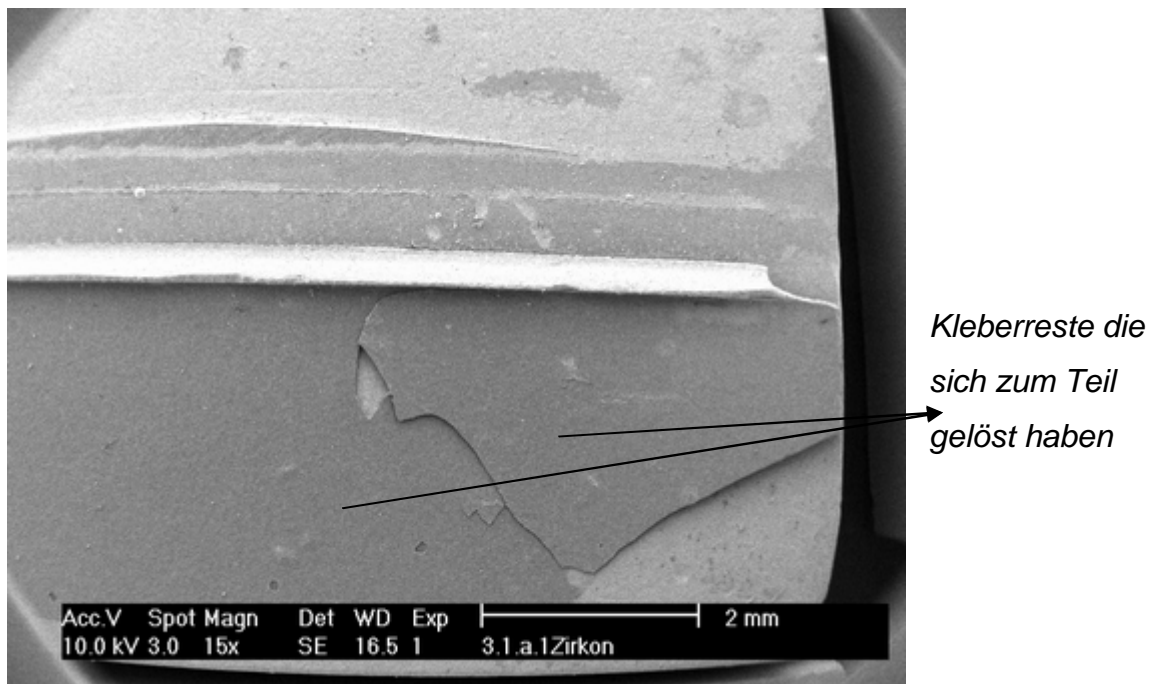


Abb.15: Gr.1 Korundgestrahlte Prüfkörperoberfläche nach Alterung / Beispiel für einen kohäsiven Bruch (exemplarisch)

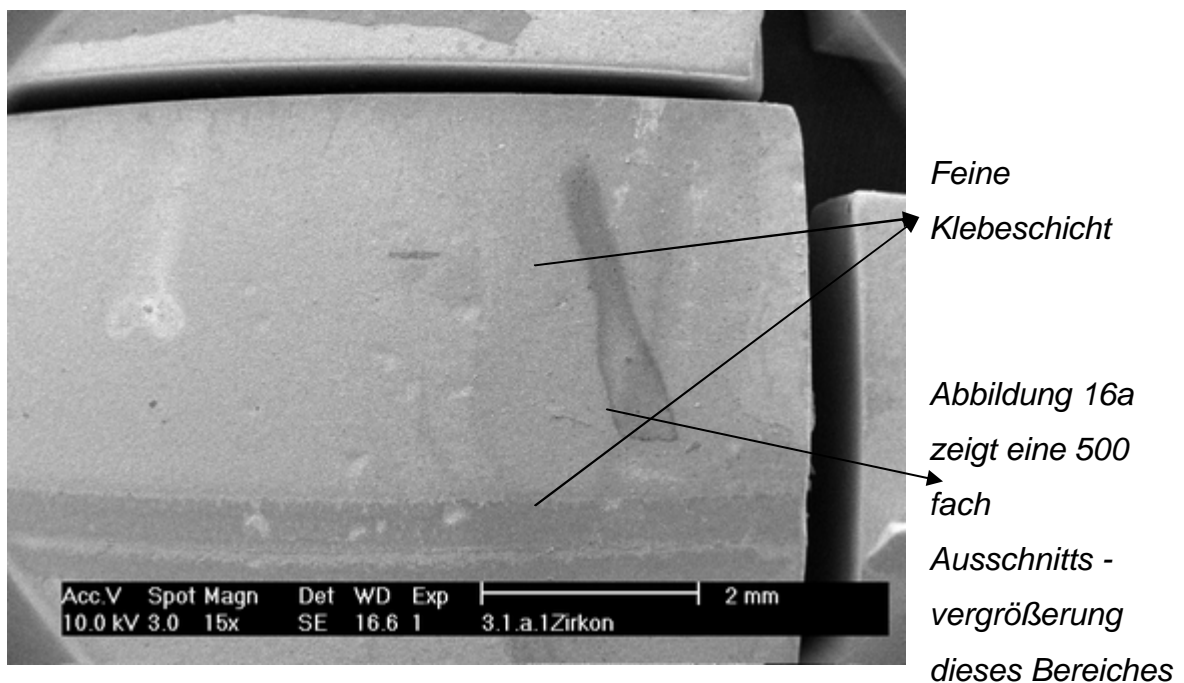


Abb. 16: Gegenstück von Abbildung 15

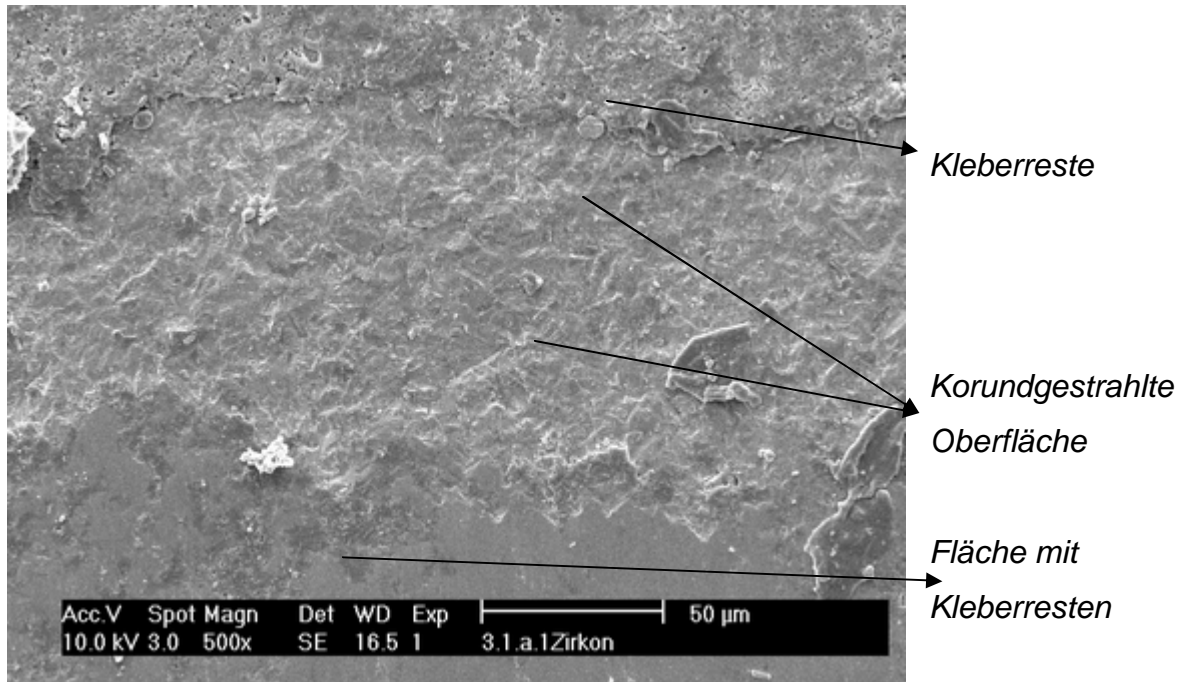


Abb. 16a: Ausschnittsvergrößerung von Abbildung 16; 500-fach

In den Gruppen 1 – 4, in denen mit Bifix verklebt wurde, sind überwiegend adhäsive Brüche aufgetreten. Eine Übersicht aller Brucharten der verschiedenen Kleber ist in Abbildung 17 dargestellt. Die Kennungen sind analog zu den Kennungen aus den Tabellen 3, 5 und 7.

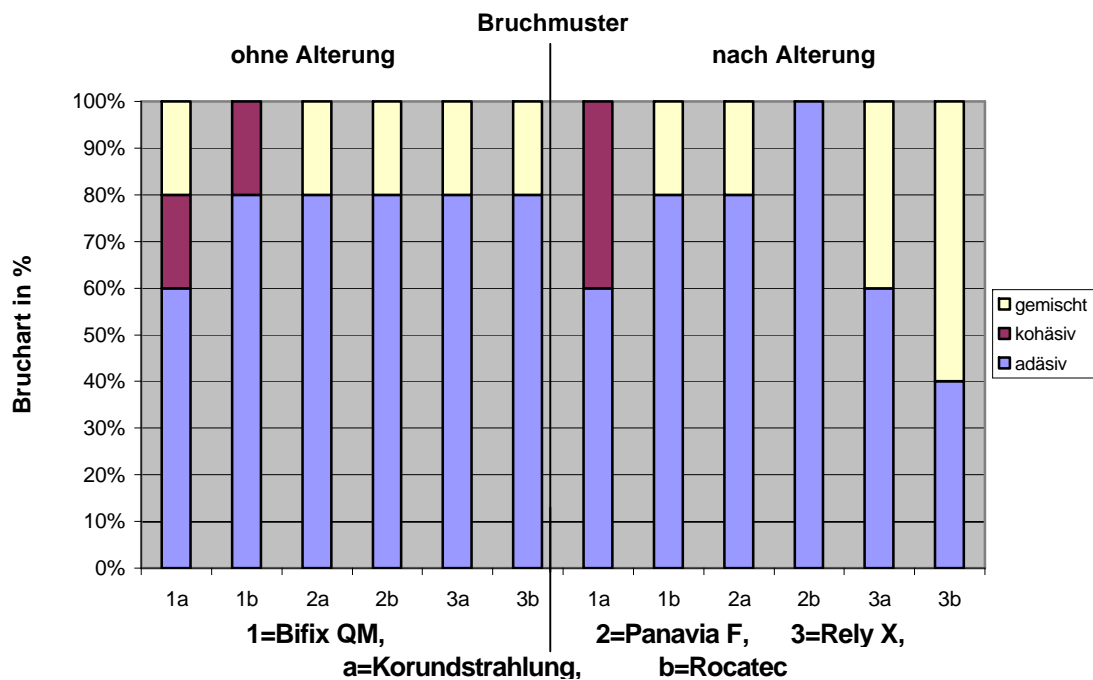
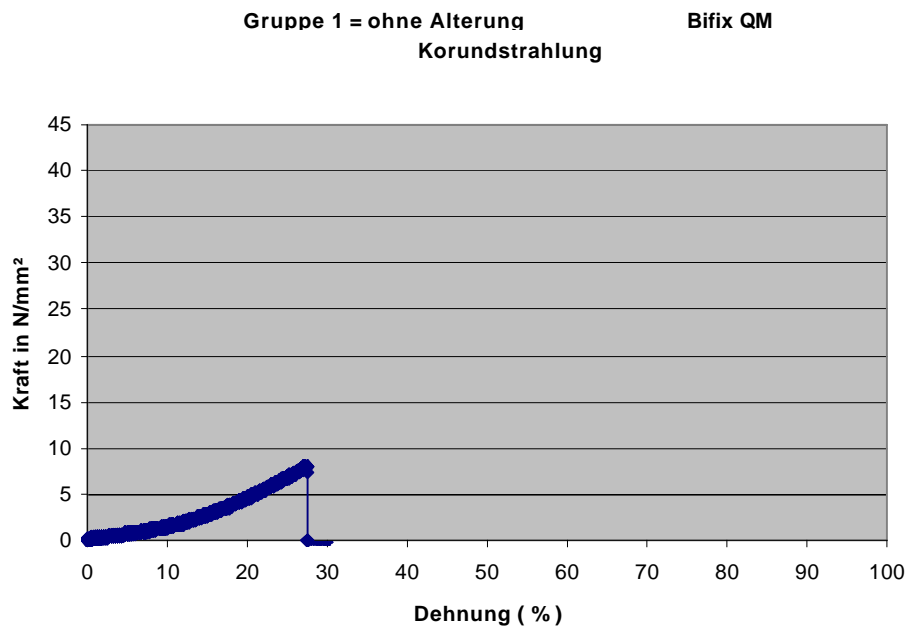


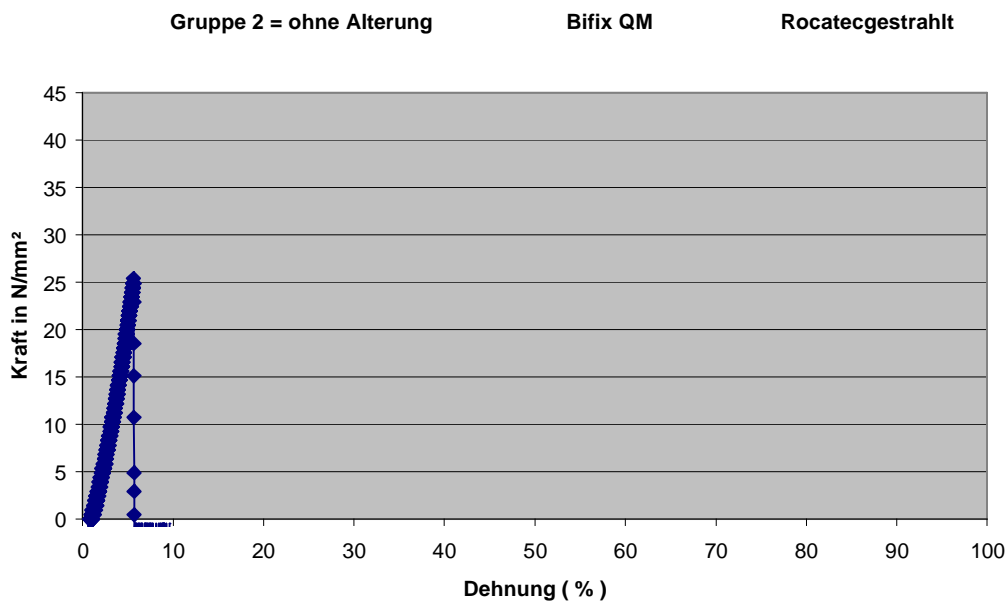
Abb. 17: Graphische Darstellung der Bruchmuster für alle Kleber

Die nächsten Abbildungen (Abb. 18–20) zeigen exemplarisch die Abzugsdiagramme für die Gruppen 1 bis 4. Die folgende Abbildung zeigt das Diagramm für Gruppe 1.



*Abb. 18: Abzugsdiagramm Gruppe 1 (ohne Alterung, mit Korund vorbehandelt, exemplarisch)*

Die nächste Darstellung zeigt das Abzugsdiagramm der Gruppe 2, in der Bifix QM verklebt wurde und die Prüfkörperoberfläche mit dem Rocatec-System konditioniert wurde. Es fand keine Wasserlagerung mit TWL statt.



*Abb. 19: Abzugsdiagramm Gruppe 2 (ohne Alterung, mit Rocatec vorbehandelt, exemplarisch)*



In der nächsten Abbildung ist das Abzugsdiagramm für Gruppe 4 (mit Wasserlagerung und mit TWL, Konditionierung mit Rocatec) dargestellt. Da sich in Gruppe 3 alle Verklebungen gelöst haben, gibt es kein Abzugsdiagramm.

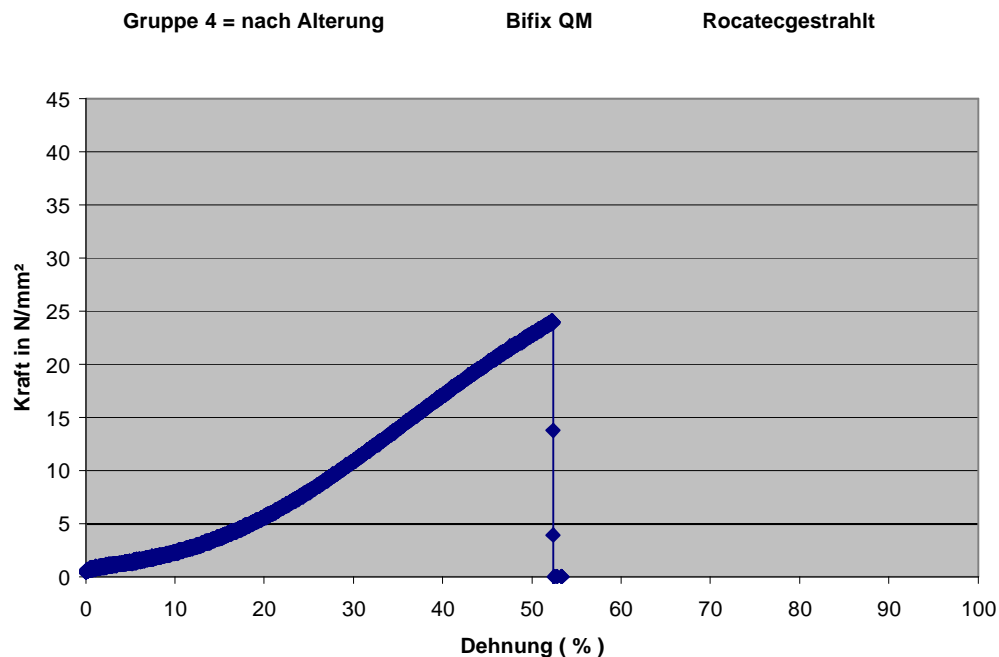


Abb. 20: Abzugsdiagramm der Gruppe 4 (nach Alterung, mit Rocatec vorbehandelt, exemplarisch)

Die Dehnung auf der X-Achse beschreibt den Weg bis zum Bruch der verklebten Prüfkörper. Dieser Weg ist abhängig von der Kraftankopplung an der Prüfmaschine. Durch die kardalische Aufhängung mittels Polyamid-Seilen, ist die Kraftankopplung durch eine weiche Kräfteinleitung charakterisiert, die eine entsprechende prozentuale Dehnung widerspiegelt. Dementsprechend wird der Abzugswert nicht beeinflusst, weil er lediglich die Elastizität der Seile und die Ausrichtung der Prüfkörper im Raum darstellt. Die folgenden Darstellungen (Abbildungen 21 bis 27) zeigen rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen, zunächst von einer unbehandelten Zirkonoxidoberfläche (Abb. 21). Die Abbildungen 22 und 23 stellen dagegen konditionierte Oberflächen dar, einmal korundgestrahlt und nach dem Rocatec-System vorbehandelt. Abbildung 21 ist eine 1000-fache Vergrößerung der Zirkonoxidoberfläche, die unbearbeitet ist und so aussieht, als käme sie mit dieser Oberflächenbeschaffenheit aus der Fräsmaschine. Man erkennt kleine Partikel, die das dichtgesinterte Gefüge darstellen. In Abbildung 22 sieht man die korundgestrahlte

Oberfläche mit 1000-facher Vergrößerung. Man erkennt keine feine Strukturierung wie in Abbildung 21, diese Strukturierung scheint aufgelöst zu sein, was durch die Bestrahlung mit Korund bewirkt wurde. Durch die Bestrahlung ist eine Oberflächenvergrößerung verursacht worden. Abbildung 23 zeigt eine 1000-fache Vergrößerung der mit Rocatec vorbehandelten Oberfläche, ebenfalls ist die durch die tribochemische Silikatisierung aufgebrachte Silikatschicht zu erkennen.

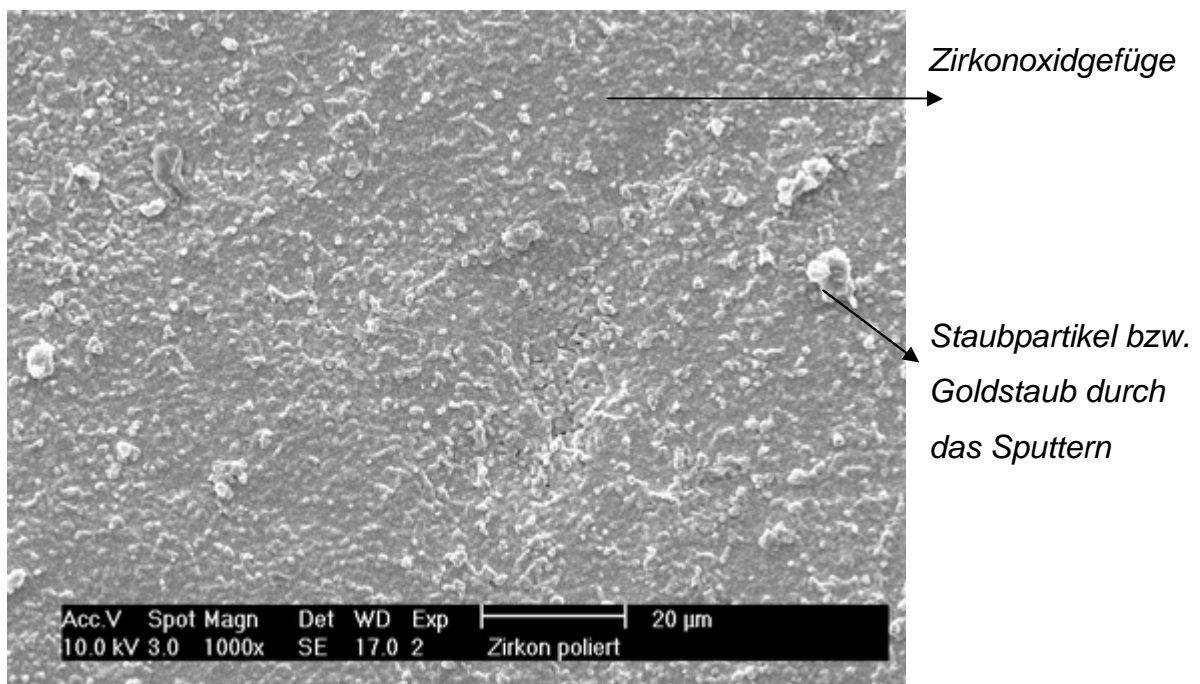


Abb.21: Unbehandelte Prüfkörperoberfläche (exemplarisch)

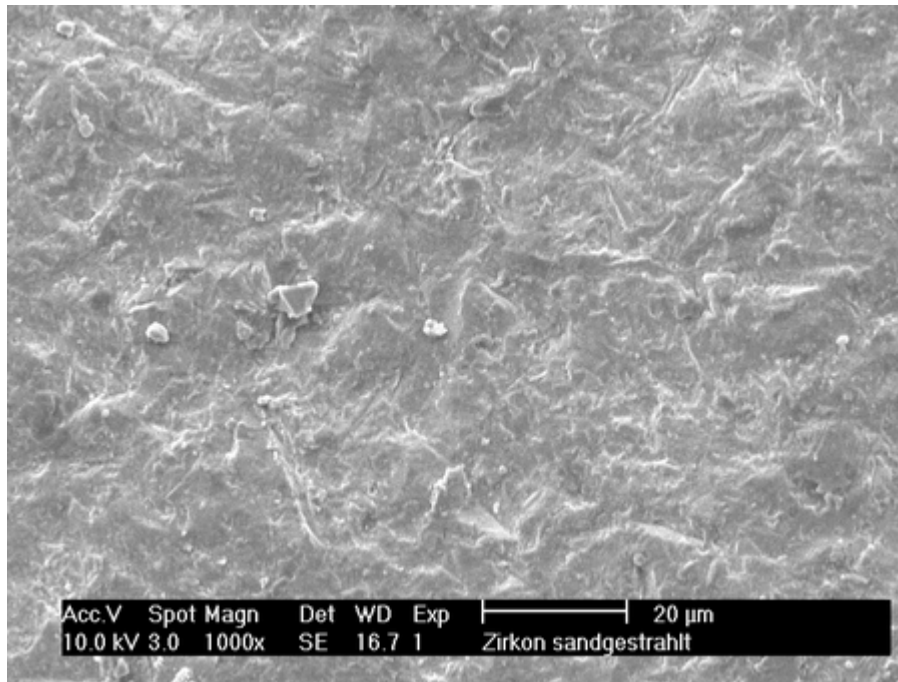


Abb. 22: Korundgestrahlte Prüfkörperoberfläche, mit 110 µm und 2,5 bar  
(exemplarisch)

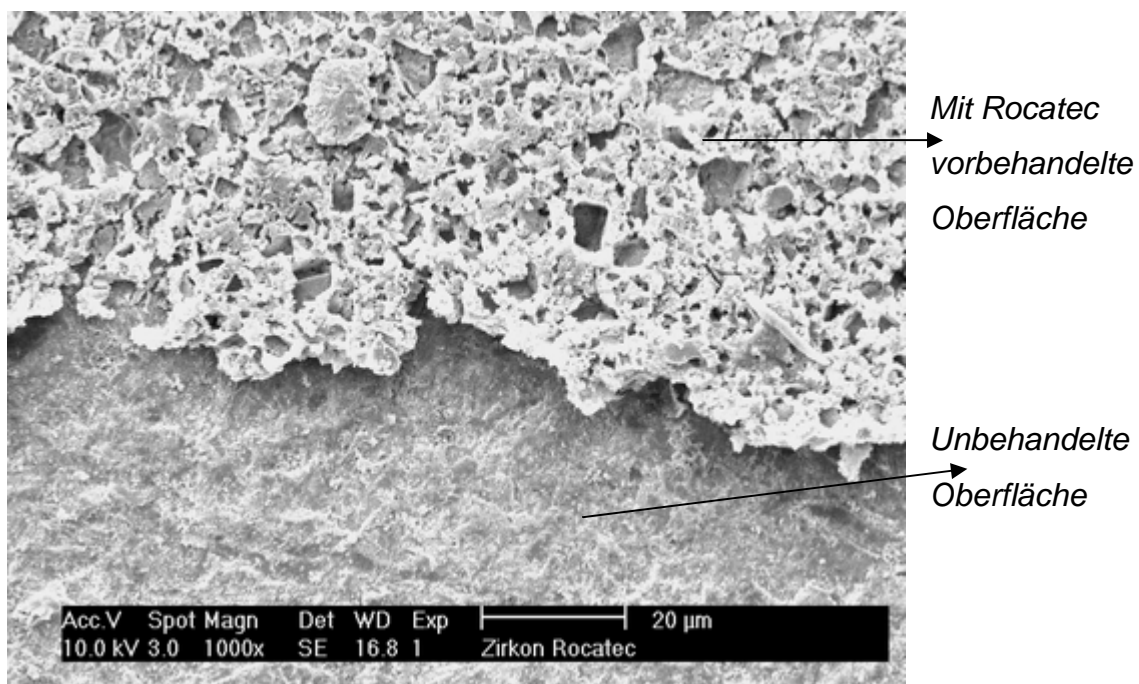


Abb. 23: Mit Rocatec konditionierte Prüfkörperoberfläche (exemplarisch)

Die nächsten Abbildungen (Abb. 24 bis 27) zeigen exemplarisch mit Bifix QM verklebte und abgezogene Prüfkörper, jeweils ohne und nach künstlicher Alterung, in einer 500 fachen Vergrößerung.

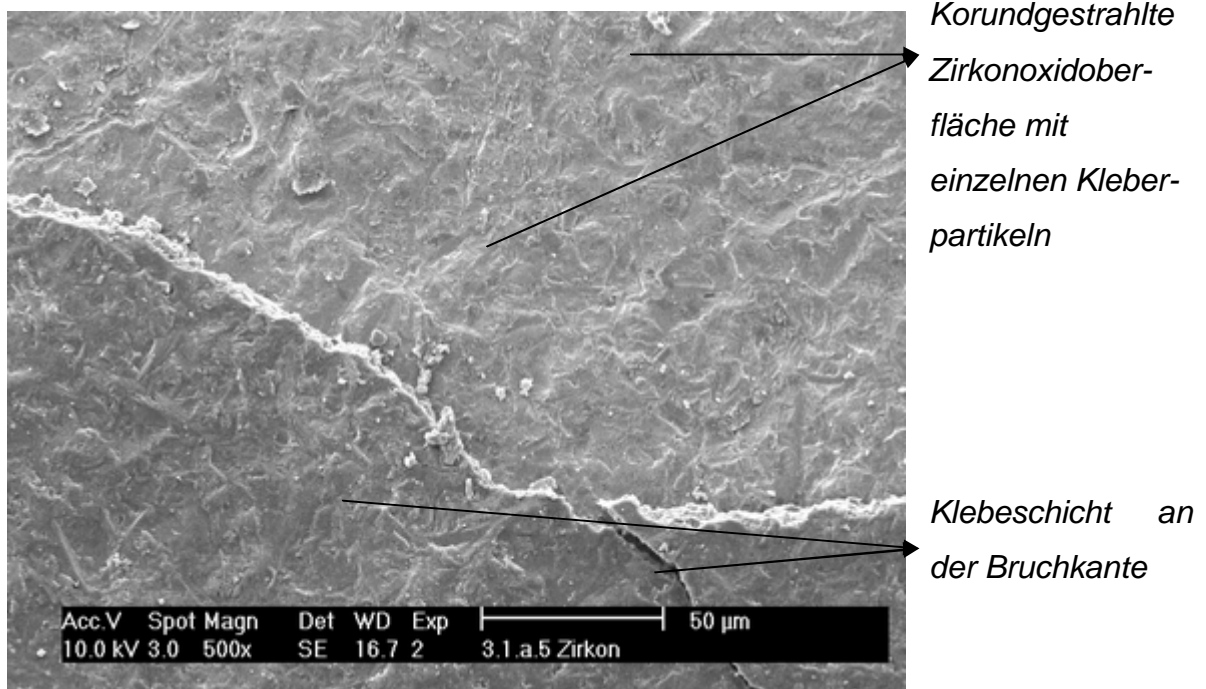


Abb. 24: Gr.1 Korundgestrahlte Oberfläche ohne Alterung (exemplarisch)

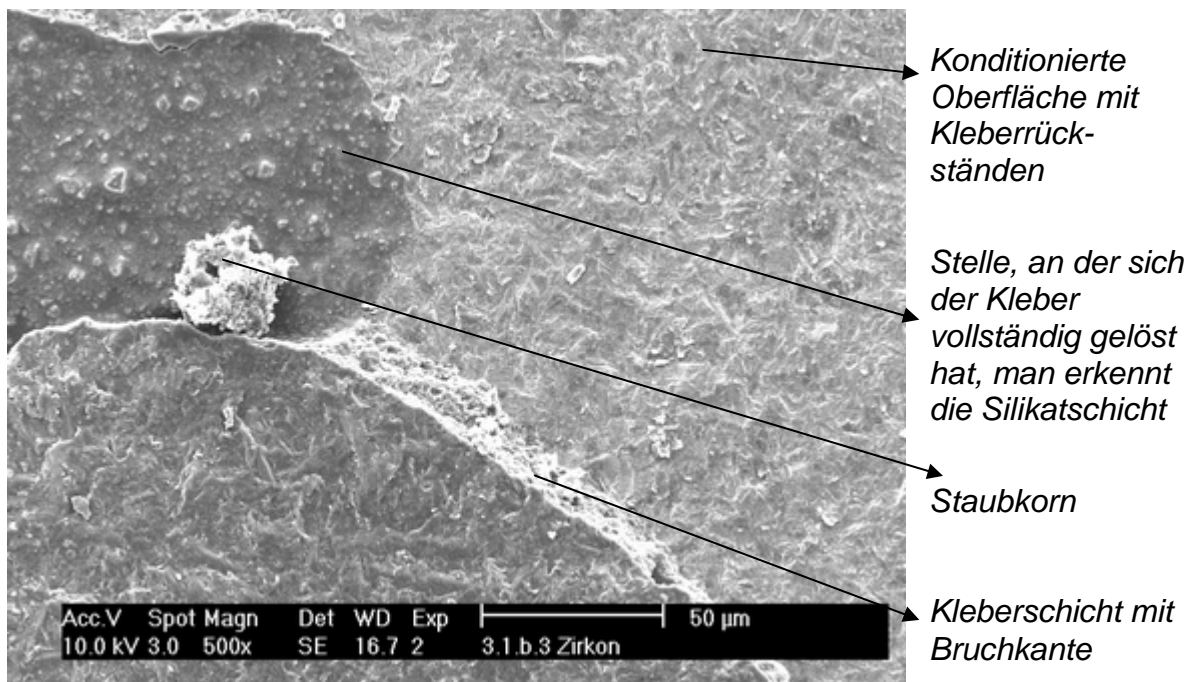


Abb. 25: Gr. 2 Rocatecgestrahlte Oberfläche ohne Alterung (exemplarisch)

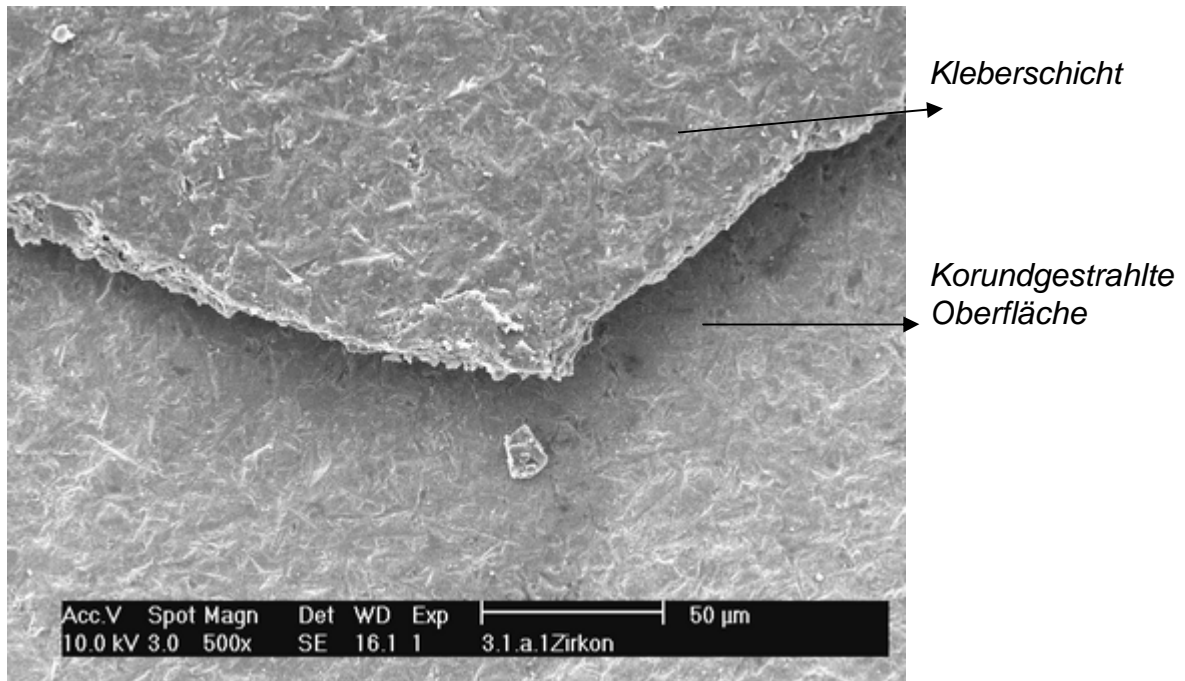


Abb. 26: Gr.3 Korundgestrahlte Oberfläche nach Alterung (exemplarisch)

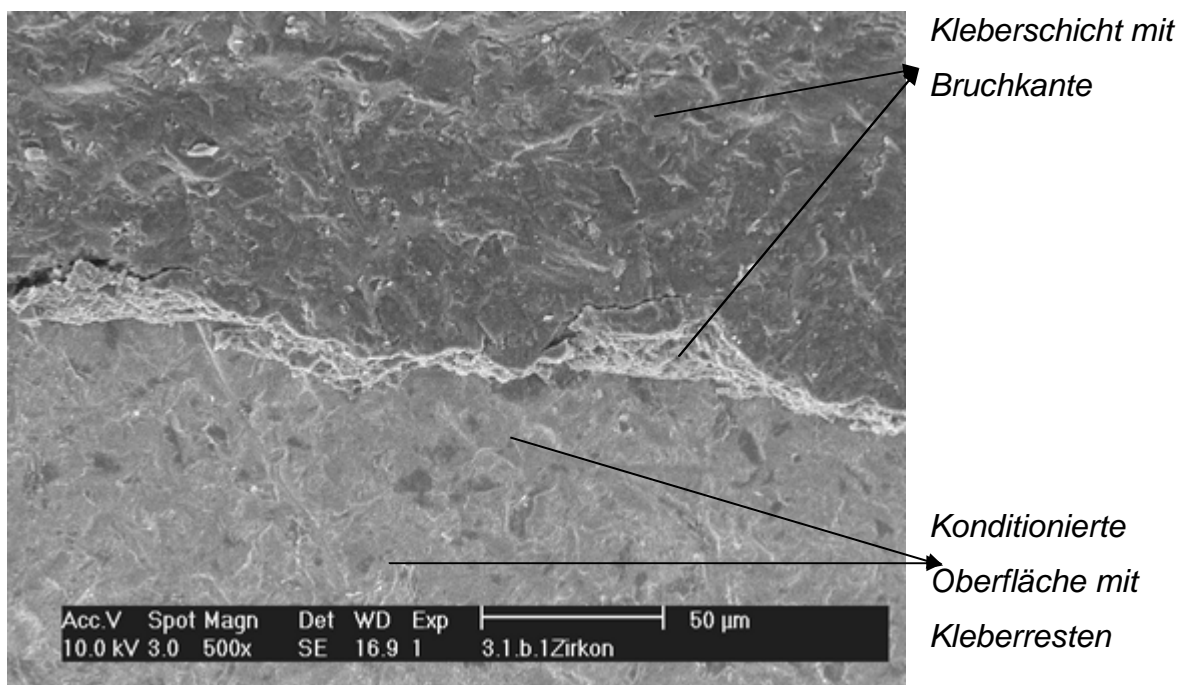


Abb. 27: Gr. 4 Rocatecgestrahlte Oberfläche nach Alterung (exemplarisch)

## 4.2 Haftfestigkeitswerte bei Panavia F 2,0 ohne und nach Langzeitlagerung mit thermischer Wechsellast

Die Prüfkörper der Gruppen 5 bis 8 wurden mit Panavia F 2,0 verklebt. Sie besitzen ebenfalls eine Kennung die analog zu der von Bifix QM ist. So beschreibt „A“, dass die Prüfkörper keiner künstlichen Alterung ausgesetzt waren. Das „B“ sagt aus, dass die Prüfkörper einer künstlichen Alterung in Form der Wasserlagerung und der Temperaturwechsellast ausgesetzt wurden. Die „2“ steht für Panavia F, das letzte Zeichen „a“ für die Vorbehandlung mit Korund oder „b“ für die Vorbehandlung mit Rocatec. Die folgende Tabelle zeigt alle Abzugswerte für Panavia F 2,0.

*Tabelle 5: Abzugswerte der Prüfkörper für die Verklebung mit Panavia F 2,0*

Gruppe	Kennung	Werte in N/mm <sup>2</sup>	Gruppe	Kennung	Werte in N/mm <sup>2</sup>
5	A.2.a	32,43	7	B.2.a	21,54
5	A.2.a	24,3	7	B.2.a	23,89
5	A.2.a	21,67	7	B.2.a	28,5
5	A.2.a	38,36	7	B.2.a	24,22
5	A.2.a	25,47	7	B.2.a	30,24
6	A.2.b	27,11	8	B.2.b	36,45
6	A.2.b	28,02	8	B.2.b	23,97
6	A.2.b	31,95	8	B.2.b	28,94
6	A.2.b	27,18	8	B.2.b	37,44
6	A.2.b	32,69	8	B.2.b	26,31

### Legende für die Kennung :

*A = ohne Wasserlagerung und Temperaturwechsellast*

*B = mit Wasserlagerung und Temperaturwechsellast*

*2 = Panavia F 2,0*

*a = Korundstrahlung*

*b = Rocatec-Konditionierung*

Abbildung 28 zeigt die Abzugswerte der Prüfkörper im Säulendiagramm.

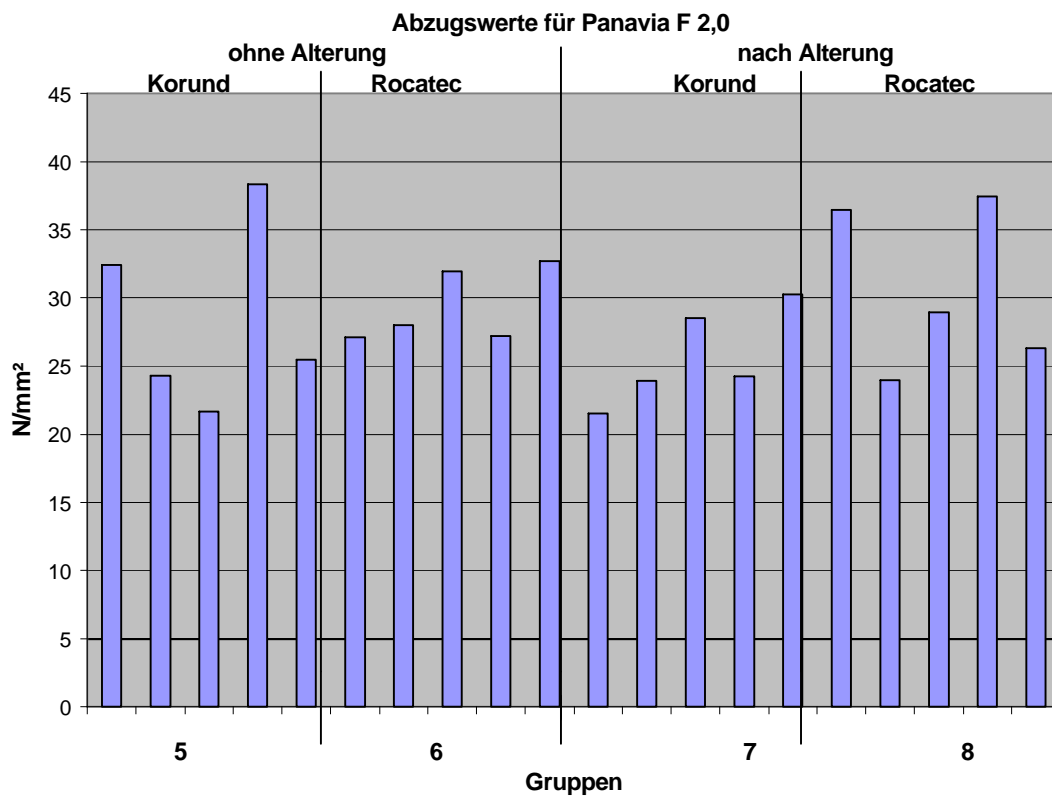


Abb.28: Graphische Darstellung der Abzugswerte für Panavia F 2,0

Die nächste Tabelle zeigt die statistischen Kenngrößen.

Tabelle 6: Statistische Auswertung der Panavia F 2,0–Abzugswerte

Gruppe	N	Mittelwert	Standard– abweichung	Minimum	Median	Maximum
5	5	28,446	6,821	21,67	25,47	38,36
6	5	29,39	2,711	27,11	28,02	32,69
7	5	25,678	3,578	21,54	24,22	30,24
8	5	30,614	6,044	23,97	28,94	37,44

Bei Panavia erkennt man an den Mittelwerten, dass die Konditionierungsart keinen großen Einfluss auf die Werte hat. So sind die Mittelwerte in den Gruppen 5 (ohne Alterung, Vorbehandlung mit Korund), 6 (mit Alterung und Vorbehandlung mit Rocatec) und 8 (mit Alterung und Vorbehandlung mit Rocatec) sehr nah bei einander, während aus den Median–Werten doch hervorgeht, dass die mit Rocatec

konditionierten Gruppen (also 6 und 8) deutlich höher liegen als die anderen Median-Werte der Gruppen. Wenn man die Standardabweichung betrachtet, erkennt man, dass in den Gruppen 5 und 8 die Standardabweichung höher liegt. Dies kann mit den Spitzenwerten zusammenhängen, wobei die 30 N/mm<sup>2</sup> in beiden Gruppen nochmals übertroffen werden und dies nicht ein Einzelfall ist. In Gruppe 6 ist die Standardabweichung niedrig, was schließen lässt, dass Panavia F standardmäßig Werte um 30 N/mm<sup>2</sup> erreicht.

#### 4.2.1 Bruchflächenanalyse von Panavia F 2,0 mit den dazugehörigen rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen und Abzugsdiagrammen

Die Bruchflächenanalyse wurde analog wie bei Bifix QM, mit einer 15-fachen Vergrößerung vorgenommen. Die folgenden Darstellungen (Abb. 29 und 30) zeigen exemplarisch die Bruchflächen.

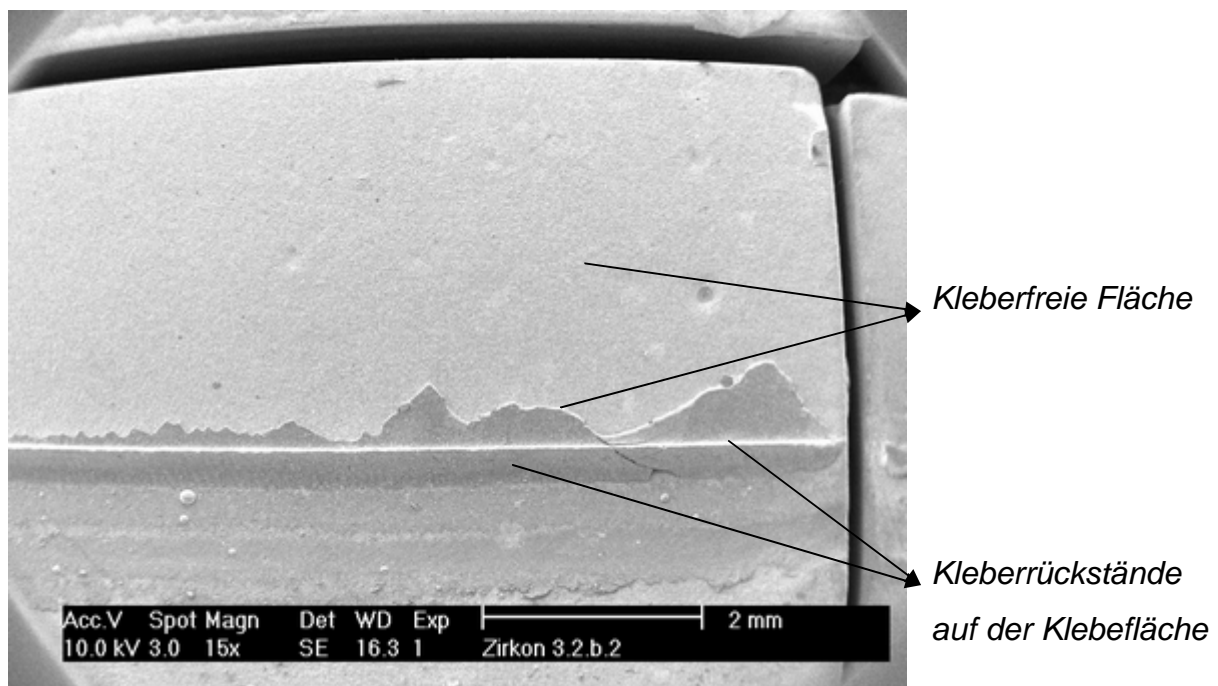


Abb. 29: Gr. 8 mit Rocatec vorbehandelte Prüfkörperoberfläche nach Alterung /  
Beispiel für einen adhäsiven Bruch (exemplarisch)



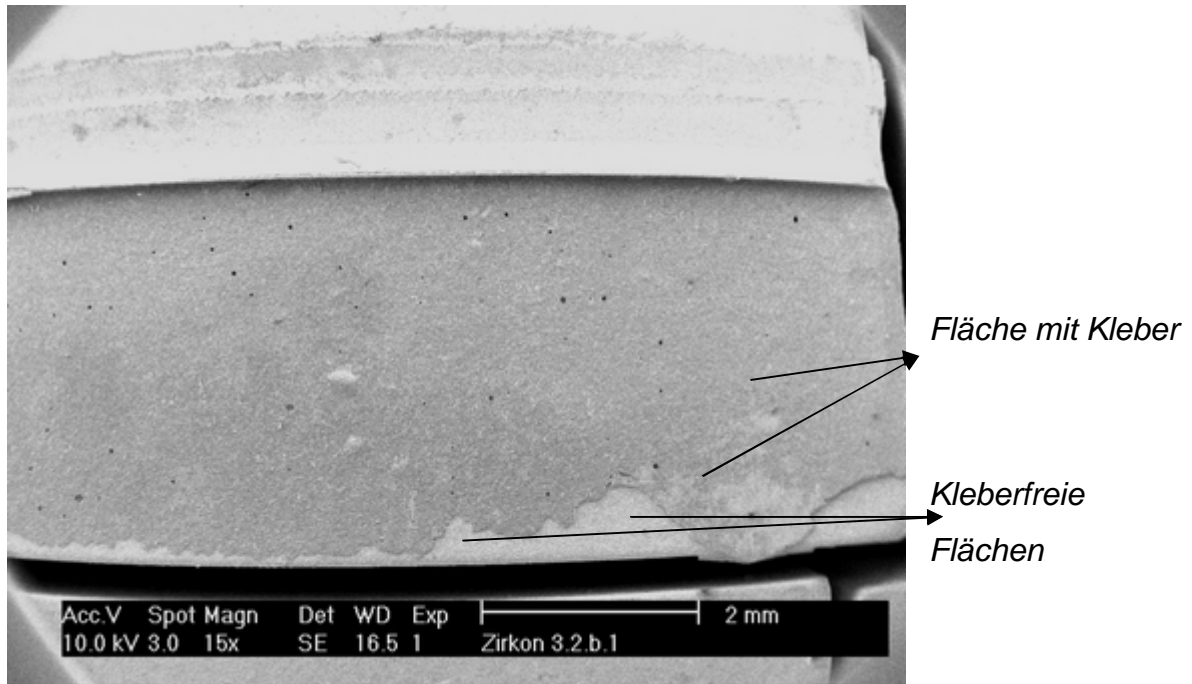


Abb. 30: Gegenstück des Prüfkörpers aus Abbildung 29 (exemplarisch)

In den nächsten Abbildungen (Abb. 31 bis 34) werden stellvertretend für die Gruppen 5 bis 8 Abzugsdiagramme dargestellt.

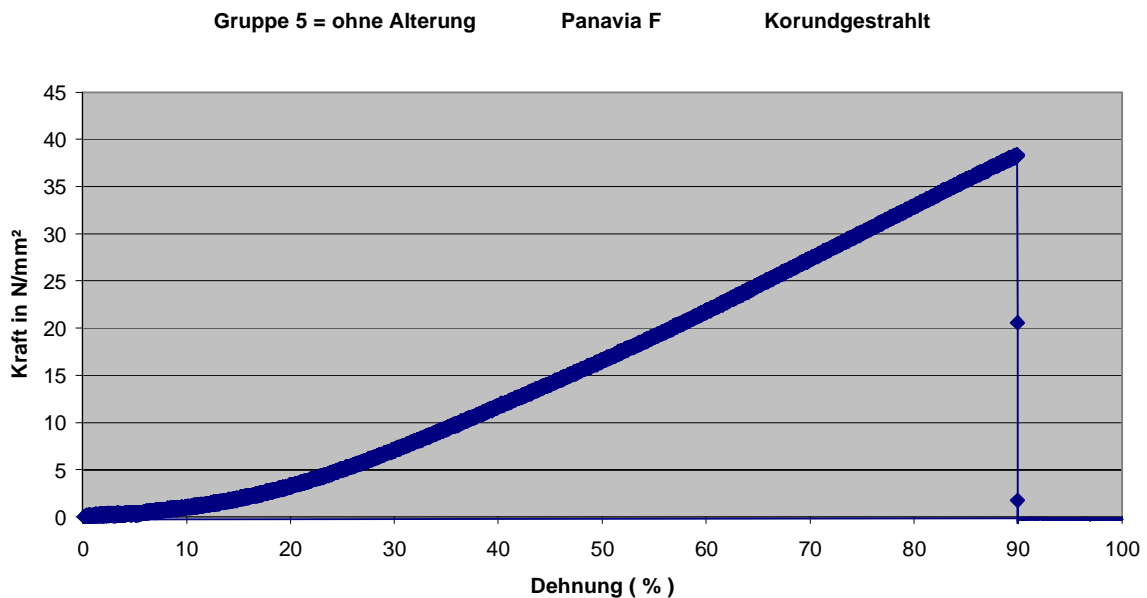


Abb. 31: Abzugsdiagramm der Gruppe 5 (ohne künstliche Alterung und mit Korund vorbehandelt, exemplarisch)

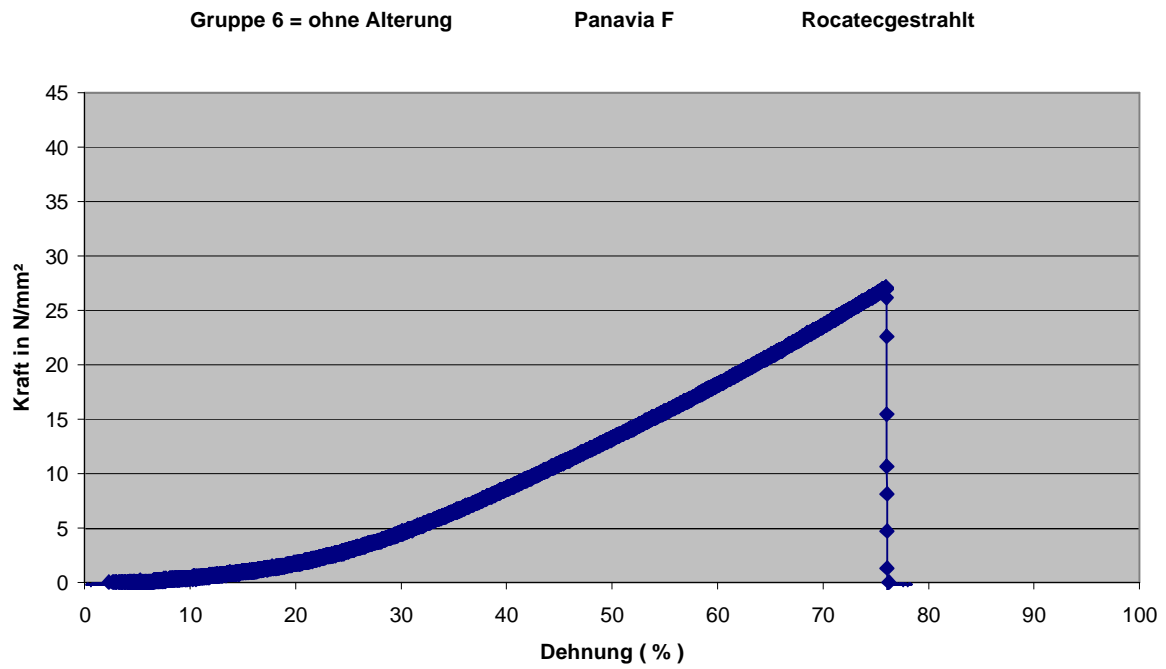


Abb. 32: Abzugsdiagramm der Gruppe 6 (ohne Alterung und mit Rocatec vorbehandelt, exemplarisch)

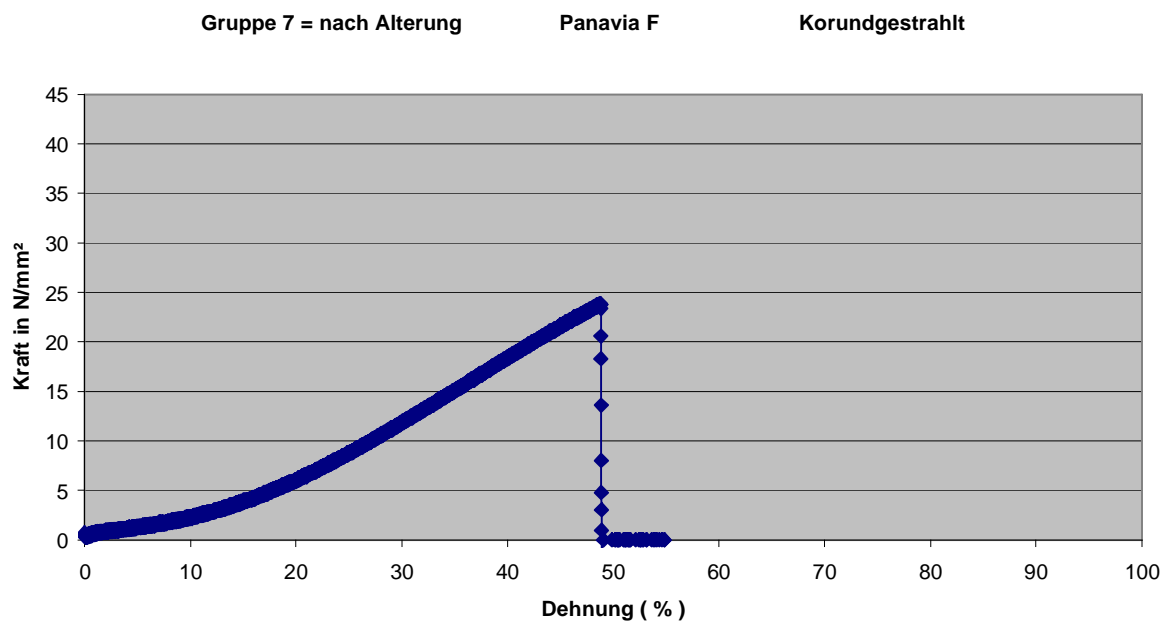
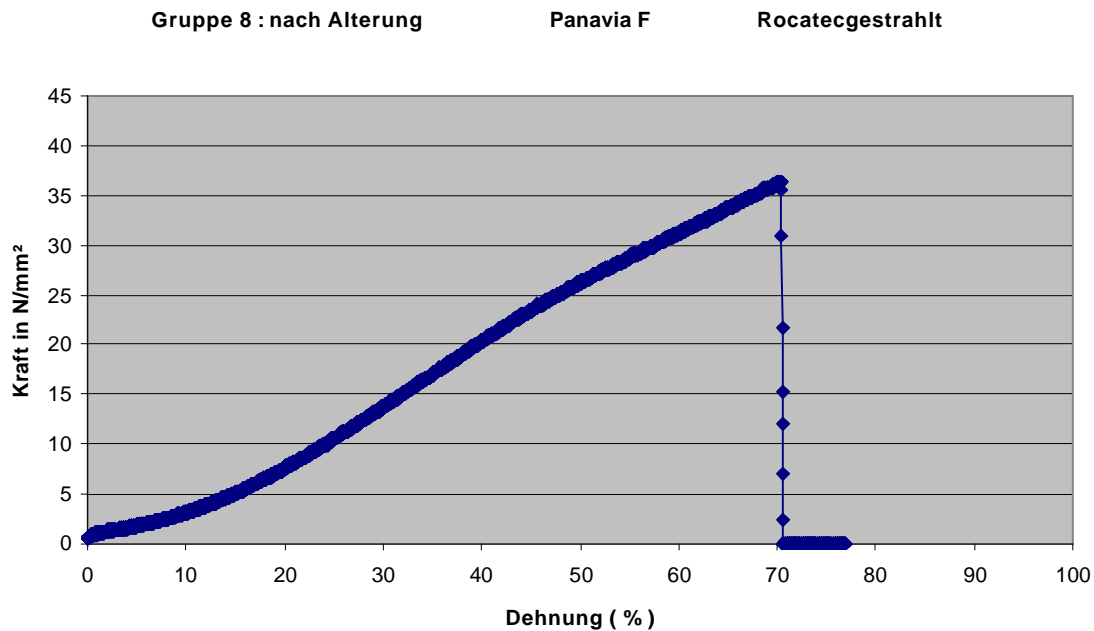
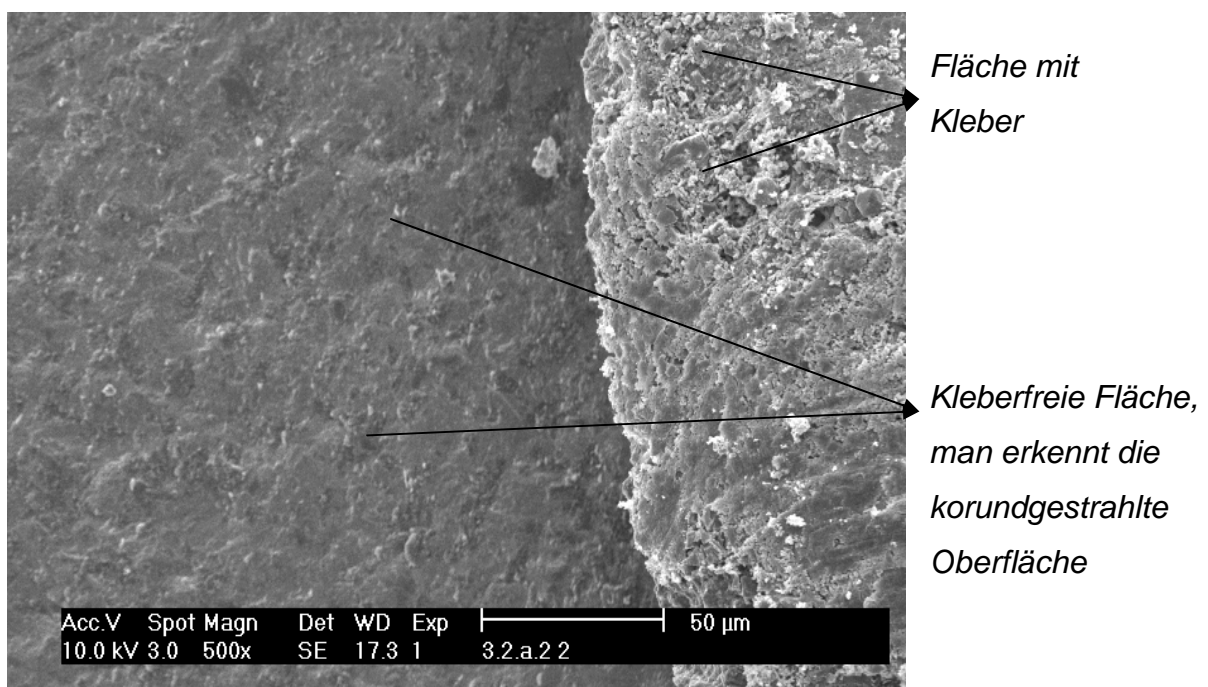


Abb. 33: Abzugsdiagramm der Gruppe 7 (nach Alterung und mit Korund vorbehandelt, exemplarisch)



*Abb. 34: Abzugsdiagramm der Gruppe 8 (nach Alterung und mit Rocatec vorbehandelt, exemplarisch)*

Die Diagramme zeigen in allen Abbildungen eine relativ gleichmäßige Steigung, was bedeutet, dass die einwirkende Abzugskraft gleichmäßig wirkt und nicht durch laterale Kräfte beeinflusst wird. Die nächsten Abbildungen (Abb. 35 – 38) zeigen exemplarisch die Bruchflächen der Gruppen 5 bis 8 in einer 500-fachen Vergrößerung.



*Abb. 35: Gr.5 Korundgestrahlte Oberfläche ohne Alterung (exemplarisch)*

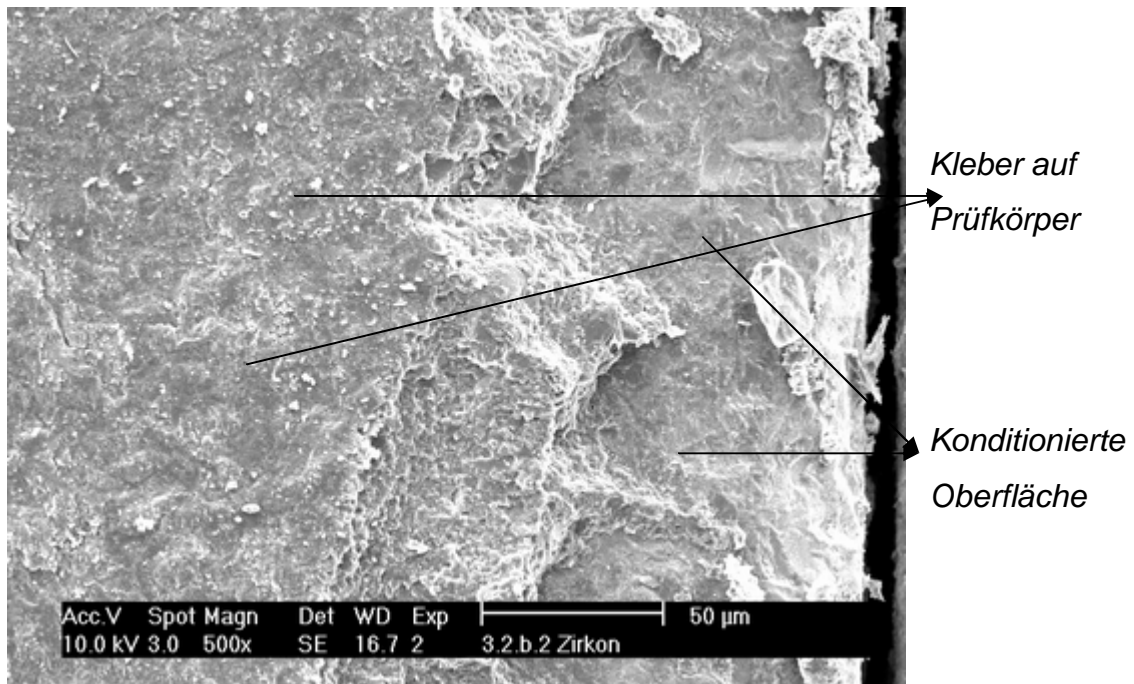


Abb. 36: Gr. 6 Rocatecgestrahlte Oberfläche ohne Alterung (exemplarisch)

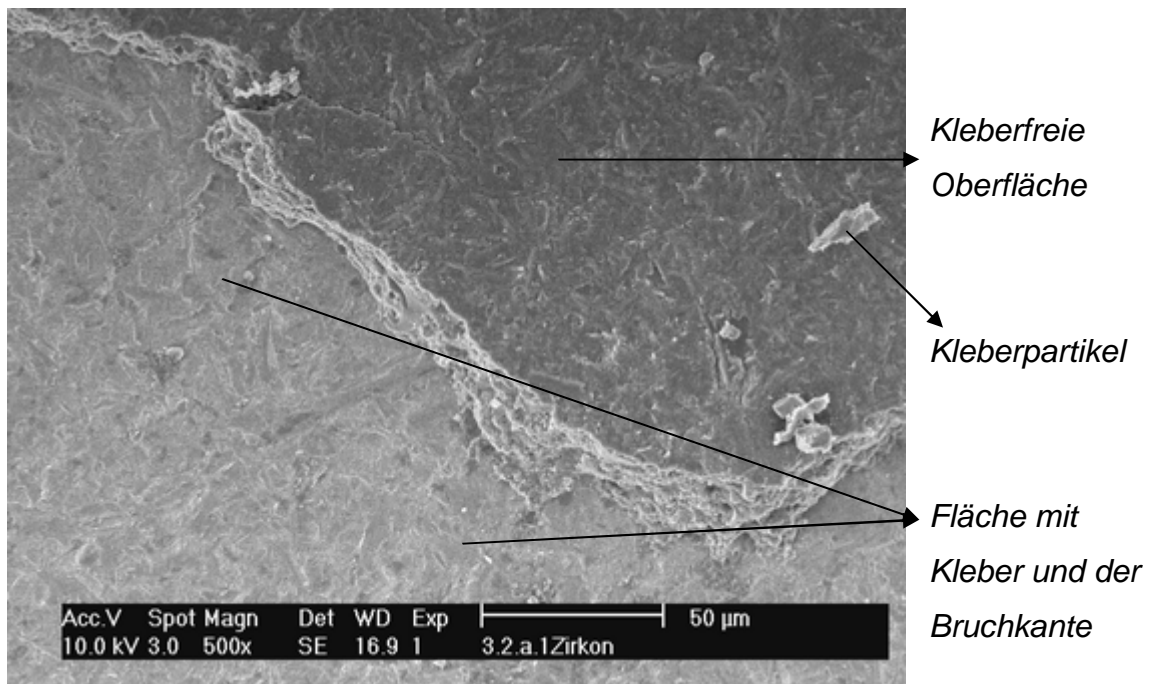


Abb. 37: Gr. 7 Korundgestrahlte Oberfläche nach Alterung (exemplarisch)

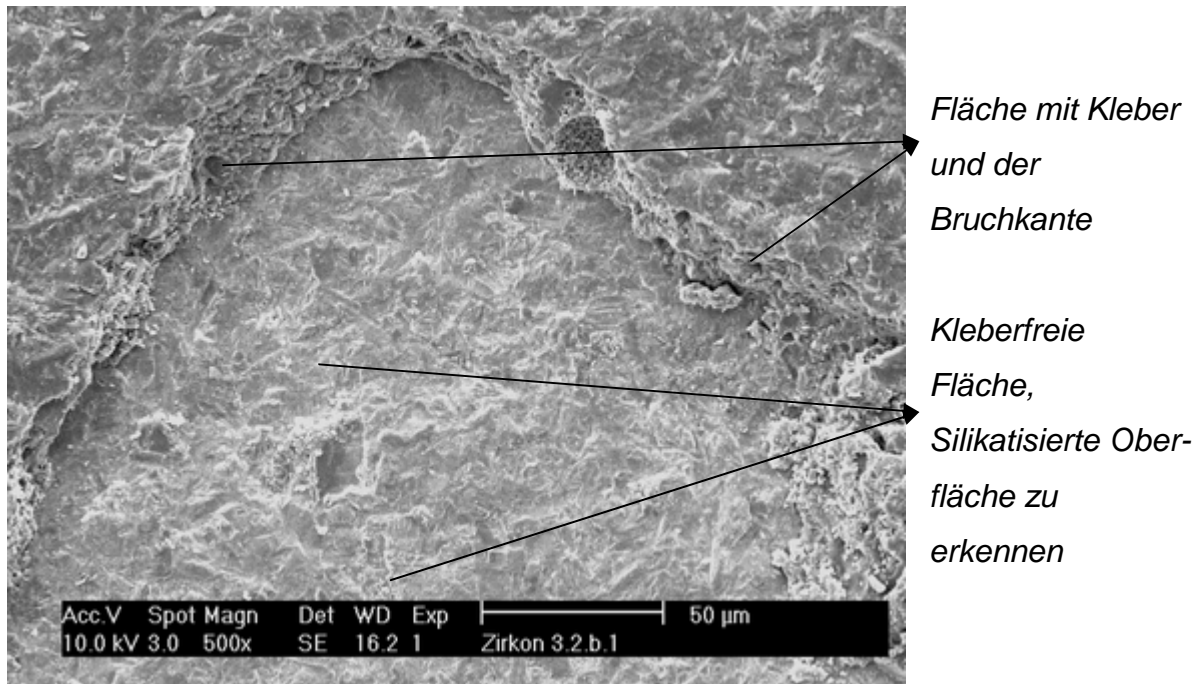


Abb. 38: Gr. 8 Rocatecgestrahlte Oberfläche nach Alterung (exemplarisch)

Die häufigste Bruchart bei Panavia F 2,0 ist der adhäsive Bruch (siehe Abb.17 Graphische Darstellung der Bruchmuster). Es kamen auch Mischbrüche vor, während kohäsive Brüche nicht auftraten, was damit erklärt werden kann, dass Panavia gut auspolymerisiert ist und eine hohe Vernetzung der Klebermatrix aufweist.

Die guten Werte von Panavia können sich auch durch die hydrophobe Alkylgruppe erklären, die zur Erhaltung eines ausgewogenen Gleichgewichts zwischen Hydrophobie und Hydrophilie beiträgt. Die endständige Doppelbindung bewirkt einen hohen Polymerisationsgrad.

Der Phosphatmonoester bewirkt einen besonders guten chemischen Verbund, nicht nur zur Zahnschmelze, sondern auch zur Keramik.

### 4.3 Haftfestigkeitswerte bei Rely X™ Unicem ohne und nach Langzeitlagerung mit thermischer Wechsellast

Die Prüfkörper der Gruppen 9 bis 12 stehen für die Verklebungen mit Rely X Unicem. Sie besitzen ebenfalls eine Kennung die analog zu der von Bifix QM bzw. der von Panavia sind. So beschreibt „A“, dass die Prüfkörper keiner künstlichen Alterung ausgesetzt waren (Gruppen 9 und 10). Das „B“ sagt aus, dass die Prüfkörper einer künstlichen Alterung in Form von Wasserlagerung und der Temperaturwechsellast ausgesetzt waren (Gruppen 11 und 12). Die „3“ steht für Rely X Unicem, dass letzte Zeichen „a“ für die Vorbehandlung mit Korund oder „b“ für die Vorbehandlung mit Rocatec. Die folgende Tabelle zeigt alle Abzugswerte für Rely X Unicem.

*Tabelle 7: Abzugswerte der Prüfkörper für die Verklebung mit Rely X Unicem*

Gruppe	Kennung	Werte in N/mm <sup>2</sup>	Gruppe	Kennung	Werte in N/mm <sup>2</sup>
9	A.3.a	27,54	11	B.3.a	30,69
9	A.3.a	29,6	11	B.3.a	28,33
9	A.3.a	29,03	11	B.3.a	34,72
9	A.3.a	25,03	11	B.3.a	32,8
9	A.3.a	28,02	11	B.3.a	34,9
10	A.3.b	29,03	12	B.3.b	28,33
10	A.3.b	34,08	12	B.3.b	32,08
10	A.3.b	26,81	12	B.3.b	39,68
10	A.3.b	33,42	12	B.3.b	41,69
10	A.3.b	27,25	12	B.3.b	36,39

Legende für die Kennung :

*A = ohne Wasserlagerung und Temperaturwechsellast*

*B = mit Wasserlagerung und Temperaturwechsellast*

*3 = Rely X Unicem*

*a = Korundstrahlung*

*b = Rocatec-Konditionierung*

Abbildung 39 zeigt die Abzugswerte für Rely X Unicem im Säulendiagramm

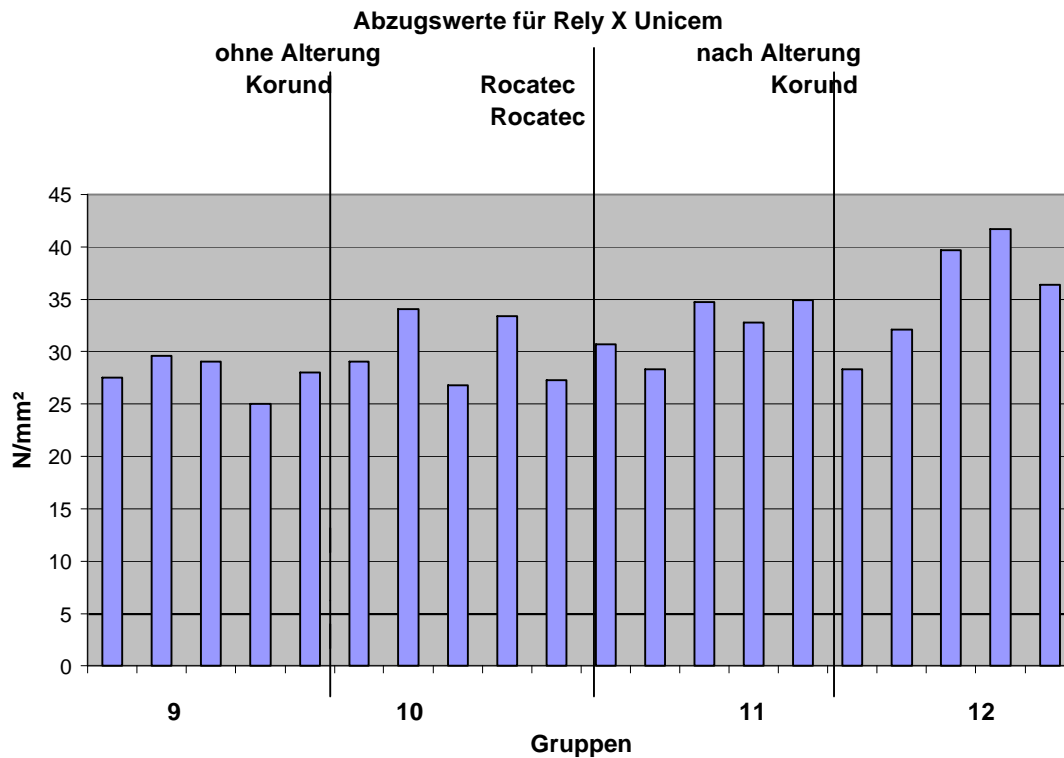


Abb. 39: Graphische Darstellung der Abzugswerte für Rely X Unicem

Die folgende Tabelle zeigt die statistischen Kenngrößen.

Tabelle 8: Statistische Auswertung der Rely X Unicem Abzugswerte

Gruppe	N	Mittelwert	Standard- abweichung	Minimum	Median	Maximum
9	5	27,844	1,77	25,03	28,02	29,6
10	5	30,188	3,426	26,81	29,03	34,08
11	5	32,288	2,794	28,33	32,8	34,9
12	5	35,634	5,468	28,33	36,39	41,69

Bei Rely X Unicem zeigt sich, dass die Werte nach Temperaturwechsellast zunehmen. Die Mittelwerte steigen in beiden Konditionierungsarten, wobei die Vorbehandlung mit dem Rocatec-System gegenüber der Korundstrahlung höhere Werte erreicht. Das Rocatec-System erreicht auch ohne Alterung, höhere Abzugswerte als nach Vorbehandlung mit Korund (Vergleich der Gruppen 9 (ohne Alterung und mit Korund vorbehandelt) und 10 (ohne Alterung und mit Rocatec vorbehandelt)). Die Median-Werte zeigen ebenfalls die Erhöhung der Werte ohne bzw. nach Alterung in den Gruppen 11 (nach Alterung, mit Korund vorbehandelt) und 12 (nach Alterung und mit Rocatec vorbehandelt). Die Gruppe 9 zeigt eine geringe Standardabweichung, was wiederum für die Reproduzierbarkeit des Versuches spricht, andererseits ist Rely X Unicem in der Lage, ebenfalls standardmäßig Abzugswerte um die 30 N/mm<sup>2</sup> zu erreichen. Alle Werte für die Standardabweichung der jeweiligen Gruppen liegen relativ nah beieinander, außer in Gruppe 12, in der auch der absolute Maximalwert von 41,69 N/mm<sup>2</sup> erreicht wurde.



#### 4.3.1 Bruchflächenanalyse von Rely X™ Unicem mit den dazu- gehörige rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen und Abzugsdiagrammen

Die Bruchflächenanalyse für Rely X Unicem hat ergeben, dass die adhäsive Bruchart überwiegt. Hier kamen ebenfalls wie bei Panavia F keine kohäsiven Brüche vor.

Mischbrüche traten im Gegensatz zu den anderen Klebern vermehrt auf.

Die Abbildungen 40 und 41 zeigen einen Mischbruch aus der Gruppe 10 (ohne Alterung und mit Korund vorbehandelt).

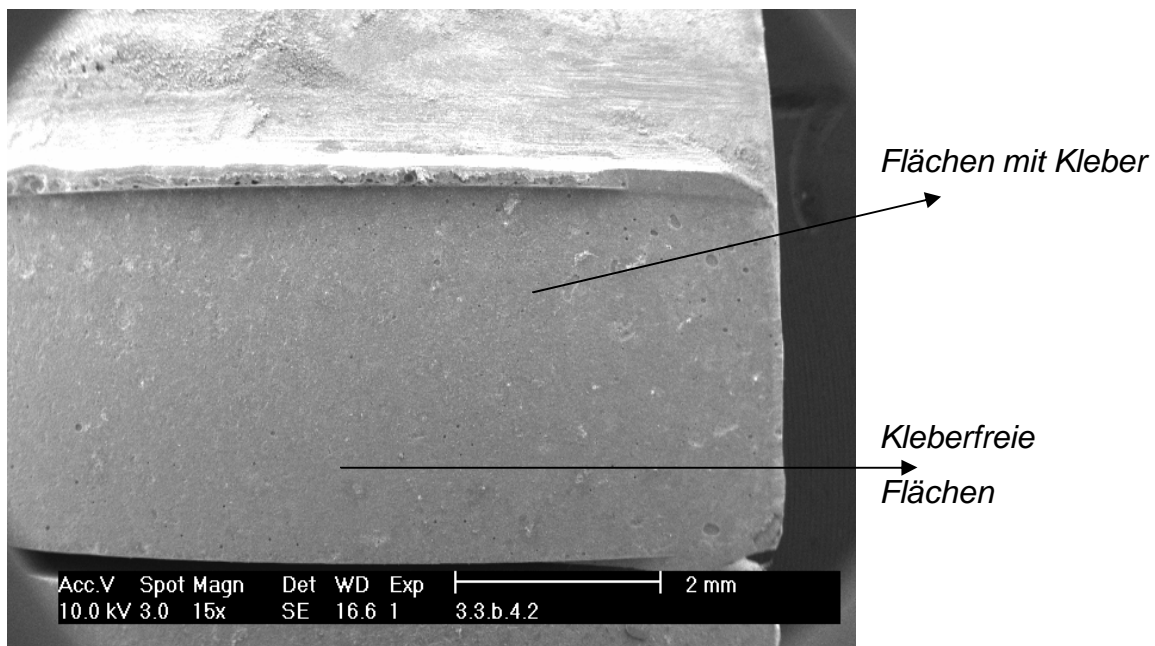
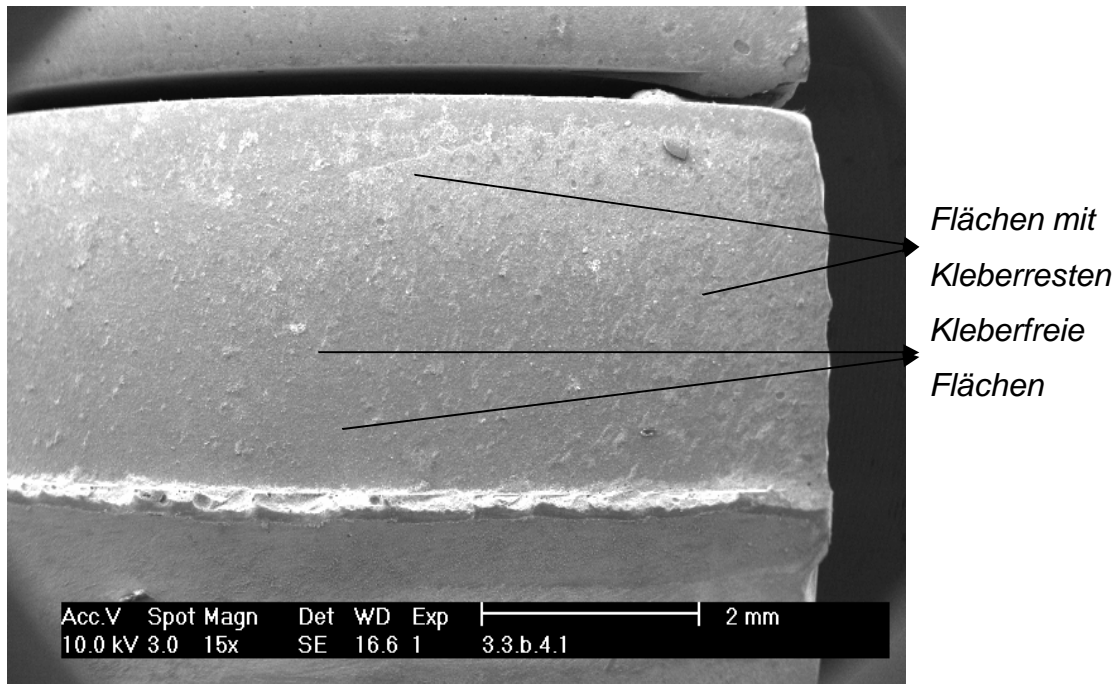


Abb. 40: Gr.10 Mit Rocatec vorbehandelte Oberfläche ohne Alterung /  
Beispiel für einen Mischbruch (exemplarisch)



*Abb. 41: Gegenstück von Abbildung 40*

Die nächsten Abbildungen (Abb. 42 bis 45) zeigen die Abzugsdiagramme der Gruppen 9 bis 12. In den Diagrammen der Gruppen 9 (ohne Alterung und mit Korund vorbehandelt) und 10 (ohne Alterung und mit Rocatec vorbehandelt) ist zu erkennen, dass die Kurve langsam ansteigt und dann recht steil zum Bruchpunkt verläuft. In den Abbildungen 44 und 45 für die Gruppen 11 (nach Alterung und mit Korund vorbehandelt) und 12 (nach Alterung und mit Rocatec vorbehandelt) beginnt die Kurve direkt steil bis zum Bruchpunkt. Dies kann mit der Vordehnung der Seile zusammenhängen und hat keinen Einfluss auf den Wert.

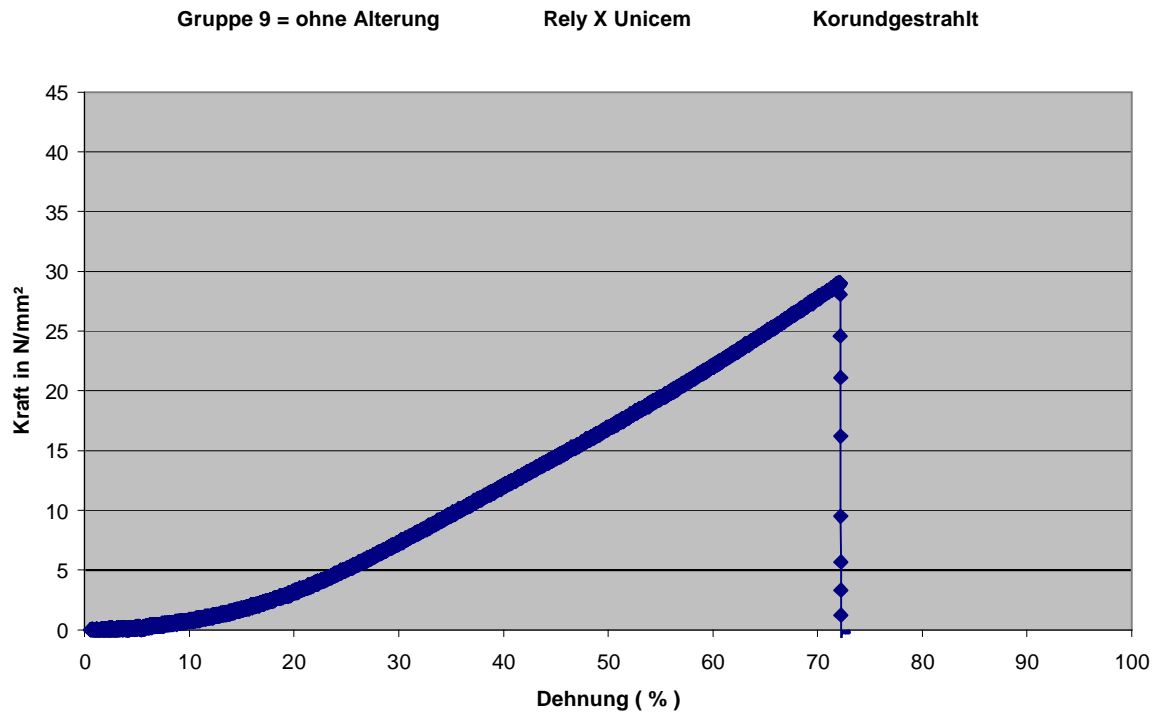


Abb.42: Abzugsdiagramm der Gruppe 9 (ohne Alterung und mit Korund vorbehandelt, exemplarisch)

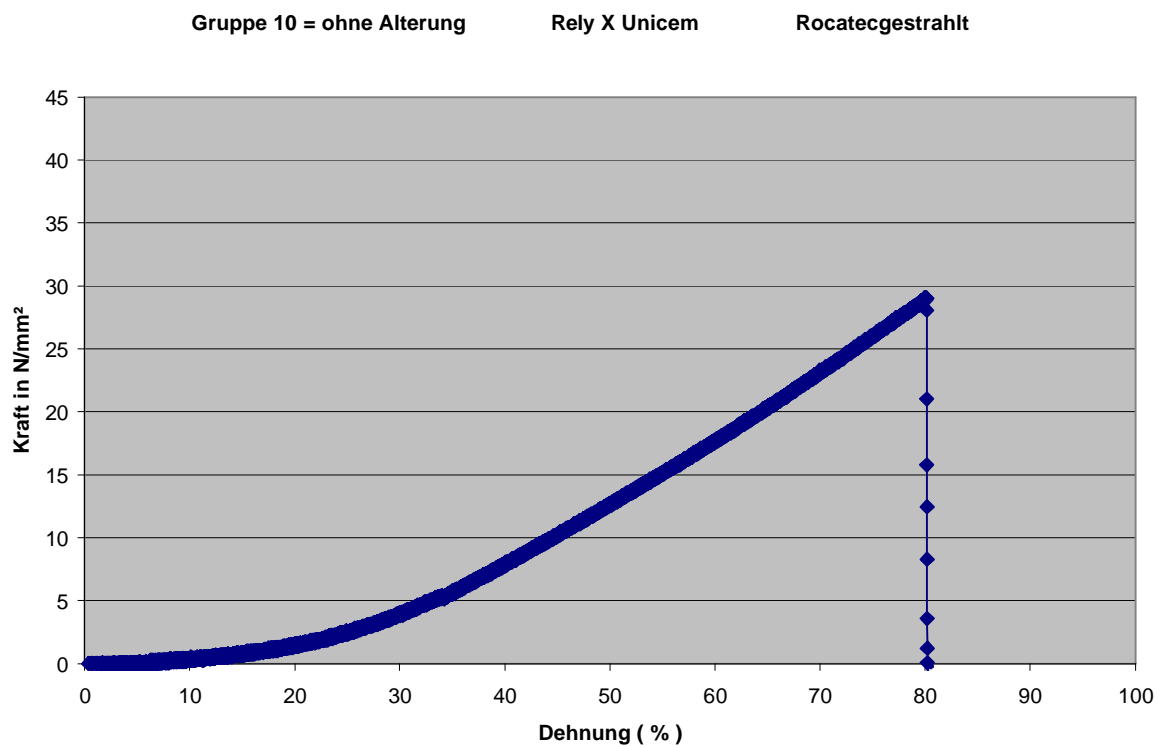


Abb.43: Abzugsdiagramm der Gruppe 10 (ohne Alterung und mit Rocatec vorbehandelt, exemplarisch)

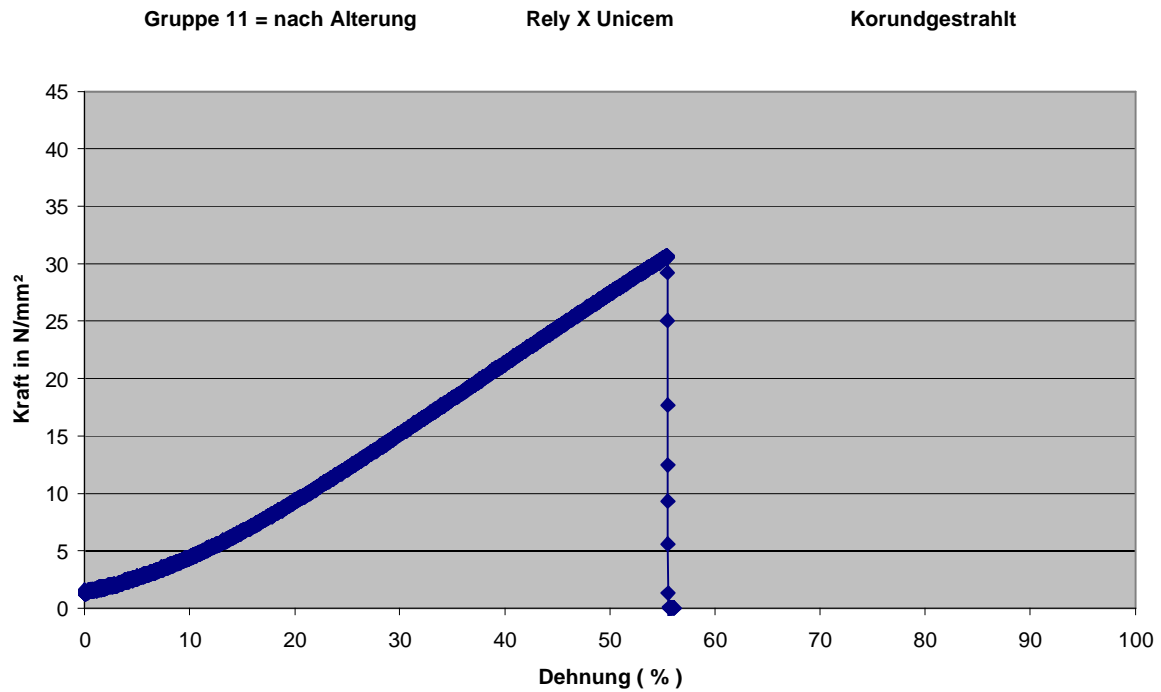


Abb.44: Abzugsdiagramm der Gruppe 11 (nach Alterung und mit Korund vorbehandelt, exemplarisch)

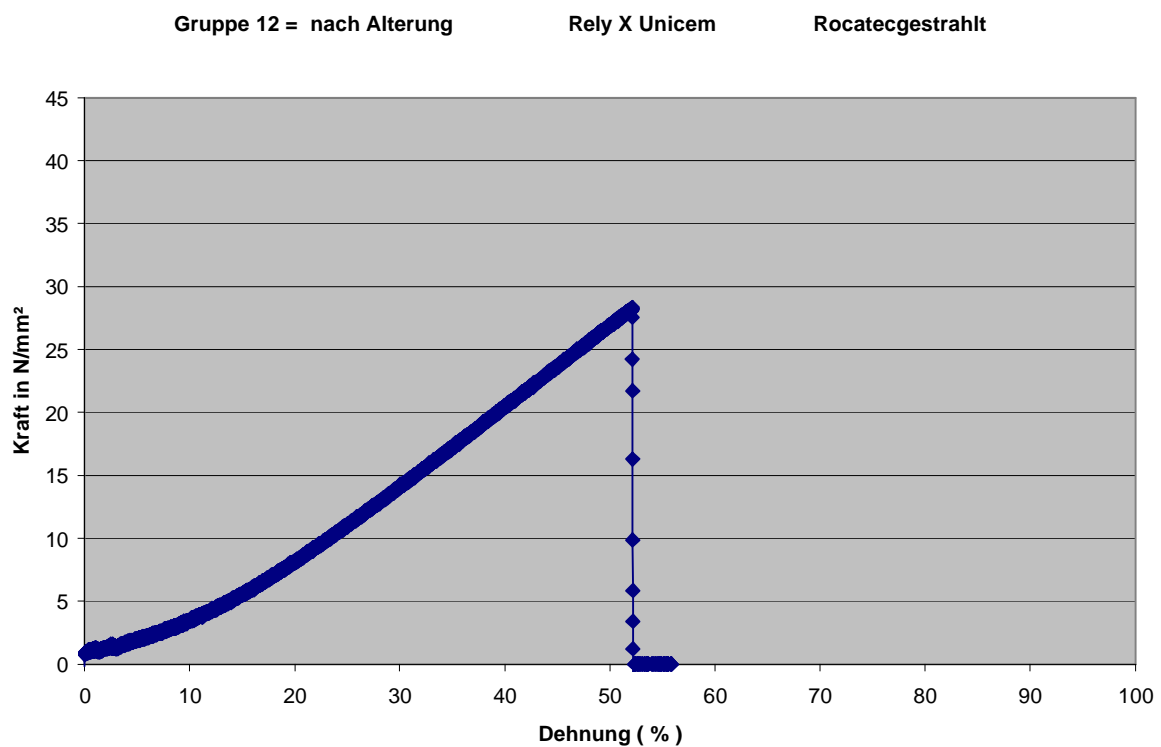


Abb.45: Abzugsdiagramm der Gruppe 12 (nach Alterung und mit Rocatec vorbehandelt, exemplarisch)

Die nächsten Abbildungen (Abb. 46 bis 49) zeigen exemplarisch die Bruchflächen der Gruppen 9 bis 12 in einer 500-fachen Vergrößerung.

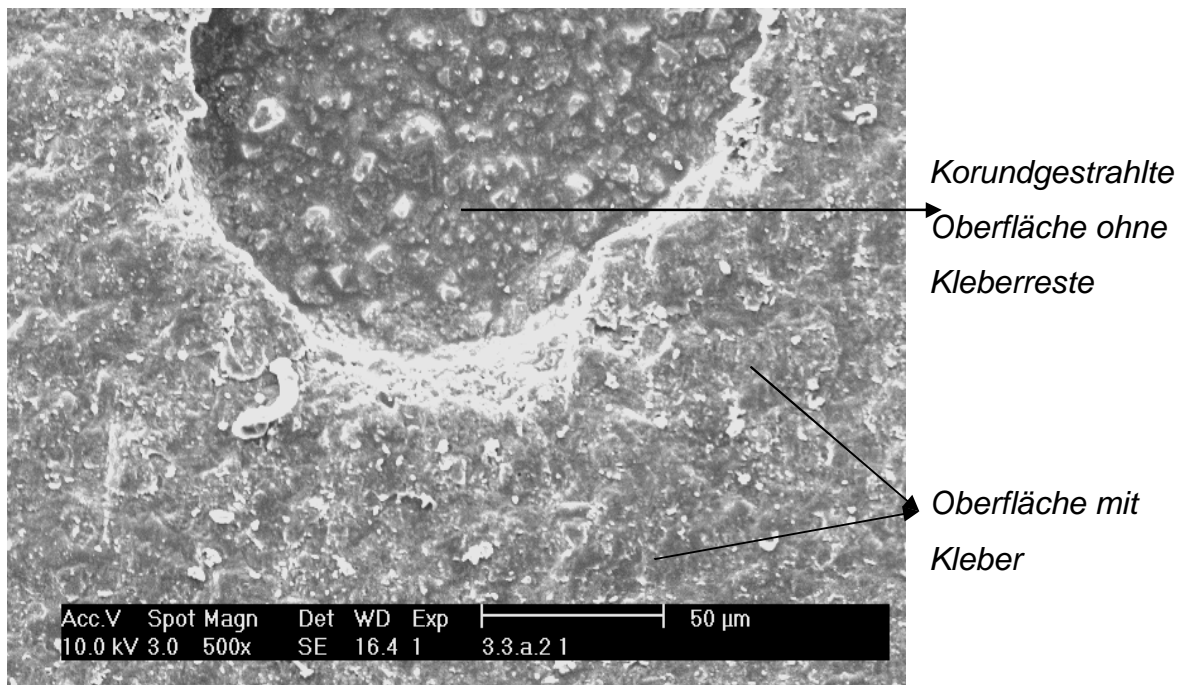


Abb.46: Gr.9 Korundgestrahlte Oberfläche ohne Alterung (exemplarisch)

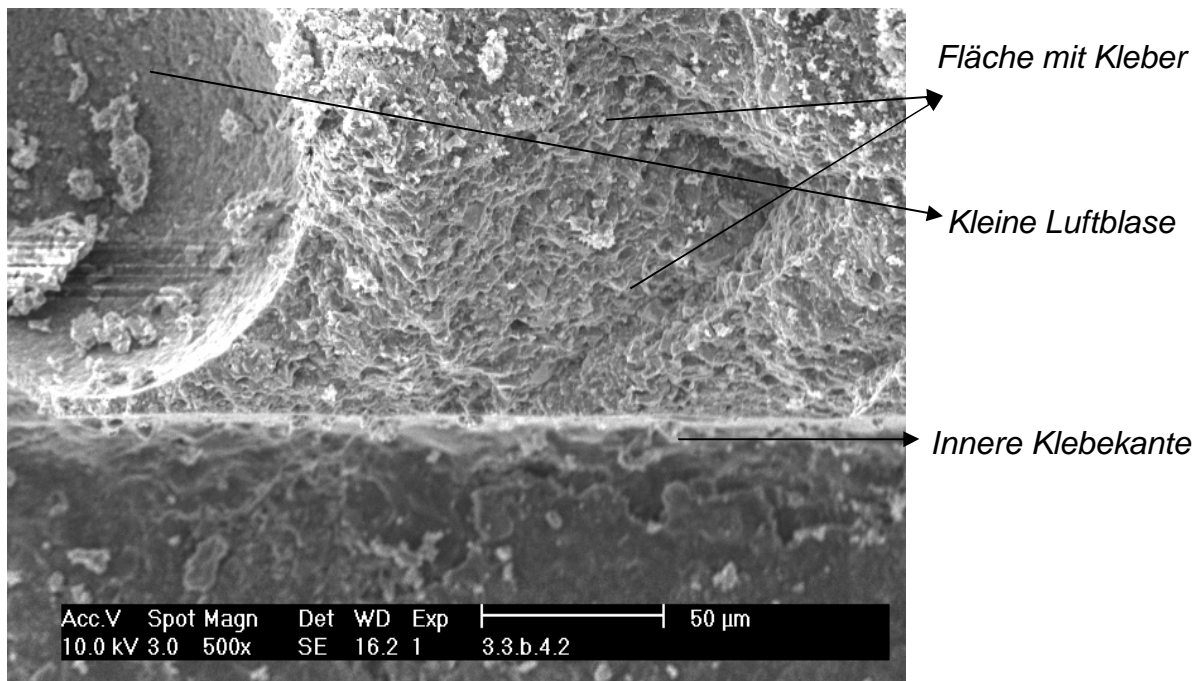


Abb. 47: Gr.10 Rocatecgestrahlte Oberfläche ohne Alterung (exemplarisch)

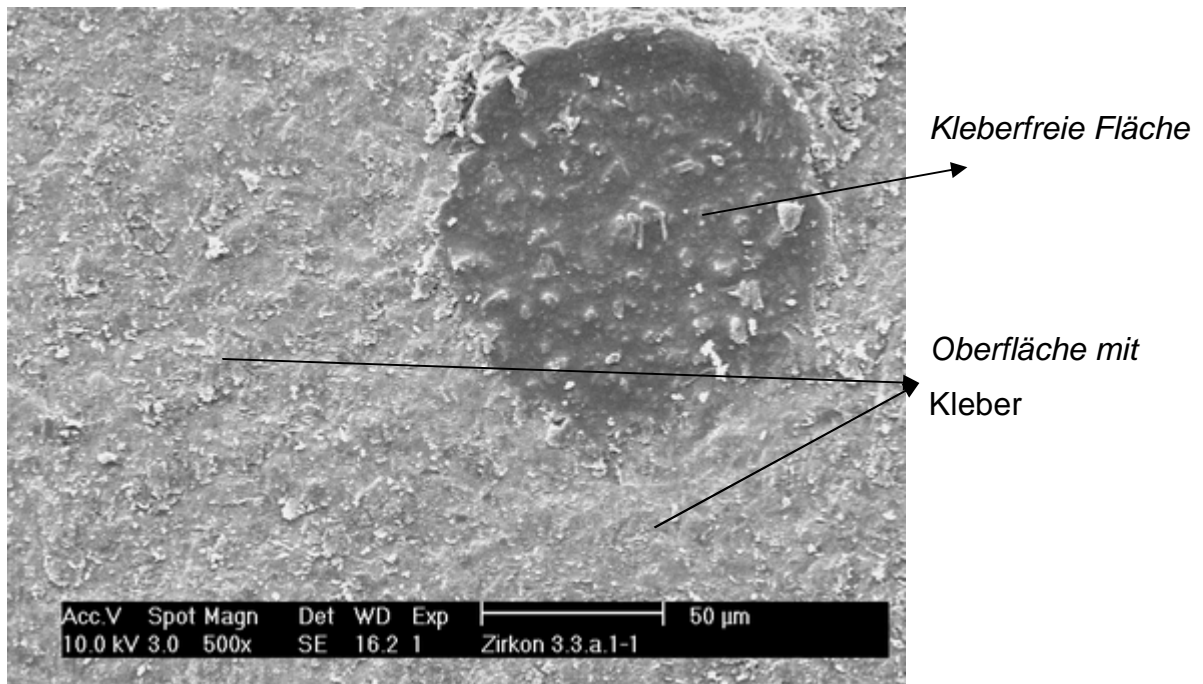


Abb. 48: Gr. 11 Korundgestrahlte Oberfläche nach Alterung (exemplarisch)

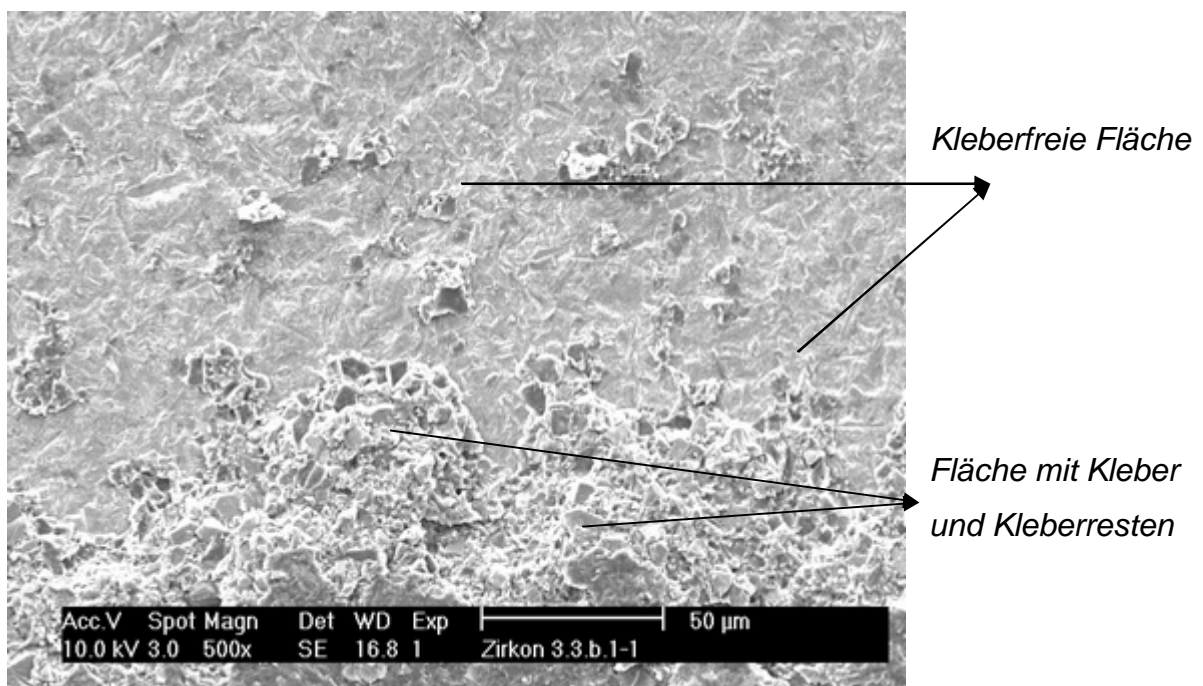


Abb. 49: Gr. 12 Rocatecgestrahlte Oberfläche nach Alterung (exemplarisch)

Wie schon erwähnt traten bei Rely X Unicem keine kohäsiven Brüche auf, in Abbildung 17 sind die Bruchmuster graphisch dargestellt. Panavia F 2,0 sowie Rely X Unicem besitzen Haftmonomere, die aus Phosphorgruppen und zwei Kohlenstoff Doppelbindungseinheiten pro Molekül bestehen [3M ESPE Rely X Unicem

*Produktossier 2003*]. Dies liefert eine hohe Reaktivität und letztlich eine hohe Vernetzung der Matrix.

#### 4.4 Statistische Präsentation und Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Statistische Auswertung wurde mit dem Statistik-Programm „SPSS“ 14,0 durchgeführt. Die gewonnenen Messergebnisse wurden varianzanalytisch mittels Kruskal-Wallis-Test untersucht. Der Kruskal-Wallis-Test ist ein nicht-parametrischer Test oder parameterfreier Test, in dem die Modellstruktur für die Analyse von Daten nicht vorab festgelegt wird, sondern aus den Daten bestimmt wird. Der Begriff parameterfrei bedeutet, dass die Art und Anzahl der Parameter flexibel und nicht von vornherein festgelegt ist. Parameterfreie statistische Methoden sind mathematische Prozeduren zum Testen statistischer Hypothesen. Anders als parametrische statistische Tests machen sie keine Annahmen über die Wahrscheinlichkeitsverteilung der untersuchten Variablen. Bei den parameterfreien Tests wird die Häufigkeitsverteilung von Daten analysiert. Aus der Datenmenge (Messwerte) berechnet man den Median, die statistische Streuung (Spannweite) und die Standardabweichung.

In der deskriptiven Statistik kann die Häufigkeitsverteilung anhand von Boxplots graphisch dargestellt werden. Als Box wird das durch die Quantile bestimmte Rechteck bezeichnet (Abb. 50), welches 50% der ermittelten Messwerte umfasst. Durch die Länge der Box ist der Interquartilsabstand abzulesen. Der Interquartilsabstand ist ein Maß der Streuung, welcher durch die Differenz des oberen und unteren Quantils bestimmt ist. Als weiteres Quantil ist der Median in der Box eingezeichnet (schwarzer Balken in der Box in Abb. 50), welcher durch seine Lage innerhalb der Box einen Eindruck von der Schiefe der den Daten zugrunde liegenden Verteilung vermittelt. Die Linien sind die Whisker, die das 1,5-fache des Interquartilsabstandes zeigen, sie werden durch einen Wert aus den Daten bestimmt. Werte, die außerhalb dieser Grenze liegen, werden separat in das Diagramm eingetragen und als Ausreißer bezeichnet.

In Abbildung 50 sind alle Messergebnisse der jeweiligen Gruppen in Boxplots dargestellt.

*F*max in N/mm<sup>2</sup>

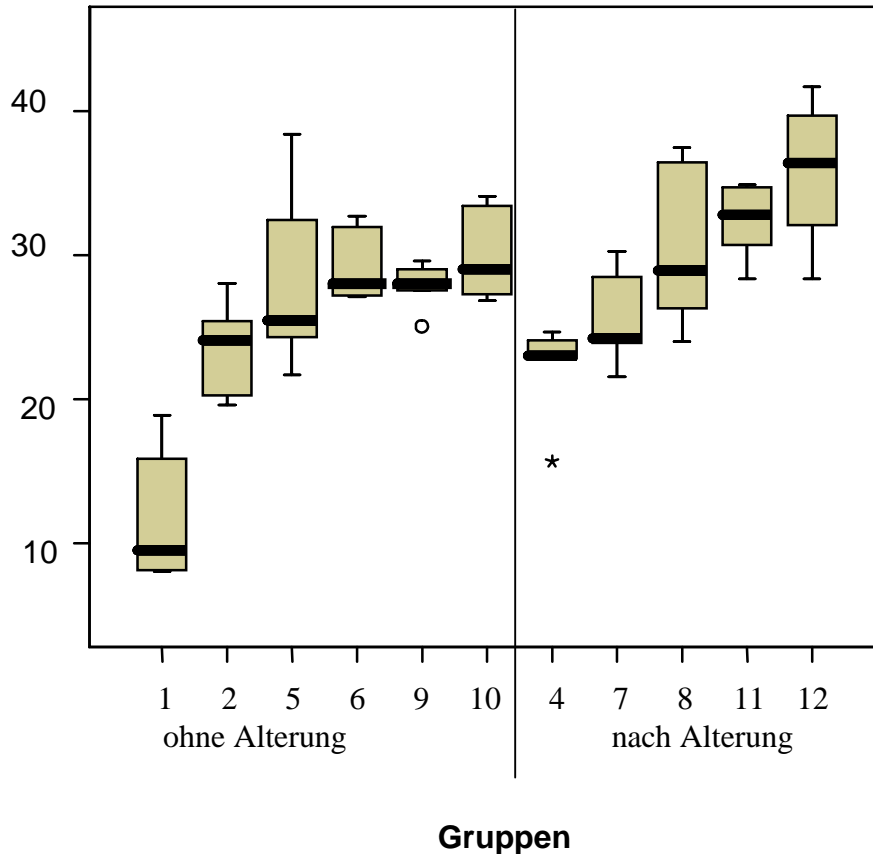


Abb. 50: Boxplots für alle Gruppen (außer Gruppe 3 da keine Werte vorliegen)

Gruppe 1 = A. 1.a	Gruppe 2 = A. 1.b	Gruppe 3 = B. 1.a	Gruppe 4 = B. 1.b
Gruppe 5 = A. 2.a	Gruppe 6 = A. 2.b	Gruppe 7 = B. 2.a	Gruppe 8 = B. 2.b
Gruppe 9 = A. 3.a	Gruppe 10 = A. 3.b	Gruppe 11 = B. 3.a	Gruppe 12 = B. 3.b

Legende mit Gruppenkennung:

A = ohne Wasserlagerung und Temperaturwechsellast

B = mit Wasserlagerung und Temperaturwechsellast

1 = Bifix QM

2 = Panavia F 2,0

3 = Rely X Unicem

a = Korundstrahlung

b = Rocatec-Konditionierung



Es gibt keine Werte für die Versuchsreihe mit Bifix QM, in der die Prüfkörper mit Korund vorbehandelt wurden und einer künstlichen Alterung ausgesetzt waren (Gruppe 3). Die Prüfkörper wurden mit bereits gelösten Klebeflächen aus dem Wasserbadbehälter entnommen.

In Gruppe 4 (Bifix QM Verklebung, nach Alterung, mit Rocatec konditioniert) ist die Box sehr klein. Das rechtfertigt die geringe Streuung der Werte. Jedoch liegt hier ein „extremer“ Ausreißer (Stern in Abbildung 50) vor, der außerhalb der Box liegt.

Die Boxplots für die Gruppen 1 (Bifix QM, mit Korund vorbehandelt, ohne Alterung) und 2 (Bifix QM, mit Rocatec vorbehandelt, ohne Alterung) zeigen signifikante Unterschiede in ihren Quantilen. Der Median der Gruppe 2 liegt ca.  $\sim 15$  N/mm<sup>2</sup> höher als der für Gruppe 1. Daraus kann man schließen, dass durch die Rocatec-Konditionierung des Prüfkörpers die Haftkraft des Klebers erhöht wird. Betrachtet man den Median der Gruppe 2 in der Box fällt auf, dass er im oberen Bereich der Box liegt und somit die Quantile in dieser Versuchsreihe eher über 24 N/mm<sup>2</sup> erreichen. Die höheren Quantile werden durch den oberen Whisker des Boxplots bestätigt, da er länger als der untere Whisker ist. Die Box für Gruppe 1 zeigt eine große Streuung der Werte über den Median. Die Streuung wird durch den oberen Quantil deutlich, der größer als der untere Quantil ist und durch mehr Messwerte bestimmt wird.

Die Boxplots der Gruppe 5 (Panavia, mit Korund vorbehandelt, ohne Alterung) und 6 (Panavia, mit Rocatec vorbehandelt, ohne Alterung) zeigen in der Häufigkeitsverteilung ihrer Messwerte keine großen Unterschiede. Der Median liegt in Gruppe 6 bei  $\sim 27$  N/mm<sup>2</sup> und für Gruppe 5 bei ca.  $\sim 25$  N/mm<sup>2</sup>. In beiden Boxen der Gruppen 5 und 6, ist das obere Quantil länger als das untere Quantil, was für eine Streuung der Werte über den Median spricht. Die Streuung in Gruppe 5 ist größer als die Streuung in Gruppe 6, das verdeutlicht die Länge der Box mit ihrem Whisker. Der Whisker wird durch einen Wert aus den Daten bestimmt. In Gruppe 5 wird ein Spitzenwert von knapp  $\sim 39$  N/mm<sup>2</sup> erreicht, während in der Gruppe 6 der Spitzenwert bei  $\sim 32$  N/mm<sup>2</sup> liegt. Durch den Spitzenwert in Gruppe 5 lässt sich erklären, warum der Whisker so lang ist.

Die Boxplots der Gruppen 7 (Panavia, mit Korund vorbehandelt, nach Alterung) und 8 (Panavia, mit Rocatec vorbehandelt, nach Alterung) zeigen gegenüber der Versuchsreihe in Gruppe 5 und 6 größere Unterschiede. Der Median der Gruppe 8 liegt bei  $\sim 28$  N/mm<sup>2</sup> und der von Gruppe 7 bei ca.  $\sim 23$  N/mm<sup>2</sup>.

Ein weiterer Unterschied in der Boxplots Darstellung ist die Länge des oberen Quantils in Gruppe 8. Das obere Quantil ist um ca  $10 \text{ N/mm}^2$  länger als das obere Quantil der Gruppe 7. Daraus kann man schließen, dass durch die Rocatec-Konditionierung die Haftwerte für Panavia nach künstlicher Alterung erhöht werden. Die Boxplots für die Gruppen 9 (Rely X, mit Korund vorbehandelt, ohne Alterung) und 10 (Rely X, mit Rocatec vorbehandelt, ohne Alterung) zeigen Unterschiede in der Länge ihrer Box. So ist die Box der Gruppe 9 relativ kurz, was für die geringe Streuung der Werte spricht. Allerdings liegt in dieser Gruppe ein milder Ausreißer, der durch den kleinen Kreis in der Abbildung (Abb. 50) dargestellt ist. Die Mediane der Gruppen 9 und 10 liegen relativ auf gleicher Höhe, für die Gruppe 9 bei  $\sim 28 \text{ N/mm}^2$  und für Gruppe 10 bei ca.  $\sim 29 \text{ N/mm}^2$ . Folglich kann man die Hypothese aufstellen, dass die Art der Vorbehandlung der Prüfkörperoberfläche, keinen großen Einfluss auf die Haftkraft von Rely X Unicem ausübt. Allerdings liegt der Spitzenwert der Gruppe 10 um ca.  $8 \text{ N/mm}^2$  höher als der von Gruppe 9. Auch ist der obere Quantil in Gruppe 10 länger, was aussagt, dass der überwiegende Teil der Werte über dem Median lokalisiert ist. Also scheint die Rocatec-Konditionierung die Haftkraft von Rely X Unicem positiv zu beeinflussen.

Die Boxplots der Gruppen 11 (Rely X, mit Korund vorbehandelt und nach simulierter Alterung) und 12 (Rely X, mit Rocatec vorbehandelt, nach simulierter Alterung) zeigen die Versuchsreihen mit Rely X Unicem und nach künstlicher Alterung. Die Boxplots zeigen Abweichungen in deren Mediane. Der Median der Gruppe 12 liegt um ca.  $5 \text{ N/mm}^2$  höher als der Median der Gruppe 11. Der Spitzenwert in Gruppe 12 ist um  $8 \text{ N/mm}^2$  höher als in Gruppe 11 und liegt bei  $\sim 41 \text{ N/mm}^2$ . Was die Boxplots gemeinsam haben ist die Streuung der Werte um den Median, bei beiden Boxen sind obere und untere Quantile relativ gleich groß. Die Häufigkeitsverteilung der Werte um den Median ist gleichmäßig, was für die Reproduzierbarkeit des Versuchs spricht.

Betrachtet man alle Boxplots, kann man die Hypothese aufstellen, dass der Einflussfaktor Vorbehandlung mit Rocatec die Haftkraft der drei Kleber erhöht. Dies erkennt man an den höheren Medianen der jeweiligen Versuchsreihe die mit Rocatec vorbehandelt wurden. In Abhängigkeit von der Alterung zeigt sich für Rely X (Gruppen 9 bis 12), dass nach Alterung die Abzugswerte gestiegen sind. Bei Bifix QM oder Panavia zeigt sich dieser Anstieg der Abzugswerte nach Alterung, im Vergleich der Mediane nicht (Abb. 50).

In Abbildung 51 sind die Boxplots der drei Kleber ohne künstliche Alterung dargestellt. Es präsentiert sich deutlich, dass die Abzugswerte für alle drei Kleber durch die Rocatec-Konditionierung erhöht werden. Außer im Boxplot für Panavia und der Korund-Konditionierung zeigt sich der obere Whisker relativ lang und mit einem Spitzenwert von ca.  $\sim 38 \text{ N/mm}^2$ . Allerdings ist die Box lang, was für eine Streuung der Werte spricht. Die Box für Panavia, mit Rocatec konditioniert, zeigt hingegen eine geringe Streuung mit einer Anhäufung der Messwerte um den Median.

Die Abbildung 51 verdeutlicht die signifikanten Unterschiede in den Abzugswerten zwischen Bifix QM und Panavia oder Rely X. Dabei erreicht Bifix mit seinen Spitzenwert das untere Niveau der Messwerte für Panavia bzw. Rely X.

(Hinweis zu den folgenden Grafiken: mit „Sandstra“ ist die Korundstrahlung gemeint)

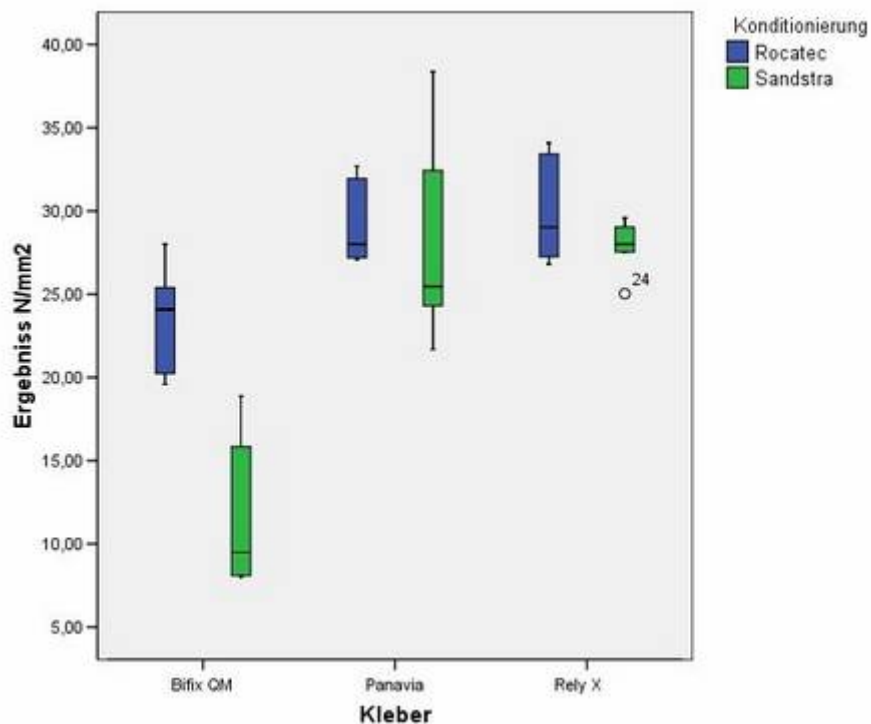


Abb. 51: Boxplots Darstellung der Werte ohne Langzeitlagerung und TWL

In der nächsten Abbildung (Abb.52) sind die Boxplots der Kleber nach Langzeitlagerung und Temperaturwechsellast dargestellt. Auch in dieser Abbildung zeigt sich deutlich, dass die Kleber durch die Rocatec-Konditionierung höhere Abzugswerte erreichen. Für Bifix QM präsentierte sich die Vorbehandlung mit Rocatec als besonders sinnvoll, da nur die Rocatec konditionierten Verklebungen der Prüfkörper (Gruppe 4), in der simulierten Alterung bestehen konnten.

Die Verklebungen der Prüfkörper die mit Korundstrahlung vorbehandelt wurden (Gruppe 3), haben sich während der simulierten Alterung gelöst. Rely X präsentiert in dieser Abbildung (Abb. 52) höhere Werte als Panavia. Was besonders auffällt, ist der Unterschied der Mediane zwischen Rely X und Panavia. Während bei Rely X, unabhängig von der Konditionierungsart, die Mediane relativ mittig lokalisiert sind, liegen sie bei Panavia im unteren Drittel der Box. Deshalb zeigen sich die oberen Quantile für die Panavia-Boxplots länger als die unteren Quantile, woraus man schlussfolgern kann, dass statistisch gesehen die meisten Quantile über dem Median liegen.

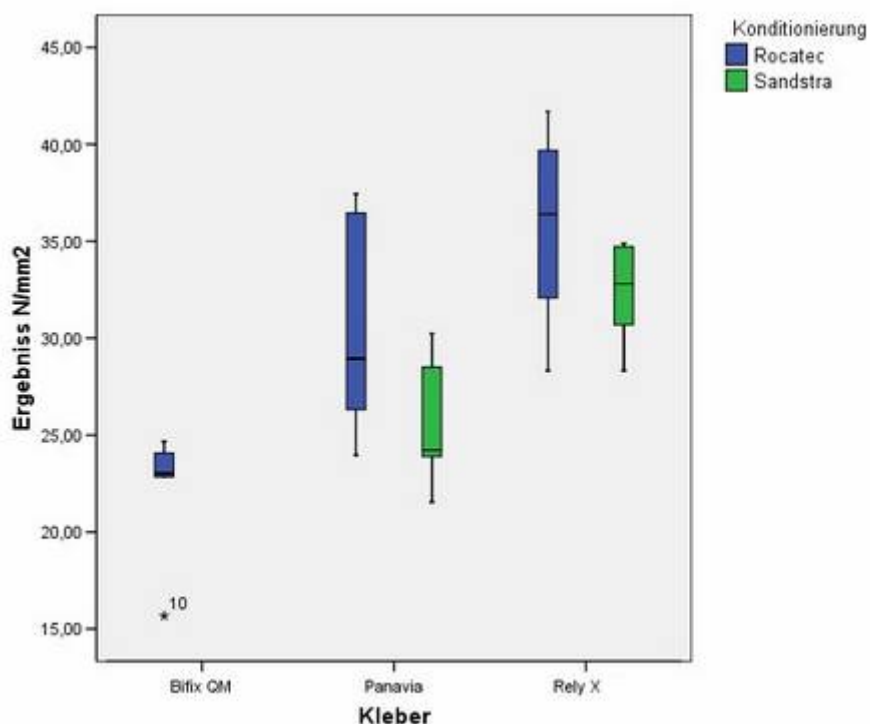
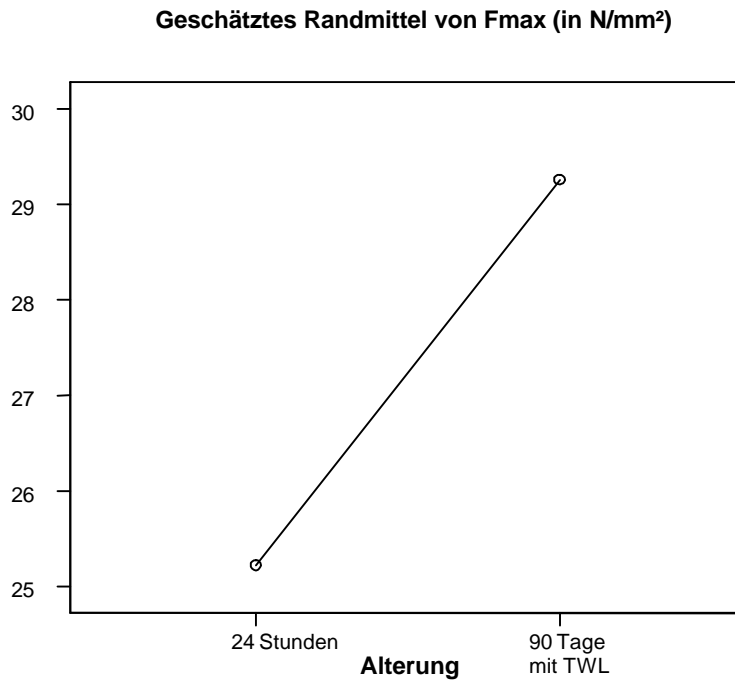


Abb.52: Boxplots Darstellung der Abzugswerte nach Langzeitlagerung und TWL

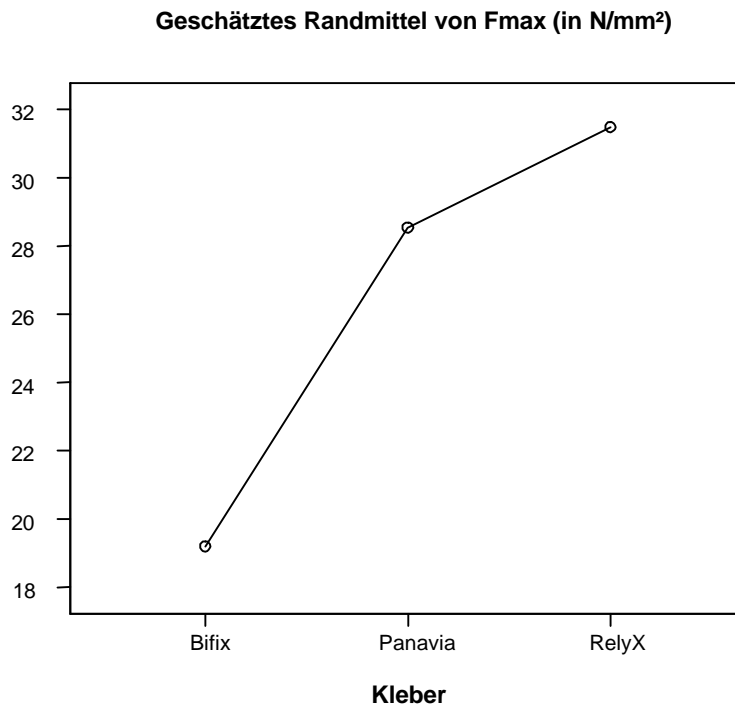
Die nächsten Abbildungen (Abb. 53 bis 61) zeigen Diagramme, die ein geschätztes Randmittel von der Haftkraft ( $F_{max}$ ) sind und in Abhängigkeit von verschiedenen Einflussfaktoren berechnet wurden. Das geschätzte Randmittel ist eine Berechnung der vorliegenden Messwerte, bezüglich der Interaktionen der verschiedenen Einflussfaktoren untereinander. Die Berechnung wird graphisch dargestellt. Die Einflussfaktoren sind die simulierte Alterung (mit TWL), die Kleber und die Vorbehandlungsart, also Vorbehandlung der Prüfkörperoberfläche mit Korund oder mit dem Rocatec-System.

In der Abbildung 53 ist die Alterung als alleinige Variable dargestellt. Die Abzugswerte aller drei Kleber wurden als Grundlage für die Berechnung des Diagramms verwendet. Man erkennt, dass der Wert von  $F_{max}$ , für alle Kleber nach Temperaturwechsellast und 90 Tagen simulierter Alterung, deutlich höher liegt als der Wert nach 24 Stunden Liegezeit.



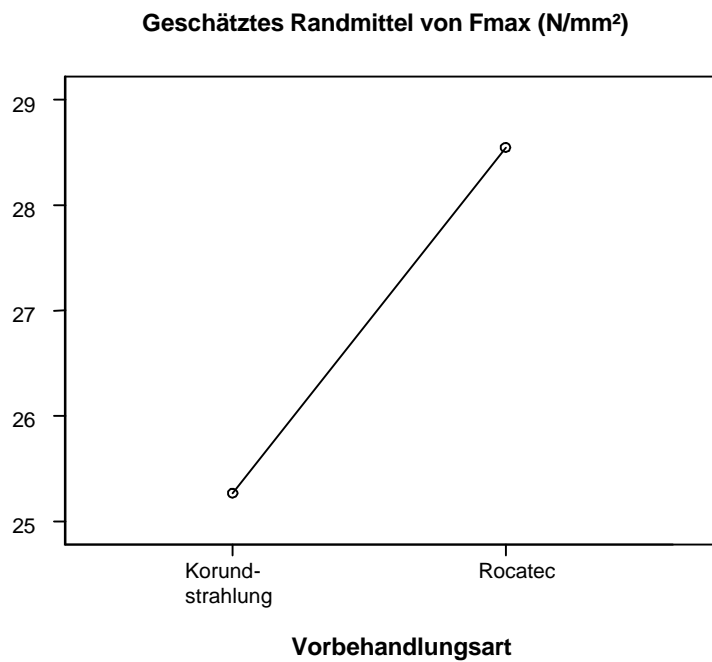
*Abb. 53: Einflussfaktor: simulierte Alterung (gilt für die Abzugswerte aller Kleber )*

In Abbildung 54 sind die Kleber als alleinige Variable dargestellt. Für die Berechnung sind alle Werte der Kleber benutzt worden, unabhängig von der Konditionierung. Man stellt fest, dass die Werte für Bifix signifikant unter den Werten für Panavia und Rely X liegen, während Rely X mit seinen Werten höher als Panavia liegt.



*Abb.54: Einflussfaktor: Kleber*

Abbildung 55 zeigt die Vorbehandlungsart der Prüfkörperoberfläche als alleinige Variable.



*Abb.55: Einflussfaktor: Vorbehandlung (Werte aller Kleber zusammen)*

Als Grundlage für die Berechnung dieses Diagramms sind die Abzugswerte aller Kleber, die durch die jeweilige Konditionierungsart erreicht wurden, benutzt worden.

Die Abbildung 55 untermauert die Abbildungen 52 und 51, in denen festgestellt wurde, dass mittels Rocatec-Konditionierung der Prüfkörper höhere Abzugswerte erreicht werden als mit der Vorbehandlung der Prüfkörper mittels Korund.

In der nächsten Darstellung (Abb.56) werden zwei Einflussfaktoren benutzt, einmal die Alterung und die Kleber. Man beobachtet, dass bei Bifix und Rely X die Werte nach Alterung signifikant steigen, während die Werte für Panavia nach simulierter Alterung leicht sinken. Dies ist durch den Spitzenwert zu erklären, den Panavia in der Gruppe 5 (ohne Alterung, mit Korund konditioniert) erreicht. Deutlich ist auch der Unterschied der Verbundfestigkeitswerte der Kleber zu erkennen. Bifix QM hat signifikant niedrigere Werte als Panavia oder Rely X.

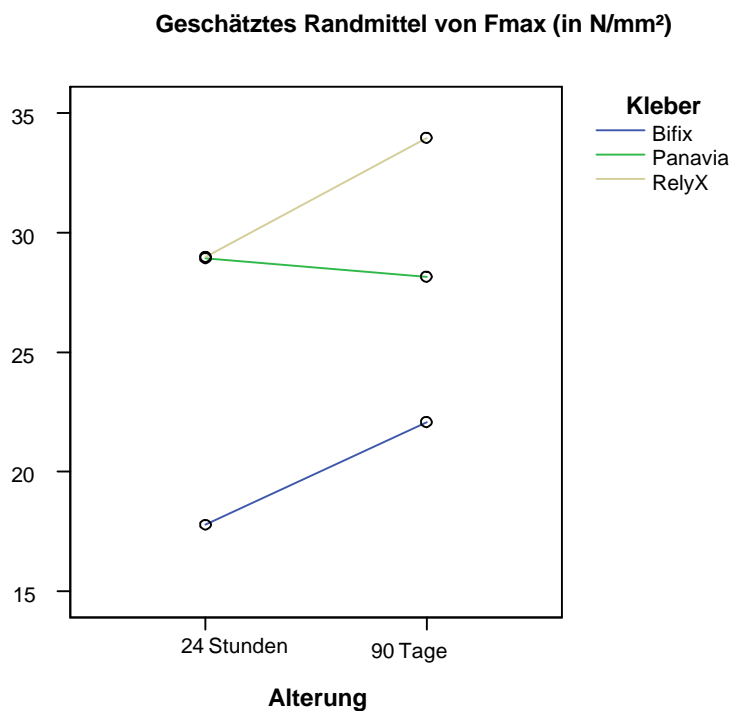
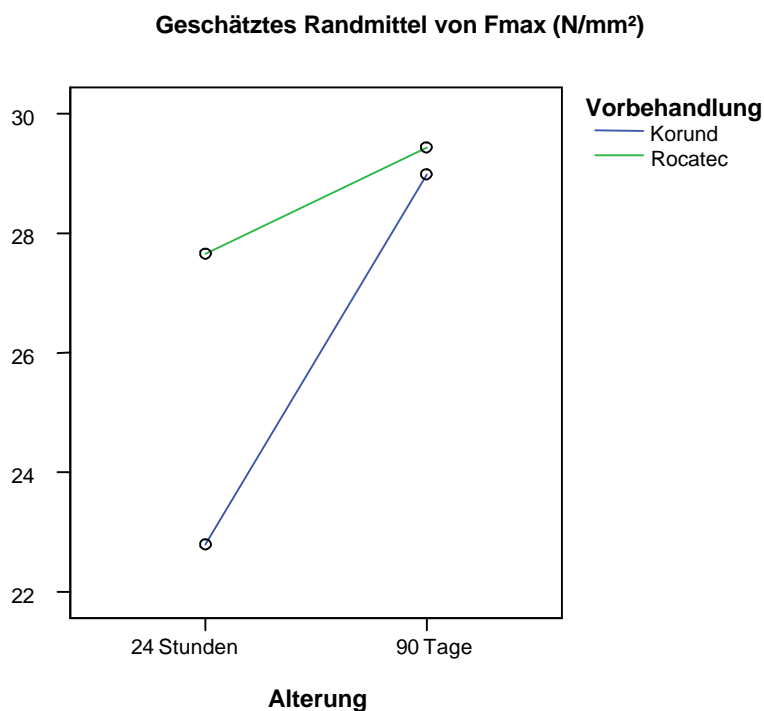


Abb. 56: Einflussfaktoren: Alterung und Kleber

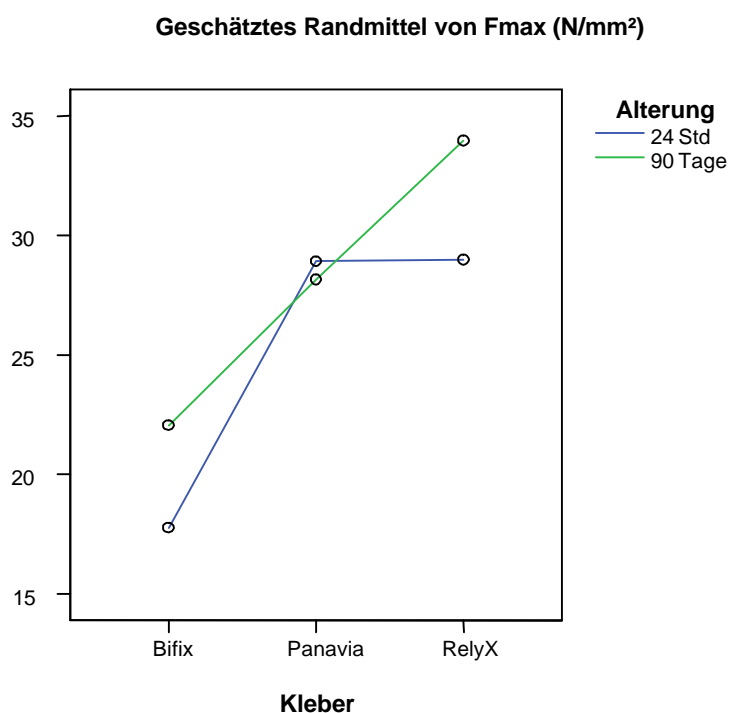
Das nächste Diagramm (Abb.57), zeigt als Einflussfaktoren die Interaktion der Alterung mit der Vorbehandlung. Analog zu den anderen Diagrammen wurden zur Berechnung von  $F_{max}$  die Werte der drei Kleber benutzt. Das geschätzte Randmittel von der Haftkraft steigt mit beiden Konditionierungsarten nach Alterung deutlich an. Wobei die Steigung bei der Korundstrahlung sehr steil ist, dies bedeutet, dass die Werte sich nach Alterung wesentlich erhöhen. Abbildung 57 zeigt, dass nach 24 Stunden Liegezeit der Wert der Korundstrahlung signifikant unterhalb der Rocatec-Konditionierung liegt. Nach Alterung liegt hingegen dieser Unterschied in den Abzugswerten kaum vor, da die Werte im Gegensatz zur Rocatec-Konditionierung stark steigen.



*Abb. 57: Einflussfaktoren: Alterung und Vorbehandlung (für alle Kleber)*

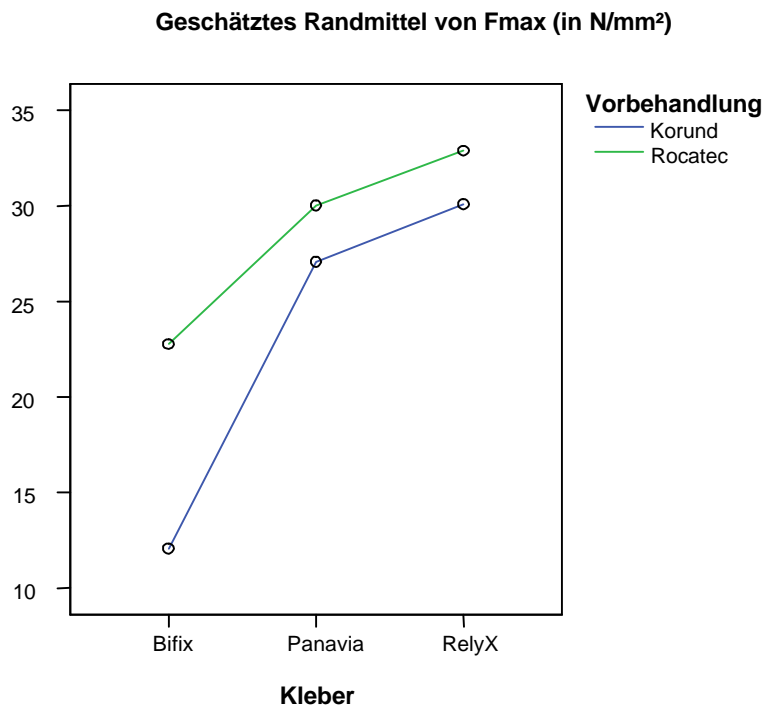


In Abbildung 58 wird die Haftkraft unter Einfluss der Kleber und der Alterung berechnet, unabhängig von der Konditionierungsart. Man kann erkennen, dass die Werte für Bifix nach Temperaturwechsellast steigen, genauso die Werte von Rely X. Die Werte für Panavia sinken leicht nach der Wasserlagerung und der Temperaturwechsellast. Während die Werte für Panavia und Rely X nach 24 Stunden Liegezeit relativ auf gleichem Niveau liegen, sind die Werte für Bifix QM niedriger. Auch nach simulierter Alterung stehen die Werte für Bifix signifikant unterhalb der beiden anderen Kompositkleber. Rely X erreicht statistisch die höchsten Werte in Abhängigkeit zur Alterung.



*Abb. 58: Einflussfaktoren: Kleber und Alterung*

In Abbildung 59 zeigen die Kleber in Abhängigkeit zur Vorbehandlung ihre Wirkung auf die Haftwerte.



*Abb. 59: Einflussfaktoren: Kleber und Vorbehandlung*

In Abbildung 59 fällt auf, dass die Linien relativ parallel verlaufen. Das bedeutet, dass die Abzugswerte für alle drei Kleber durch die Konditionierung mit dem Rocatec-System einen gleichmäßigen Anstieg von Fmax präsentieren und dies auf die Standardisierung des Versuchsaufbaus und der Durchführung zurückzuführen ist. Auch hier erkennt man, dass Bifix QM signifikant niedrigere Abzugswerte erreicht als Panavia oder Rely X. Im Gegensatz zeigt Panavia zu Rely X keine wesentlichen Unterschiede in den Abzugswerten, ob nach simulierter Alterung oder ohne Alterung. Jedoch liegt Rely X mit seinen Abzugswerten höher als Panavia.

In der nächsten Darstellung (Abb.60) werden die Abzugswerte aller drei Kleber zusammengefasst, um durch die Interaktionen der Vorbehandlung mit der Alterung den Einfluss auf  $F_{max}$  darzustellen. Hier ist deutlich zu unterscheiden, dass die Werte bei der Rocatec-Konditionierung nach 24 Stunden Liegezeit signifikant höher liegen als die Werte bei der Korundstrahlung. Nach Alterung nehmen in beiden Konditionierungsarten die Werte statistisch signifikant zu, besonders die für die Korundstrahlung. Die Werte für die Korundstrahlung steigen so an, dass kein signifikanter Unterschied zum Rocatec-System vorliegt.

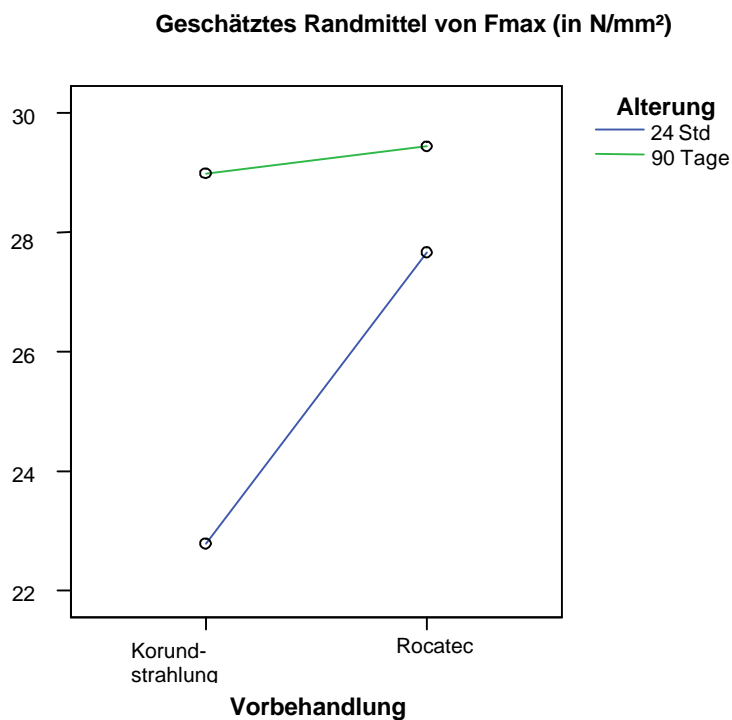


Abb. 60: Einflussfaktoren: Vorbehandlung und Alterung (für alle Kleber)

Die nächste Grafik (Abb.61) zeigt wieder die Vorbehandlung und die Kleber als Einflussgrößen, diesmal ist die Vorbehandlung auf der X-Achse dargestellt.

In der Abbildung ist deutlich zu erkennen, dass hier ebenfalls, wie in Abbildung 59, die Graphen für Panavia und Rely X relativ parallel zueinander verlaufen. Die Linie für Bifix zeigt eine höhere Steigung als die beiden anderen Kleber. Die Werte von Bifix liegen allerdings auch hier unterhalb der anderen Kompositkleber.

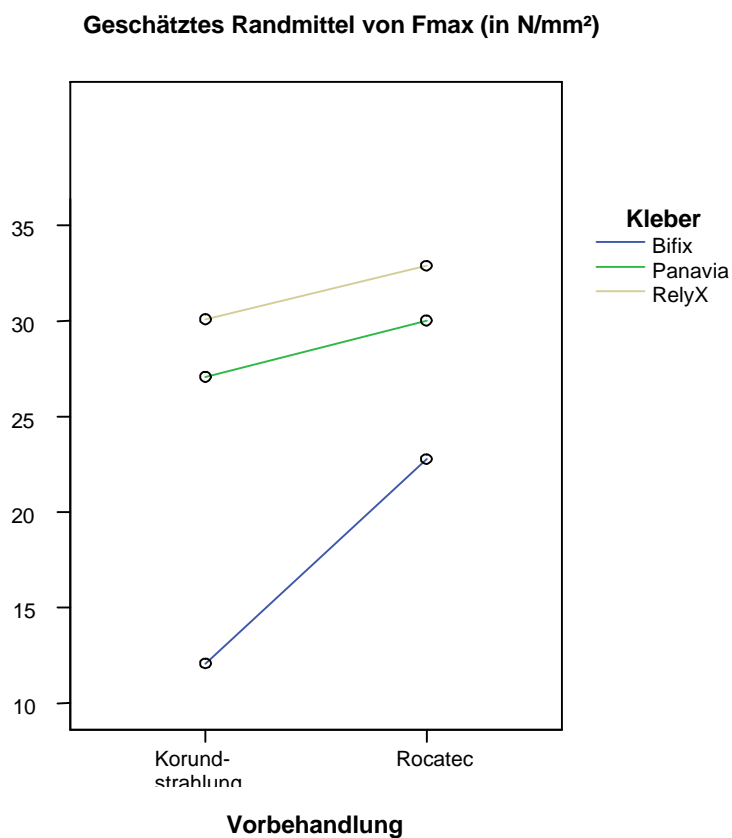


Abb. 61: Einflussfaktoren: Vorbehandlung und Kleber

Zum Abschluss der Präsentation liegt in Abbildung 62 eine deskriptive Statistik vor, in der ein allgemeines lineares Modell berechnet wurde. Ein allgemeines lineares Modell ist ein Ansatz, in der verschiedene Methoden der Datenauswertung in ein einheitliches Modell integriert werden. Die Einflussfaktoren sind die Alterung, die Kleber und die Vorbehandlung der Prüfkörperoberfläche.

### Deskriptive Statistiken

Abhängige Variable: Fmax

Alterung	Kleber	Vorbehandlung	Mittelwert	Standardabweichung	N
<b>Abschnitt 1</b>	Bifix QM	Korund	12.0680	4.97846	5
		Rocatec	23.4640	3.54430	5
		Gesamt	17.7660	7.25764	10
<b>24 Std.</b>	Panavia F	Korund	28.4460	6.82129	5
		Rocatec	29.3900	2.71123	5
		Gesamt	28.9180	4.91879	10
	Rely X	Korund	27.8440	1.77004	5
		Rocatec	30.1180	3.42610	5
		Gesamt	28.9810	2.83652	10
<b>Gesamt</b>		Korund	22.7860	9.10363	15
		Rocatec	27.6573	4.30788	15
		Gesamt	25.2217	7.42328	30
<b>Abschnitt 2</b>	Bifix QM	Rocatec	22.0540	3.64656	5
		Gesamt	22.0540	3.64656	5
<b>90 Tage mit TWL</b>	Panavia F	Korund	25.6780	3.57845	5
		Rocatec	30.6220	6.04405	5
		Gesamt	28.1500	5.35881	10
	Rely X	Korund	32.2880	2.79368	5
		Rocatec	35.6340	5.46800	5
		Gesamt	33.9610	4.45725	10
<b>Gesamt</b>		Korund	28.9830	4.61483	10
		Rocatec	29.4367	7.51421	15
		Gesamt	29.2552	6.40115	25
<b>Abschnitt 3</b>	Bifix QM	Korund	12.0680	4.97846	5
		Rocatec	22.7590	3.47064	10
		Gesamt	19.1953	6.48372	15
<b>Gesamt-Werte</b>	Panavia F	Korund	27.0620	5.33849	10
		Rocatec	30.0060	4.46368	10
		Gesamt	28.5340	5.02180	20
<i>Alle Werte aus der 24 Std. und aus der 90 Tage Alterung zusammen gerechnet</i>	Rely X	Korund	30.0660	3.21669	10
		Rocatec	32.8760	5.19203	10
		Gesamt	31.4710	4.44391	20
	<b>Gesamt</b>	Korund	25.2648	8.11981	25
		Rocatec	28.5470	6.08571	30
		Gesamt	27.0551	7.20506	55

Abb. 62: Allgemeines lineares Modell (GLM)

Die Abbildung 62 ist in drei Abschnitte eingeteilt. Der erste Abschnitt stellt die Alterung nach 24 Stunden dar, der zweite Abschnitt zeigt die Alterung nach 90 Tagen mit TWL und der letzte ist der Gesamt-Abschnitt, in dem die Daten für den Mittelwert und der Standardabweichung, aus den Ergebnissen der beiden ersten Abschnitte berechnet worden sind. In den einzelnen Abschnitten werden die Kleber in Spalten dargestellt, in denen der Mittelwert und die Standardabweichung in Abhängigkeit von der jeweiligen Konditionierungsart berechnet wurden. In derselben Spalte für die Kleber, sind die Werte für die Konditionierungsart zusammen berechnet worden und als Gesamt- Werte dargestellt. Durch die zweiseitige Berechnung der Werte der Vorbehandlungsarten gewinnt man einen Eindruck über die potentielle Haftkraft des jeweiligen Klebers. In jedem Abschnitt wiederum liegt eine Spalte vor, die Spalte *Gesamt*, in der die Werte für den Mittelwert und der Standardabweichung nur in Abhängigkeit von der Konditionierungsart und der Lagerungszeit dargestellt sind. Durch das allgemeine lineare Modell kann man Aussagen treffen, wie die unabhängigen Variablen Alterung, Kleber und Konditionierungsart auf die abhängige Variable  $F_{max}$  wirken.

Im ersten Abschnitt des linearen Modells, nach der 24 Stunden Alterung, zeigt sich bei Bifix QM, dass die ermittelten Messwerte unter den Werten von Panavia und Rely X liegen. Durch die Vorbehandlung mit dem Rocatec-System erfahren die Abzugswerte für Bifix QM eine signifikante Steigerung. Bei Panavia und Rely X liegen die Mittelwerte auf relativ gleichem Niveau, wobei bei beiden Klebern zu beobachten ist, dass mit der Rocatec-Konditionierung höhere Mittelwerte erreicht werden. In der letzten Spalte des Abschnittes nach 24 Stunden Alterung, in der unabhängig von den Klebern die Vorbehandlungsarten gemeinsam berechnet wurden, zeigt sich eindeutig, dass das Rocatec-System der Korundstrahlung überlegen ist und höhere Werte erreicht.

Im zweiten Abschnitt des linearen Modells, nach 90 Tagen Alterung und TWL, sind die Mittelwerte der Kleber ähnlich different, wie nach der 24 Stunden Lagerung. Bifix QM liegt mit seinem Mittelwert unter den Werten von Panavia und Rely X. Auch zeigt sich das Rocatec-System gegenüber der normalen Korundstrahlung als Vorbehandlungsmaßnahme überlegen und erreicht höhere Mittelwerte. Allerdings zeigt Panavia einen leichten Abfall des Mittelwertes in der Abzugsserie, in der die Prüfkörper mit Korund vorbehandelt wurden, gegenüber dem gleichnamigen Mittelwert nach 24 Std. Alterung.

Rely X dagegen zeigt in beiden Vorbehandlungsarten eine Erhöhung der Mittelwerte. In der letzten Spalte des zweiten Abschnittes, zeigt sich die Rocatec-Konditionierung im Mittelwert etwas höher als die Korundstrahlung. Dies liegt daran, dass für Bifix QM, nach 90 Tagen Alterung und mit Korund vorbehandelt, keine Werte vorliegen, da die verklebten Prüfkörper sich während der simulierten Alterung gelöst haben.

In den dritten und letzten Abschnitt des linearen Modells, sind alle Werte, die nach der 24 Stunden Lagerung und nach Alterung sowie Temperaturwechsellast ermittelt wurden, zusammen berechnet worden. Die Berechnung erfolgte in Abhängigkeit von den Klebern und der jeweiligen Vorbehandlung. Auch hier sind die Werte für Bifix QM niedriger als die Werte der anderen Kleber. Bifix QM erreicht nach zweisame Berechnung der Abzugswerte (Gesamtwert) für die Vorbehandlungsarten, einen Mittelwert von  $\sim 19,2 \text{ N/mm}^2$  mit einer Standardabweichung von  $\sim 6,5 \text{ N/mm}^2$ . Panavia und Rely X erreichen im Vergleich zu dem Wert von Bifix einen Mittelwert von  $\sim 28,6 \text{ N/mm}^2$ , für Panavia und  $\sim 31,5 \text{ N/mm}^2$  für Rely X. Die Standardabweichung liegt für Panavia bei  $\sim 5 \text{ N/mm}^2$ . Für Rely X liegt die Standardabweichung bei  $\sim 4,5 \text{ N/mm}^2$ . Die Standardabweichung ist ein Maß für die Streuung der Werte um ihren Mittelwert. Je niedriger die Standardabweichung ist, umso mehr ermittelte Messwerte befinden sich um den Mittelwert.

Im letzten Abschnitt der deskriptiven Statistik ist noch festzustellen, dass die Verklebungen, die mit dem Rocatec-System vorbehandelt wurden, gegenüber der Korundvorbehandlung höhere Messwerte erreichen. Bei Bifix ist der Unterschied in den Mittelwerten für die Korundvorbehandlung sowie für die Rocatec-Konditionierung signifikant, während bei Panavia und Rely X dieser Unterschied nicht so groß ist. Diese Differenz zwischen den ermittelten Mittelwerten für die Korundvorbehandlung und der Rocatec-Konditionierung wird nochmals in der Spalte Gesamt, der letzten Spalte, deutlich. In dieser Spalte sind die Mittelwerte für die Korund- sowie die Rocatec-Konditionierung unabhängig von den Klebern berechnet worden. Die Rocatec-Konditionierung erreicht einen Mittelwert von  $\sim 28,6 \text{ N/mm}^2$  und die Korundvorbehandlung einen Mittelwert von  $\sim 25,3 \text{ N/mm}^2$ . Für die Korundvorbehandlung wurden 5 Werte nicht mitberechnet, da die Verklebungen sich während der simulierten Alterung gelöst hatten. Die Standardabweichung für die Korundvorbehandlung liegt bei  $\sim 8,2 \text{ N/mm}^2$  und für die Rocatec-Konditionierung bei  $\sim 6,1 \text{ N/mm}^2$ . Der letzte Wert in der Tabelle ist ein Anhaltspunkt über die potentielle

Haftkraft der hier verwendeten Kleber und liegt bei  $\sim 27,1 \text{ N/mm}^2$  mit einer Standardabweichung von  $\sim 7,3 \text{ N/mm}^2$ .

## 5 Diskussion und Schlussfolgerungen

Aufgrund der hohen Eigenfestigkeit von Zirkonoxid ist es möglich, Kronen und Brücken aus diesem Material mit entsprechender retentiver Präparationsform der Pfeilerzähne konventionell einzusetzen [Blatz, Avishai, Kern 2004; Pospiech et al. 2002; Kurbad und Reichel 2004]. Adhäsivbrücken werden nur adhäsiv befestigt, weil auf eine retentive Präparationsform verzichtet wird. Durch das Auslassen der retentiven Präparationsform ist eine minimal invasive Präparation erst möglich. Somit beruht der klinische Erfolg einzig und allein auf dem Klebeverbund [Blatz, Avishai, Kern 2002 und 2004]. Wie in Abbildung 1 und 2 erkennbar ist, beschränkt sich die Präparation auf orale Anteile des Zahnes. Durch die Minimierung der Präparation ist es nötig, einen adhäsiven Verbund mit der Zahnoberfläche zu schaffen, damit einwirkende Kräfte die Adhäsivbrücke von der Zahnoberfläche nicht lösen können [Kern 2005a und 2005b].

Fest steht, dass das Einsetzen mit konventionellen Zementen wie Glasionomerezementen oder Zinkphosphatzementen den benötigten adhäsiven Verbund mit der Zahnoberfläche nicht gewährleisten und ästhetische Nachteile mit sich bringen. Die ästhetischen Nachteile ergeben sich aus der mangelnden Transluzenz bzw. der starken Opazität, die diese Zemente besitzen. Kompositkleber hingegen können in Zahnfarbe gewählt werden und benachteiligen die Ästhetik der Adhäsivbrücke nicht.

Weitere wesentliche Vorteile, die für das adhäsive Zementieren sprechen, sind die bessere Retention, die verbesserte marginale Adaption, die Erhöhung der Bruchfestigkeit der Restauration und des Pfeilerzahnes, und die Verringerung des Randspaltes bzw. der Mikrospalten. Ebenfalls ist in Fällen mangelnder Retention eine adhäsive Befestigung absolut notwendig [Blatz, Avishai, Kern 2002 und 2004; Kern und Thomson 1996].



In der Studie zeigen sich vor allem Panavia F 2,0 und Rely X Unicem als gut geeignet, um einen dauerhaften und guten Klebeverbund zu erhalten. Beide zeigen standardmäßige Mittelwerte um die  $\sim 30 \text{ N/mm}^2$ , wobei die Abzugswerte für Rely X Unicem ein wenig höher sind als die Panavia F Werte. Hingegen zeigt Bifix QM, signifikant niedrigere Mittelwerte. Besonders nach Alterung und Korundstrahlung als Konditionierungsart, zeigt Bifix QM große Schwächen, in der sich alle Prüfkörper gelöst haben und somit keine Werte vorliegen. Auch ohne Alterung und Korundstrahlung als Konditionierungsart (Gruppe 1) liegt der Mittelwert ca.  $10 \text{ N/mm}^2$  unter den Werten der Gruppen 2 (Bifix, ohne Alterung, mit Rocatec-Konditionierung) und 4 (Bifix, nach Alterung, mit Rocatec-Konditionierung). Im Gegensatz zu den abweichenden Mittelwerten zwischen den Gruppen 1 und 2 oder 4 zeigen die Mittelwerte für die Gruppen 2 und 4 keine wesentlichen Unterschiede. Dies spricht für die Reproduzierbarkeit des Versuchs und dafür, dass die simulierte Alterung, die in Gruppe 4 durchgeführt wurde, dem Haftverbund mittels Silikatisierung nicht schwächt.

Die Annahme liegt nahe, dass der chemisch adhäsive Verbund von Bifix QM zur Zirkonoxidkeramik nicht ausreichend ist. Wie bereits erwähnt ist Bifix QM ein konventioneller Bis-GMA-Kompositkleber, der keine reaktive Phosphatgruppe besitzt. Aber gerade diese Gruppe besitzt eine chemische Affinität zu Metalloxiden, um einen chemisch adhäsiven Verbund zu Zirkonoxid zu bewirken [Blatz, Avishai, Kern 2004]. Dem Zirkonoxid wird das Yttriumoxid zugeführt, um es zu stabilisieren, dadurch besitzt Zirkonoxid in seinem Gefüge ein Metalloxid, das mit Phosphatgruppen eine chemische Affinität aufweist.

Ein weiterer Grund für die niedrigeren Abzugswerte sind die Temperaturschwankungen im Wechselbad, die dem Klebeverbund zugesetzt haben. Die Gruppe 3 (Bifix, nach Alterung, mit Korund vorbehandelt) hat keine Werte vorzeigen können, da sich die verklebten Prüfkörper in dem Temperaturwechsellast-Behälter gelöst haben und dies zu statistisch niedrigeren Werten führte. Des Weiteren kamen nur bei Bifix QM kohäsive Brüche vor, was man auf eine gestörte Polymerisation zurückführen kann. Es sind über 75 % des Bruchverlaufs im Kleber zu erkennen. An dieser Stelle ist zu betonen, dass die Aushärtung der Kleber ausschließlich über die Dunkelhärtung (chemische Härtung) erfolgt ist. In diesem Fall ist anzunehmen, dass die Dunkelhärtung bei Bifix QM noch Schwächen in der Polymerisationsreaktion aufweist, genauer gesagt, in der Verkettung der Kohlenstoffatome miteinander.

So genannte Aktivatoren lösen die Kettenbildung aus. Die Durchmischung dieser Aktivatoren mit der Basis-Paste (Kleber) erfolgt bei Bifix QM über eine Mischkanüle, mit der genau 1 zu 1 dosiert wird. Daher ist das Mischungsverhältnis von Basis-Paste und Aktivator-Paste als Ursache der unzureichenden Polymerisation von Bifix QM und damit die gemessenen niedrigeren Werte, auszuschließen. Die Ursache der unzureichenden Polymerisation liegt somit in der unvollständigen Dunkelhärtung.

Aus den Werten und Abbildungen wird deutlich, dass das Rocatec-System statistisch signifikant höhere Werte erreicht als die Korundstrahlung. Dies wird von vielen anderen Studien auch bestätigt [Blatz, Avishai, Kern 2002 und 2004; Kern et al. 1991; Kern und Thomsen 1996; Kohlmeyer et al. 2004]. Vor allem bei Zirkonoxid, das keine Silikatanteile beinhaltet, scheint es sinnvoll zu sein, durch eine tribochemische Silikatisierung und anschließender Silanisierung mittels Silanflüssigkeit eine Oberflächenaktivierung zu erreichen. Dadurch bildet sich eine Verbindung, die auch nach Langzeitlagerung in Wasser und thermischer Wechsellast stabil bleibt. Bei Bifix QM sind signifikante Erhöhungen der Werte bei der Rocatec-Konditionierung gegenüber der Konditionierung mit Korund zu vermerken, welche auch in der Studie von Blatz, Avishai und Kern [2004] behandelt werden. In der Studie ist die These aufgestellt worden, dass das tribochemische Silikatisieren und Silanisieren mit dem Rocatec-System einen dauerhaft hohen Klebeverbund mit konventionellen Bis-GMA-Kompositklebern ermöglicht. Dass ein Silikatisieren der Zirkonoberfläche möglich ist, wurde durch die Verfärbung der Prüfkörperoberfläche ins Grau – Schwarze erkennbar. Auch die rasterelektronenmikroskopischen Bilder zeigen die Silikatschicht auf dem Zirkonoxid. Die Silikatschicht wiederum wird mit einer Silan-Flüssigkeit, die bifunktionelle Moleküle beinhaltet, bepinselt. Die Moleküle verbinden sich über eine funktionelle Gruppe mit der organischen Matrix der Kompositkleber und bewirken so den beständigen Klebeverbund [Blatz, Avishai und Kern 2002].

Bei Panavia F und Rely X Unicem ist der Unterschied in den Mittelwerten, zwischen der Konditionierung mit dem Rocatec-System und der Korundstrahlung geringer als bei Bifix QM. Allerdings liegen die Werte bei der Rocatec-Konditionierung trotzdem noch höher als bei der Korundstrahlung. Nach Alterung und Thermocycling (TWL) sind die Werte für Rely X Unicem gestiegen. Bei beiden Konditionierungsarten ist der Anstieg der Werte zu vermerken, nach Rocatec-Konditionierung und Alterung sind die absoluten Maximalwerte erreicht worden.

Dies kann damit zusammenhängen, dass durch die Wasseraufnahme des Klebers eine gewisse Plastifizierung im Kleber zustande kommt, die sich offensichtlich positiv auf die Scherfestigkeit auswirkt [Kern und Thomson 1996]. Bei Rely X Unicem sind im Vergleich die Mittelwerte bei der Rocatec-Konditionierung höher als bei der Korundstrahlung, unabhängig ob mit oder ohne simulierte Alterung. Obwohl in der Verarbeitungsanleitung der Hinweis steht, dass kein Ätzen, Primern, Bonding oder ähnliche Vorbehandlungsschritte notwendig sind, erzielt man mit dem Rocatec-System höhere Abzugswerte als die einfache Korundstrahlung. Panavia F zeigt keine statistisch signifikanten Unterschiede in Abhängigkeit zur Vorbehandlung. Dementsprechend liegen die Mittelwerte für die Gruppen 5 (ohne Alterung, mit Korund vorbehandelt) und 6 (ohne Alterung, mit Rocatec vorbehandelt) nahe beieinander. Vergleicht man die Mittelwerte der Gruppen 5, 6 und 8 (nach Alterung, mit Korund vorbehandelt) wird deutlich, dass die Mittelwerte kaum voneinander abweichen. In der Gruppe 5 wird mit Korundstrahlung vorbehandelt, die Konditionierung der anderen Gruppen erfolgt mit dem Rocatec-System, in der Gruppe 7 (nach Alterung, mit Korund vorbehandelt) Konditionierung mit Korundstrahlung nach Alterung. In dieser Gruppe ist der Mittelwert gegenüber den anderen Gruppen niedriger, was nun die Diskussion zulässt, ob bei Verwendung von Panavia eine Silikatisierung der Klebeflächen zu bedeutsam höheren Haftwerten führt.

*Kern et al.* hat in seinen Studien mit Panavia feststellen können, dass die tribochemische Silikatisierung und Silanisierung der Klebefläche mit einer Silan Flüssigkeit unter Verwendung von Panavia nicht zu signifikant höheren Haftwerten, gegenüber der Korundstrahlung führt [Kern 2005b; Kern und Wegner 2000b; Blatz, Avishai, Kern 2004]. Außerdem gibt es diverse Studien, in denen festgestellt wurde, dass die Silanisierung und tribochemische Silikatisierung den Klebeverbund zu verschiedenen Zirkonoxidrestorationen wesentlich erhöht [Blatz, Avishai und Kern 2004; Bulot et. al. 2003]. In Bezug auf Panavia hat Blatz, Avishai und Kern [2004] Panavia 21 benutzt und festgestellt, dass in Kombination mit Korundstrahlung ein dauerhaft stabiler Klebeverbund zu Zirkonoxidkeramik erzielt wird. Dies wiederum bestätigt den Maximalwert in Gruppe 5 (ohne Alterung, mit Korund als Vorbehandlung der Prüfkörperoberfläche), der von Panavia F im Versuch erreicht wurde. In dieser Gruppe wurde als Konditionierungsart die Korundstrahlung benutzt.

In seinen Studien hat *Kern* vor allem Panavia 21 und Panavia F benutzt, da sie das Phosphatmonomer MDP (10-Methacryloyloxydecyl-dihydrogen-phosphat) enthalten [Blatz, Avishai, Kern 2004; Kern und Wegner 2000b; Kern und Thompson 1996]. Diese speziellen Phosphatmonomere, die eine hohe Reaktivität besitzen, bewirken eine hohe Vernetzung der Klebermatrix und generieren damit ein hohes Molekulargewicht des Polymers. Durch den hohen Vernetzungsgrad der Klebermatrix, ist eine gleichmäßige und in der Kleberschicht tiefere Verkettung der Klebermoleküle zu erwarten, was gerade bei der Dunkelhärtung (chemische Härtung) eine große Rolle spielt, da ultraviolettes Licht zur Aktivierung und Aushärtung nicht eingesetzt wird. Die resultierenden Vorteile daraus sind niedrige Löslichkeiten, niedrige Quellung und hohe Biokompatibilität. Nach den Angaben der Hersteller sind in Tabelle 2 die Technischen Daten der Kompositkleber aufgelistet [3M ESPE, Rely X Unicem Produktdossier 2003; Kuraray-Panavia F 2,0 Produktinformation 2005; Voco-Bifix QM Produktinformation 2005].

Aus der Tabelle 2 ist zu entnehmen, dass die Löslichkeit von Rely X Unicem und Panavia F 2,0 geringer ist, als die von Bifix QM. Dies lässt sich anhand der Abzugswerte auch nachvollziehen. Die Härtungstiefe von Bifix QM ist im Gegensatz zu Rely X Unicem und Panavia F höher was sich anhand der Ergebnisse nicht erklären lässt, zumal sich die in Gruppe 3 (nach Alterung, mit Korund vorbehandelte Prüfkörperoberfläche) mit Bifix QM verklebten Prüfkörper während der Wasserlagerung gelöst haben. Die Wasseraufnahme der Kleber in  $\mu\text{g}/\text{mm}^3$  ist bei Rely X Unicem und Panavia fast gleich, während sie bei Bifix QM mit praktisch 0% beziffert wird. Dieser Wert kann ebenfalls anhand der Studie nicht untermauert werden, da sicherlich auch die Wasseraufnahme des Klebeverbundes die bedeutsam niedrigeren Werte als bei Rely X Unicem und Panavia F bewirkte.

Die Werte von Panavia F 2,0 und Rely X Unicem, zeigen keine bedeutsamen Unterschiede. Beide Kleber ähneln sich in ihrer Zusammensetzung, sie besitzen beide Phosphatmonomere [3M ESPE Rely X Unicem Produktdossier 2003; Kuraray, Panavia F 2,0 Produktinformation]. Gerade diese Gründe können bei Panavia F und Rely X Unicem die statistisch signifikant höheren Werte als bei Bifix QM erklären.

Bifix QM ist ein herkömmlicher Kompositkleber auf Bis-GMA-Basis. *Kern et al.* haben in mehreren Studien gezeigt, dass die Haftkraft von herkömmlichen Bis-GMA-Klebern gegenüber Klebern mit Phosphatmonomeren niedriger ist

[Blatz, Avishai, Kern 2004; Friederich und Kern 2002; Kern et al. 1991; Kern und Wegner 2000b; Kern und Thompson 1996].

Das allgemeine lineare Modell präsentiert mit einer deskriptiven Statistik alle Mittelwerte mit deren Standardabweichung für alle durchgeführten Abzugsserien.

Die Statistik besitzt drei große Abschnitte, in der einmal die Werte für die 24 Stundenlagerung, die Werte nach 90 Tagen Lagerung aufgelistet werden. Im dritten Abschnitt werden alle Werte zusammen genommen, um vor allem Rückschlüsse auf die Konditionierungsart zu treffen. In dem ersten Abschnitt, der 24 Stundenlagerung, ist nochmals bei Bifix QM der wesentliche Unterschied der Werte im Bezug auf die Vorbehandlung zu erkennen. Hierbei erreicht das Rocatec-System bedeutsam höhere Werte als die Korundstrahlung. Alle ermittelten Werte für Bifix QM erreichen im Mittel einen Wert von  $\sim 17,76 \text{ N/mm}^2$ . Unabhängig von der Vorbehandlung kann man so Rückschlüsse auf die potenzielle Haftkraft von Bifix QM machen. Wie bereits fest-gestellt, liegen bei Panavia die Werte der jeweiligen Vorbehandlungsmaßnahmen nahe bei einander, der Gesamtwert liegt bei knapp  $\sim 29 \text{ N/mm}^2$ . Somit kann man sagen, dass die potenzielle Haftkraft von Panavia F um die  $\sim 30 \text{ N/mm}^2$  beträgt. Bei Rely X sind die Werte mit der Rocatec-Konditionierung höher als die der Korundstrahlung. Der Gesamtwert liegt im Mittel auch bei knapp  $\sim 29 \text{ N/mm}^2$  somit besitzt Rely X ebenfalls eine potenzielle Haftkraft von  $\sim 30 \text{ N/mm}^2$ . In der letzten Spalte sind alle Mittelwerte, unabhängig von den Klebern, die mit den jeweiligen Konditionierungsverfahren ermittelt wurden, zusammengefasst. Man erkennt die charakteristisch höheren Werte, die mit der Rocatec-Konditionierung erreicht wurden. Somit haben die Kleber, die mit dem Rocatec-System vorbehandelt werden, eine höhere potenzielle Haftkraft als Kleber, die nur mit Korundstrahlung vorbehandelt sind.

Der zweite Abschnitt der deskriptiven Statistik zeigt die Mittelwerte nach 90 Tagen simulierter Alterung. Bei Bifix QM liegen hier keine Werte mit der Korundstrahlung vor, daraus resultiert, dass eine einfache Korundstrahlung für einen dauerhaften Verbund mit der Restaurationsoberfläche nicht ausreicht. Im Gegensatz erreichten die Verklebungen die mit dem Rocatec-System konditionierten wurden, im Mittel einen Werte von  $\sim 22 \text{ N/mm}^2$  und einer Standardabweichung von  $\sim 3,64 \text{ N/mm}^2$ .

Bei Panavia ist sichtbar, dass die Werte mit der Rocatec-Konditionierung zunehmen und auf einen Mittelwert von  $\sim 30,62 \text{ N/mm}^2$  mit einer Standardabweichung von  $\sim 6 \text{ N/mm}^2$  kommen.

Somit liegt dieser Wert oberhalb des Mittelwertes der mit der Korundvorbehandlung erreicht wurde. Der Wert für Panavia liegt bei  $\sim 25,68 \text{ N/mm}^2$  mit einer Standardabweichung von  $\sim 3,57 \text{ N/mm}^2$ . Dieser Unterschied in den Mittelwerten zwischen der Rocatec und der Korundvorbehandlung, ist für Panavia nach der 24 Stundenlagerung der Prüfkörper noch geringer. Ferner bestätigen sich die Studien von *Kern et al.*, in denen festgestellt wurde, dass bei Panavia eine Silikatisierung nicht zwingend notwendig ist, um signifikant höhere Haftwerte zu erreichen [*Kern 2005b; Kern und Wegner 2000b; Blatz, Avishai, Kern 2004*].

Bei Rely X Unicem kann man ähnlich differente Mittelwerte im Bezug zur Vorbehandlungsmaßnahme beobachten wie bei Panavia. Der Mittelwert für die Rocatec-Konditionierung liegt bei  $\sim 35,64 \text{ N/mm}^2$ , mit einer Standardabweichung von  $\sim 5,46 \text{ N/mm}^2$ . Der Mittelwert für die Korundstrahlung liegt bei  $\sim 32,28 \text{ N/mm}^2$ , mit einer Standardabweichung von  $\sim 2,79 \text{ N/mm}^2$ . Nach der 24 Stundenlagerung ist ebenfalls bei Rely X zu beobachten, dass die Rocatec-Konditionierung mit ihren Mittelwert um  $\sim 3 \text{ N/mm}^2$  höher liegt als der Mittelwert der Korundvorbehandlung. Deshalb kann man auch wie für Panavia die These aufstellen, dass eine Silikatisierung der Prüfkörperoberfläche nicht zwingend notwendig ist, um höhere Haftwerte zu erreichen.

Der Hersteller von Rely X Unicem gibt in seinem Produktdossier an, dass eine Silikatisierung der zu befestigenden Restauration nicht notwendig sei, aber durchgeführt werden kann, ohne Haftverlust einzubüßen.

Im Vergleich der berechneten Mittelwerte zwischen 24 Stundenlagerung und der simulierten Alterung, erreicht Rely X nach Alterung höhere Werte.

So kann man schließen, dass für Rely X nach Alterung die potenzielle Haftkraft zunimmt, wie in einer Studie für einen anderen Kompositkleber *Kern und Thomson [1996]* feststellten. Durch Wasseraufnahme erlebt der Kleber in seiner Matrix eine gewisse Plastifizierung, die ihn gegen einwirkende Abzugskräfte stabilisiert.

In den dritten und letzten Abschnitt, sind alle Werte der jeweiligen Kleber unabhängig, ob mit oder ohne Alterung, zusammengefasst worden. Hier zeigt sich ebenfalls, dass der Unterschied in den Mittelwerten zwischen dem Rocatec-System und der Korundstrahlung, für Panavia und Rely X nicht gravierend ist. Für Bifix QM präsentieren sich große Unterschiede, die für die Silikatisierung der Zirkonoxidoberfläche sprechen, um höhere Haftwerte zu erzielen. In der letzten Spalte, des dritten Abschnittes des linearen Modells, sind alle Mittelwerte in

Abhängigkeit von der Vorbehandlung berechnet worden. Es ist festzustellen, dass die Rocatec-Konditionierung mit  $\sim 28,56 \text{ N/mm}^2$  und einer Standardabweichung von  $\sim 6,10 \text{ N/mm}^2$ , um  $\sim 3 \text{ N/mm}^2$  die Korundvorbehandlung in ihrem Mittelwert übertrifft.

Rely X Unicem und Panavia F erweisen sich in In-Vitro als hervorragend, um Restaurationen auf Zirkonoxid-Basis zu verkleben.

Viele Studien zeigen, dass sich Panavia auch schon klinisch gut bewährt hat [Blatz et al. 2004; Derand und Derand 2000; Friederich und Kern 2002; Kern 2005a und b; Kern et al. 2000a; Kern und Gläsner 1997; Kern und Wegner 1998; Kern und Thompson 1996; Kurbad und Reichel 2004]. Die Abzugswerte beider Kleber liegen weit über der innere Verbundfestigkeit des Schmelzes [Wirz et.al. 1989a; Stark und Holste 1992].

Der klinische Einsatz von Bifix QM, sollte nur nach tribochemische Silikatisierung und Silanisierung erfolgen. Die alleinige Korundstrahlung als Konditionierungsart ist für Kleber auf Bis-GMA Basis nicht effizient genug. Andere Autoren haben in ihren Studien festgestellt, dass Bis-GMA-Kleber nur mittels tribochemische Silikatisierung und Silanisierung einen effizienten Klebeverbund bewirken [Blatz, Avishai und Kern 2004; Derand und Derand 2000; Friederich und Kern 2002].

## 6 Zusammenfassung

Die Studie untersucht die verwendeten Kompositkleber hinsichtlich ihrer Verbundfestigkeit auf Zirkonoxidoberflächen. Die Verbundfestigkeitswerte wurden anhand des Zugscherversuches ermittelt. Der Zugscherversuch wurde mit Hilfe einer kardanischen Aufhängung in einer Prüfmaschine (Zwick 1445/Ulm) durchgeführt. Somit können sich die Prüfkörper vor dem Bruch der Klebeflächen im Raum ausrichten, ohne dass kippende Kräfte einwirken. Die Ergebnisse zeigen, dass Bifix QM im Gegensatz zu Rely X und Panavia F mit der Korundstrahlung als Vorbehandlungsmaßnahme niedrigere Werte erreicht. Nach simulierter Alterung, liegen für Bifix QM keine Werte vor, da sich die Prüfkörper während des Alterungsprozesses voneinander gelöst haben.

Für Panavia F 2,0, zeigen die Werte nach der 24 Stunden Lagerung keine signifikanten Unterschiede zwischen den Konditionierungsarten, der Korundstrahlung und dem Rocatec-System. Nach Alterung liegt der Mittelwert für die mit Rocatec vorbehandelten Prüfkörper höher als die der Korundstrahlung. Bei Rely X Unicem steigen die Werte nach Alterung, wobei die Werte für die mit Rocatec konditionierten Prüfkörper nicht wesentlich höher liegen als die Werte der Prüfkörper, die mit der Korundstrahlung vorbehandelt wurden.

Aus den Ergebnissen kann man schließen, dass durch die Konditionierung mit dem Rocatec-System für Bifix QM Vorteile hinsichtlich der Verbundfestigkeit mit Zirkonoxid erzielt werden. Für Panavia F und Rely X Unicem ist die Silikatisierung der Zirkonoberfläche nicht zwingend notwendig, um höhere Haftwerte zu erreichen, man kann sie aber empfehlen. Das Benutzen eines Klebers mit einem Phosphatmonomer, wie Panavia F und Rely X Unicem ist zu befürworten, da es die Haftfestigkeit gegenüber herkömmlichen BIS-GMA-Klebern steigert.



## 7 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1/ Seite 12:	Adhäsivpräparation an Frontzähnen für Metall– Klebeflügel
Abbildung 2/ Seite13:	Adhäsivpräparation an Frontzähnen für Vollkeramik–Klebeflügel
Abbildung 3/ Seite 20:	Einteilung der Keramischen Gruppen
Abbildung 4/ Seite 24:	Phasentransformation von Zirkonoxid
Abbildung 5/ Seite 29:	Schematischer Aufbau des Schichtsystems des Rocatecverfahrens
Abbildung 6/ Seite 32:	Konstruktionszeichnung der Prüfkörper, Oberflächen und Seitenansicht
Abbildung 7/ Seite 34:	Klebevorrichtung (geschlossen)
Abbildung 8/ Seite 35:	Überlappende Klebung der Prüfkörper
Abbildung 9/ Seite 38:	Kardanische Aufhängung in der Prüfmaschine
Abbildung 10/ Seite 39:	Vergrößerter Ausschnitt der verklebten Prüfkörper
Abbildung 11/ Seite 39:	Skizze der Aufhängung
Abbildung 12/ Seite 39:	Skizze des Adapters
Abbildung 13/ Seite 41:	Temperaturwechsellastapparat

- Abbildung 14/ Seite 44: Graphische Darstellung der Abzugswerte für Bifix QM
- Abbildung 15/ Seite 46: Gr.1 Korundgestrahlte Prüfkörperoberfläche nach Alterung / Beispiel für einen kohäsiven Bruch (exemplarisch)
- Abbildung 16/ Seite 46: Gegenstück von Abb. 15
- Abbildung 16a/Seite 47: Ausschnittsvergrößerung von Abbildung 16; 500-fach
- Abbildung 17/ Seite 47: Graphische Darstellung der Bruchmuster für alle Kleber
- Abbildung 18/ Seite 48: Abzugsdiagramm der Gruppe 1 (ohne Alterung, mit Korund vorbehandelt, exemplarisch )
- Abbildung 19/ Seite 48: Abzugsdiagramm der Gruppe 2 (ohne Alterung, mit Rocatec vorbehandelt, exemplarisch)
- Abbildung 20/ Seite 49: Abzugsdiagramm der Gruppe 4 (nach Alterung, mit Rocatec vorbehandelt, exemplarisch)
- Abbildung 21/ Seite 50: unbehandelte Prüfkörperoberfläche (exemplarisch)
- Abbildung 22/ Seite 51: Korundgestrahlte Prüfkörperoberfläche mit 110 µm
- Abbildung 23/ Seite 51: mit Rocatec konditionierte Prüfkörperoberfläche (exemplarisch)
- Abbildung 24/ Seite 52: Gr.1 Korundgestrahlte Oberfläche ohne Alterung (exemplarisch)

- Abbildung 25/ Seite 52: Gr. 2 Rocatecgestrahlte Oberfläche ohne Alterung (exemplarisch)
- Abbildung 26/ Seite 53: Gr.3 Korundgestrahlte Oberfläche nach Alterung (exemplarisch)
- Abbildung 27/ Seite 53: Gr. 4 Rocatecgestrahlte Oberfläche nach Alterung (exemplarisch)
- Abbildung 28/ Seite 55: Graphische Darstellung der Abzugswerte für Panavia (exemplarisch)
- Abbildung 29/ Seite 56: Gruppe 8 Rocatec vorbehandelt nach Alterung/ Beispiel für einen adhäsiven Bruch (exemplarisch)
- Abbildung 30/ Seite 57: Gegenstück des Prüfkörpers aus Abbildung 29
- Abbildung 31/ Seite 57: Abzugsdiagramm der Gruppe 5(ohne künstliche Alterung und mit Korund vorbehandelt,exemplarisch)
- Abbildung 32/ Seite 58: Abzugsdiagramm der Gruppe 6 (ohne Alterung und mit Rocatec vorbehandelt, exemplarisch)
- Abbildung 33/ Seite 58: Abzugsdiagramm der Gruppe 7 (nach Alterung und mit Korund vorbehandelt, exemplarisch)
- Abbildung 34/ Seite 59: Abzugsdiagramm der Gruppe 8 (nach Alterung und mit Rocatec vorbehandelt, exemplarisch)
- Abbildung 35/ Seite 59: Gr.5 Korundgestrahlte Oberfläche ohne Alterung (exemplarisch)

- Abbildung 36/ Seite 60: Gr. 6 Rocatecgestrahlte Oberfläche ohne Alterung (exemplarisch)
- Abbildung 37/ Seite 60: Gr. 7 Korundgestrahlte Oberfläche nach Alterung (exemplarisch)
- Abbildung 38/ Seite 61: Gr. 8 Rocatecgestrahlte Oberfläche nach Alterung (exemplarisch)
- Abbildung 39/ Seite 63: Graphische Darstellung der Abzugswerte für Rely X Unicem
- Abbildung 40/ Seite 65: Gr.10 Mit Rocatec vorbehandelte Oberfläche ohne Alterung / Beispiel für einen Mischbruch (exemplarisch)
- Abbildung 41/ Seite 66: Gegenstück von Abb. 40
- Abbildung 42/ Seite 67: Abzugsdiagramm der Gruppe 9 (ohne Alterung und mit Korund vorbehandelt, exemplarisch)
- Abbildung 43/ Seite 67: Abzugsdiagramm der Gruppe 10 (ohne Alterung und mit Rocatec vorbehandelt, exemplarisch)
- Abbildung 44/ Seite 68: Abzugsdiagramm der Gruppe 11 (nach Alterung und mit Korund vorbehandelt, exemplarisch)
- Abbildung 45/ Seite 68: Abzugsdiagramm der Gruppe 12 (nach Alterung und mit Rocatec vorbehandelt, exemplarisch)
- Abbildung 46/ Seite 69: Gr.9 Korundgestrahlte Oberfläche ohne Alterung (exemplarisch)

Abbildung 47/ Seite 69:	Gr.10 Rocatecgestrahlte Oberfläche ohne Alterung (exemplarisch)
Abbildung 48/ Seite 70:	Gr. 11 Korundgestrahlte Oberfläche nach Alterung (exemplarisch)
Abbildung 49/ Seite 70:	Gr. 12 Rocatecgestrahlte Oberfläche nach Alterung (exemplarisch)
Abbildung 50/ Seite 72:	Boxplots für alle Gruppen (außer Gruppe 3 da keine Werte vorliegen)
Abbildung 51/ Seite 75:	Boxplots Darstellung der Abzugswerte ohne Langzeitlagerung und TWL
Abbildung 52/ Seite 76:	Boxplots Darstellung der Werte nach Langzeitlagerung und TWL
Abbildung 53/ Seite 77:	Einflussfaktor: Alterung (gilt für die Abzugswerte aller Kleber )
Abbildung 54/ Seite 78:	Einflussfaktor: Kleber
Abbildung 55/ Seite 78:	Einflussfaktor: Vorbehandlung (Werte aller Kleber zusammen)
Abbildung 56/ Seite 79:	Einflussfaktoren: Alterung und Kleber
Abbildung 57/ Seite 80:	Einflussfaktoren: Alterung und Vorbehandlung (für alle Kleber)
Abbildung 58/ Seite 81:	Einflussfaktoren: Kleber und Alterung

Abbildung 59/ Seite 82:	Einflussfaktoren: Kleber und Vorbehandlung
Abbildung 60/ Seite 83:	Einflussfaktoren: Vorbehandlung und Alterung (für alle Kleber)
Abbildung 61/ Seite 84:	Einflussfaktoren: Vorbehandlung und Kleber
Abbildung 62/ Seite 85:	Allgemeines lineares Modell (GLM)

## **8 Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1/ Seite 31:	Technische Daten von LAVA – Zirkonoxid
Tabelle 2/ Seite 37:	Technische Daten der Kompositkleber
Tabelle 3/ Seite 43:	Abzugswerte der Prüfkörper für die Verklebung mit Bifix QM
Tabelle 4/ Seite 44:	Statistische Auswertung der Bifix–Abzugswerte
Tabelle 5/ Seite 54:	Abzugswerte der Prüfkörper für die Verklebung mit Panavia F 2,0
Tabelle 6/ Seite 55:	Statistische Auswertung der Panavia–Abzugswerte
Tabelle 7/ Seite 62:	Abzugswerte der Prüfkörper für die Verklebung mit Rely X Unicem
Tabelle 8/ Seite 63:	Statistische Auswertung der Rely X Unicem Abzugswerte

## 9 Literaturverzeichnis

1. Barrack G.  
Adhäsivbrücken – Klinische Techniken und Langzeitergebnisse (I)  
Quintessenz 1993a; 44: 1625 – 1635
2. Barrack G.  
Adhäsivbrücken – Klinische Techniken und Langzeitergebnisse (II)  
Quintessenz 1993b; 44: 1625 – 1635
3. Bausch P.  
Eine In-vitro-Studie zur Bruchfestigkeit von vollkeramischen  
Klebebrücken im Frontzahnbereich in Abhängigkeit von der  
Gestaltung des keramischen Grundgerüsts  
Diss. ZbMed 2004
4. Behr M, Rosentritt M.  
Metallgestützte Adhäsivbrücken  
Quintessenz 2000; 51: 1261 – 1270
5. Behr M, Leibrock A, Stich W, Rammelsberg P, Rosentritt M,  
Handel G.  
Adhesive-fixed partial dentures in anterior and posterior areas  
Clin. Oral Invest. 1998; 2: 31 – 35
6. Beldner W, Marx R.  
Silikatisieren als Oberflächenkonditionierung von Metallen für den  
hydrolysebeständigen Verbund mit Kunststoffen  
Quintessenz 1992; 43: 103 – 115

7. Besimo CH, Gächter M, Jahn M, Kuhn A.  
Klinischer Erfolg bei elektrolytisch konditionierten Adhäsivbrücken  
Dtsch. Zahnärztl. Z. 1996; 51: 501 – 505
8. Besimo C.  
Resin–bonded fixed partial denture technique: Results of a  
Medium–term clinical follow–up investigation  
J. Prosth. Dent. 1993; 2: 69 – 72
9. Blatz MB, Avishai S, Kern M.  
Adhäsive Befestigung hochfester Vollkeramikrestaurationen  
Quintessenz 2004; 55: 33 – 41
10. Blatz MB, Avishani S, Kern M.  
Resin–ceramic bonding: a review of the literature  
J. Prosthetic Dent. 2003; Vol 89: 268 – 273
11. Blatz MB, Avishai S, Kern M.  
Adhäsive Befestigung silikatkeramischer Restaurationen  
Quintessenz 2002; 53: 827 – 835
12. Blatz MB.  
Langzeiterfolg vollkeramischer Restaurationen im Seitenzahnbereich  
Quintessenz 2001; 52: 887 – 900
13. Botelho M, Alex WK.  
Longevity of two-unit cantilevered resin–bonded fixed partial Dentures  
American Journal of Dentistry 2002; Vol.15
14. Botelho M.  
Designprinzipien für adhäsiv befestigte Freidendbrücken  
Quintessenz 2001; 52: 37 – 44



15. Bothelo M, Lai Ching N, Ha Wai K, Bih Sau K.  
Two–Unit Cantilevered Resin–Bonded Fixed Partial Dentures–A  
Retrospective, Preliminary Clinical Investigation  
Int. J. Prosthodont 2000; 13: 25 – 28
16. Brabant A.  
The key to successful resin–bonded fixed partial dentures. In: Degrange  
M., Roulet J.F. Minimally Invasive Restorations with Bonding.  
Quintessence, Chicago 1997; 201 – 210
17. Briggs P, Dunne S, Bishop K.  
The single unit, single retainer, cantilevered resin-bonded bridge  
Br. Dent. J. 1996; 181: 373 – 379
18. Bulot D, Sadan A, Burgess JO, Blatz MB.  
Bond strength of a self–adhesive universal resin cement to cava zirconia  
after two surface treatments  
J. Dent. Res. 2003; 82: (Spec ISS A) 578, Abstr.
19. Buonocore P.  
A simple method of increasing the adhesion of acrylic filling  
material to enamel surface.  
J. Dent. Res.: 1955; 34: 849 – 853
20. Charleston RJ.  
Vom gebrannten Ton zum Porzellan . Eine Stilgeschichte durch vier  
Jahrtausende.  
Eberling Verlag Wiesbaden 1980
21. Clauss C, Kuretzky T.  
Vollkeramischer Zahnersatz auf Basis von gefrästem Zirkonoxid  
ZMK 2002; 18

22. Claus H.  
Vita In–Ceram, ein neues Verfahren zur Herstellung oxidkeramischer Gerüste für Kronen und Brücken  
Quintessenz Zahntechnik: 1990; 16: 1285 – 1288
23. Craig RG.  
Direct esthetic restorative materials  
Res. Dent. Mat. Toronto 1989
24. Creugers NH, Kayser AF, Van` t Hof MA.  
A seven and a half year survival study of resin–bonded AFPD`s  
J. Dent. Res. 1992a; 71: 1822 – 1825
25. Creugers NH, Kayser AF, Van` t Hof MA.  
A seven and a half year survival study of resin bonded bridges  
J. Dent. Res. 1992b; 11: 1822 – 1825
26. Derand P, Derand T.  
Bond Strength of Luting Cements to Zirconium Oxide Ceramics  
Int. J. Prosthodont 2000; 13: 131 – 135
27. DIN 53281 Teil 1  
Proben–Klebeflächenvorbehandlung  
Beuth-Verlag
28. DIN 53281 Teil 2  
Proben–Herstellung  
Beuth-Verlag
29. DIN 53281 Teil 3  
Proben–Kenndaten des Klebevorgangs  
Beuth-Verlag

30. DIN 53283  
Bestimmung der Klebefestigkeit von einschnittig überlappten  
Klebungen ( Zugscherversuch )  
Beuth-Verlag
31. DIN 53285  
Dauerschwingversuch an einschnittig überlappten Klebungen  
Beuth-Verlag
32. DIN 53286  
Bedingungen für die Prüfung bei verschiedenen Temperaturen  
Beuth-Verlag
33. DIN 53287  
Bestimmung der Beständigkeit gegenüber Flüssigkeiten  
Beuth-Verlag
34. DIN EN 1465  
Bestimmung der Zugscherfestigkeit hochfester Überlappungs-  
klebungen  
Beuth-Verlag
35. Dunne SM, Millar BJ.  
A longitudinal study of the clinical performance of resin–bonded bridges  
and splints  
Br Dent J 1993 a; 174: 405 – 411
36. Dunne MS, Millar JB.  
A longitudinal study of the clinical performance of resin bonded  
bridges and splints  
British Dent. J. 1993b; 5: 405 – 411

37. Dürr D, Schultheis R, Kern M, Strub J.  
Clinical comparison of porcelain fused to metal and all porcelain resin-  
bonded bridges  
J. Dent. Res.1992; 72: IADR Abstract 432
38. Edelhoff D, Marx R.  
Adhäsion zwischen Vollkeramik und Befestigungskomposit nach  
unterschiedlicher Oberflächenvorbehandlung  
Dtsch. Zahnärztl. Z. 1995; 50: 112 – 117
39. Ehrensberger C.  
Zirkonoxidkeramik – dauerhaft stabil wie keine andere  
DZW Zahntechnik 2003;12
40. Eichner K, Kappert HF.  
Zahnärztliche Werkstoffe und ihre Verarbeitung  
Band 1 1996; 6. Auflage, Hüthig GmbH
41. Erpenstein H, Kerschbaum Th, Fischbach H.  
Verweildauer und klinische Befunde bei Kronen und Brücken  
Dtsch. Zahnärztl. Z. 1992; 47: 315 – 319
42. ESPE 3M  
Rely X Unicem Aplicap/Maxicap  
Wissenschaftliches Produktdossier 2003
43. ESPE 3M  
Lava–Technisches Produktprofil 2005
44. Fenske C, Gütschow F, Jüde HD.  
Untersuchung zum Einfluss der Klebeschichtstärke und Füge-  
teilelastizität auf die Kohäsion von Metallklebungen  
Dtsch. Zahnärztl. Z. 1998; 53

45. Friederich R, Kern M.  
Resin Bond Strength to Densely Sintered Alumina Ceramic  
Int. J. Prosthodont 2002; 15: 333 – 338
46. Geis-Gerstorfer J, Fässler P.  
Untersuchungen zum Ermüdungsverhalten der Dentalkeramiken  
Zirkonoxid–TZP und In–Ceram  
Dtsch. Zahnärztl. Z. 1999; 54: 692 – 694
47. Gente M, Krutisch R, Lehmann KM.  
Verbundfestigkeit von Metall–Schmelz–Klebungen bei  
Zug– und Torsionsbelastungen  
Schweiz. Monatsschr. Zahnmed. 1991; Vol. 101: 424 – 430
48. Gilmour ASM, Ali A.  
Clinical performance of resin–retained fixed partial dentures bonded with a  
chemically active luting cement  
J. Prosthet. Dent. 1995; 73: 569 – 573
49. Guggenberger R.  
Das Rocatec–System – Haftung durch tribochemische Beschichtung  
Dtsch. Zahnärztl. Z. 1989; 44: 874 – 876
50. Gütschow F.  
Die erfolgreiche Eingliederung von Klebebrücken  
ZWR 1995; 104: 123 – 128
51. Gütschow F.  
Nachuntersuchungen von kombiniert adhäsiv / konventionell fixierten  
Brücken  
Dtsch. Zahnärztl. Z. 1992; 47: 606 – 608

52. Gütschow F.  
Untersuchungen zur Häufigkeit der Indikation von Adhäsivbrücken  
Dtsch. Stomatol. 1991; 41: 89 – 91
53. Haastert B, Hickel R, Holste T, Kerschbaum T.  
Einflussfaktoren für das Verlustrisiko von Adhäsivbrücken  
Schweiz. Monatsschr. Zahnmed. 1992; Vol. 102
54. Hahn R, Löst C.  
Adhäsiv befestigte Keramikeinlagefüllungen  
Thieme Verlag 1996; Stuttgart
55. Hammer P, Berg Ch.  
Ein ästhetischer Erfolg – die Adhäsivbrücke aus Vollkeramik  
Dental Labor 1993; 5: 761
56. Hellwig E, Klimek J, Attin Th.  
Einführung in die Zahnerhaltung, 2. Auflage  
Urban & Fischer 1999
57. Holste T, Kerschbaum T.  
Klebebrücken ( Stellungnahme der DGZMK)  
Dtsch. Zahnärztl. Z. 1994a; 49: 213 – 216
58. Holste T, Kerschbaum Th.  
Konsensus–Papier << Klebebrücken >>  
Dtsch. Zahnärztl. Z. 1994b; 49: 213 – 216
59. Holste Th, Berling F.  
Vergleichende Untersuchungen zur Haftfestigkeit von Komposit–  
Ätzbrücken herkömmliche und zusätzliche Retentionshilfen  
Dtsch. Zahnärztl. Z. 1992; 37: 885 – 889 (zitiert aus 103)

60. Hussey DL, Linden GJ.  
The clinical performance of cantilevered resin-bonded bridgework  
J. Dent. 1996; 24: 251 – 256
61. Hussey DL, Linden GJ, Pagni C.  
Performance of 400 adhesive bridges fitted in a restorative dentistry  
department  
J. Dent. 1991; 19: 221 – 225
62. Janda R.  
Kleben und Klebetechniken 2  
Dental–Labor 1992; 60: 615 – 622
63. Kern M.  
Klinische Langzeitbewährung von zwei– und einflügeligen  
Adhäsivbrücken aus Vollkeramik  
Quintessenz 2005a; 56: 231 – 239
64. Kern M.  
Einflügelige Adhäsivbrücken und Adhäsivattachments –  
Innovation mit Bewährung  
ZM 2005b; 95: Nr.21
65. Kern M.  
Keramik – Erfahrungen aus Klinik, Praxis und Labor  
ZMK 2002; 18: 722 – 731
66. Kern M.  
Alle Segel für die Vollkeramik gesetzt  
ZM 2004a; 94: Nr. 14
67. Kern M.  
Vollkeramische Restaurationen auf dem Symposium–Prüfstand  
ZWR 2004b;113: Nr. 7+8

68. Kern M, Suttor D.  
Hat sich „Keramischer Stahl“ bewährt?  
DZW Zahn Technik 2005c; 8 – 9
69. Kern M, Stub RJ, Ferrarresso F, Koutayas SO.  
Influence of design and mode of loading on the fracture strength of  
all-ceramic resin-bonded fixed partial dentures: An in vitro study in a dual-  
axis chewing simulator  
J. Prosthetic Dent. 2000a; 83: 540 – 547
70. Kern M, Wegner SM.  
Long-term Resin Bond Strength to Zirconia Ceramic  
J. Adh. Dent. 2000b; Vol 2: 139 – 147
71. Kern M, Wegner SM.  
Bonding to zirconia ceramic: adhesion methods and their durability  
Den. Mater 1998; 14: 64 – 71
72. Kern M, Gläser R.  
Cantilevered All-Ceramic „Resin-Bonded Fixed Partial Dentures:  
A New Treatment Modality  
Journal of Esthetic Dentistry 1997; Vol. 9: 255 – 264
73. Kern M, Thompson VP.  
Klebeverbund zwischen Aluminiumoxidkeramik und Zahnschmelz nach  
längerer Wasserlagerung  
Dtsch. Zahnärztl. Z. 1996; 51: 169 – 172
74. Kern M, Sommer S, Strub JR.  
Randbereiche von Metall- und vollkeramischen Adhäsivbrücken sowie von  
Adhäsivattachments in vivo  
Dtsch. Zahnärztl. Z. 1995; 50: 760 – 762



75. Kern M, Fechting T, Strub JR.  
Influence of water storage and thermal cycling on the fracture strenght of all-porcelain-bonded fixed partial dentures  
J. Prosthet. Dent. 1994; 71: 251 – 256
76. Kern M, Thompson V.  
Eine einfache Versuchsanordnung zur universellen Prüfung des Klebeverbundes im axialen Zugtest  
Dtsch. Zahnärztl. Z. 1993; 48: 769 – 772
77. Kern M, Schwarzbeck W, Strub J.  
Stability of all-porcelain resin-bonded fixed restorations with different designs: an in-vitro study  
Int. Prosthodont. 1992; 5: 108 – 114
78. Kern M, Neikes J, Strub JR.  
Haftfestigkeit des Klebeverbundes auf In-Ceram nach unterschiedlicher Oberflächenkonditionierung  
Dtsch. Zahnärztl. Z. 1991; 46: 758 – 761
79. Kern M, Schaller GH, Heger M, Wohlfart E.  
Qualitative Beurteilung der Randbereiche von Adhäsivbrücken über 60 Monate  
Dtsch. Zahnärztl. Z. 1989; 44: 888 – 890
80. Kerschbaum Th, Haastert B, Pfeiffer P, Liebrecht S.  
Einfluß von Fläche und Umfang auf den Langzeiterfolg bei Klebebrücken  
Dtsch. Zahnärztl. Z. 1998; 53: 386 – 391
81. Kerschbaum Th, Haastert B, Wiethoff B, Arnetzl G.  
Verlustrisiko bei dreigliedrigen Adhäsivbrücken während der Versorgungszeit  
Dtsch. Zahnärztl. Z. 1993; 48: 161 – 166

82. Kerschbaum T, Pfeiffer P, Marinello CP.  
Erfahrungen mit Klebebrücken. Eine multizentrische Beobachtungsstudie  
Dtsch. Zahnärztl. Z. 1988; 43: 321 – 323
83. Kistler S.  
Einflussfaktoren auf den Klebeverbund vollkeramischer Klebe-  
brücken im Seitenzahnbereich: Eine In-vitro-Studie  
Diss. 1998; ZB – Med, Köln
84. Kohlmeyer B, Baumann A, Behneke N, Scheller H.  
Verweilwahrscheinlichkeit und Einflussfaktoren für das  
Verlustrisiko von Adhäsivbrücken – eine 15-Jahres-Studie  
Deutsche Zahnärztliche Zeitschrift 2004; 59
85. Kurbad A, Reichel K.  
CAD/CAM- gestützte Vollkeramikrestorationen aus Zirkonoxid  
Quintessenz 2004; 55: 673 – 684
86. Livatidis GJ.  
Cast metal resin bonded retainers for posterior teeth  
J. Am. Dent. Assoc. 1980; 101: 926 – 29
87. Luthardt GR.  
Ästhetische Restaurationen aus Zirkoniumdioxidkeramik  
ZM 2005; Nr.21: 62 – 66
88. Marinello C, Belser U.  
Die Adhäsivbrücke – alternative Lückenversorgung ?  
Eine Übersicht  
Schweiz. Mschr. Zahnmed. 1985; 95: 871

89. Mehl A.  
Neue CAD/CAM–Systeme versprechen eine Revolution  
DZW Spezial 2000; 5: 6 – 9
90. Müller G.  
Ätzen und Silanisieren dentaler Keramiken  
Dtsch. Zahnärztl. Z. 1988; 43: 438 – 441
91. Neikes MN.  
Adhäsivtechnik mit dem modifizierten Bis–GMA–Kleber  
Panavia EX / ZWR 1993; 12: 868 – 870
92. Otto T.  
Adhäsivbrücken  
Schweiz. Mschr. Zahnmed. 1995; 105: 121 – 136
93. Pahle M, Rammelsberg P, Gernet W.  
Klebebrücken als Routine  
Zahnärztl. Mitt. 1989; 20: 2315 – 2321
94. Panavia F 2,0 Produktinformation  
Kuraray
95. Peters S.  
Bewährung dreigliedriger Adhäsivbrücken in der Praxis  
Dtsch. Zahnärztl. Z. 1989; 44: 833 – 835
96. Pfeiffer P, Kerschbaum Th.  
Ergebnisqualität silikatisierter Metall–Kunststoffverbindungen in  
Dentallaboratorien  
Dtsch. Zahnärztl. Z. 1994; 49: 732 – 735

97. Piwowarczyk A, Sorensen J.  
Shearbond Strength of Cements to Zirconia and Lithium Disilicate  
Ceramics,  
J. Dent. Res. 2002; 81: A – 401, (Spec Iss A)
98. Pospiech P, Tinschert J, Ariel R.  
Keramik – Vollkeramik  
3M ESPE Kompendium 2004
99. Pospiech P, Schweiger J, Meinen J.  
Vom Zirkonoxidgerüst zur Lava–Vollkeramik  
Dental – Labor 2002; Heft 1
100. Pospiech P, Mittermeier J, Rammelsberg P.  
Spannungsverteilung in vollkeramischen Klebebrücken: eine  
dreidimensionale Finite–Element–Analyse  
Dtsch. Zahnärztl. Z. 1999; 54: 366 – 371
101. Pospiech P.  
Werstoffkundliche und klinische Untersuchungen zur vollkeramischen  
Klebebrücke  
Habilitationsschrift 1997; LMU München
102. Pospiech P, Rammelsberg P, Unsöld F.  
Labortechnische Gesichtspunkte zur Klebebrücke aus In–Ceram  
Dental – Labor 1995a; 10: 1601 – 1606
103. Pospiech P, Rammelsberg P, Gernet W, Behr M, Handel H,  
Toutenburg H.  
Erweiterte Indikation adhäsiver Restaurationen als ästhetische  
und substanzschonende Alternative zu konventionellen Brücken  
Dtsch. Zahnärztl. Z. 1995b; 50: 224 – 227

104. Pospiech P, Rammelsberg P, Gernet P, Toutenburg H.  
In-Ceram-Adhäsivbrücken: der Einfluss der Präparationsform und Gerüstgestaltung auf die Bruchfestigkeit  
Dtsch. Zahnärztl. Z. 1994a; 49: 622 – 626
105. Pospiech P, Rammelsberg P, Gernet W, Toutenburg H.  
Die vollkeramische Klebebrücke – eine Standortbestimmung  
Phillip J. 1994b; 3: 75 – 81
106. Pospiech P, Rammelsberg P, Gernet W.  
Clinical factors affecting adhesive fixed partial dentures:  
A 6–year study  
J. Prosth. Dent. 1993; 70: 300 – 307
107. Praxis der Zahnheilkunde 2, Kariologie und Füllungstherapie  
Heidemann D, Becker J.  
München; Verlag Urban und Schwarzenberg 1999
108. Preußker S, Helbig EB, Klimm WH, Richter G, Koch R.  
Verbund zweier Befestigungskomposite und ihrer Adhäsivsysteme mit  
Keramik und Zahnhartsubstanz in vitro  
Dtsch. Zahnärztliche Zeitschrift 2003; 58: 570 – 578
109. Pröbster L.  
Die Materialspezifik vollkeramischer Restaurationssysteme  
ZMK 2002; 18
110. Rammelsberg P, Behr M, Pospiech P, Gernet W, Handel H,  
Toutenburg H.  
Erweiterte Indikation adhäsiver Restaurationen als ästhetische und  
substanzschonende Alternative zu konventionellen Brücken  
Dtsch. Zahnärztl. Z. 1995; 50: 224 – 227

111. Rinke S.  
Klinische Bewährung von vollkeramischen Extensionsbrücken:  
2–Jahres–Ergebnisse  
Quintessenz 2006; 57: 139 – 146
112. Rinke S, Jenatschke RA.  
Temporary cementation of zirconia-based single crowns and fixed–partial–  
dentures–results from a clinical trial.  
J. Dent. Res. 2003; 82: B115, Spec Iss
113. Rinke S, Hüls A.  
Vergleichende Qualitätsbeurteilung Kopiergefräster Vollkeramischer  
Kronen und Brücken  
Dtsch. Zahnärztl. Z. 1995; 50: 617 – 673
114. Sachs L.  
Angewandte Statistik  
Springer Verlag 2002; 10 Auflage
115. Sato A, Kumei Y, Yoshio E, Ueno Y.  
Mutagenicity of dental nickel-chromium alloys  
Dent. Jpn. 1991; 28: 129 – 135
116. Scheller H, Baumann A, Behneke N, Kohlmeyer B.  
Verweilwahrscheinlichkeit und Einflussfaktoren für das Verlustrisiko von  
Adhäsivbrücken – eine 15–Jahres Studie  
Dtsch. Zahnärztl. Z. 2004; 59
117. Schwarting P.  
Die Klebebrücke  
Schweiz. Mschr. Zahnmed. 1993; 103: 605 – 611

118. Schwickerath H.  
Neue Dentalkeramiken im Vergleich  
Zahnärztl. Welt 1992; 101: 286 – 292
119. ISO 4588  
Adhesives – Guidelines for the surface preparation of metals  
Beuth-Verlag
120. ISO 4587  
Adhesives – Determination of tensile lap–shear strength of  
Rigid – to – rigid bonded assemblies  
Beuth-Verlag
121. Strub JR, Türp JC, Witkowski S, Hürzeler MB, Kern M.  
Curriculum Prothetik II, 2003; 804 – 819
122. Stark H, Holste Th, Kessler B.  
Klebebrücken–eine 10–jahres–Studie  
Dtsch. Zahnärztl. Z. 1994; 49: 266 – 270
123. Stark H, Holste Th.  
Untersuchungen zur Verbundfestigkeit silikatisierter Metalloberflächen  
Dtsch. Zahnärztl. Z. 1992; 47: 624 – 626
124. Suttor D, Hoescheler S, Hauptmann H, Hertlein G, Bunke K.  
LAVA – das neue System von 3M ESPE für vollkeramische ZrO<sub>2</sub> -  
Kronen– und Brückengerüste  
Quintessenz 2001; 52: 805 – 808
125. Valerio S, Groppi A.  
Der Einsatz von adhäsiven Klebebrücken  
Dental–Labor 1995; 3: 411 – 426

126. Van Dalen A.  
A Literature Review of Two-Unit Cantilevered FPD's  
Int. J. Prosthodont 2004; 17: 281 – 284
127. Voco  
Bifix QM Produktinformation
128. Völkl L.  
Cercon– das CAM–Vollkeramiksystem von Degussa Dental  
Quintessenz 2001; 52: 811 – 814
129. Tay WM, Hildebrand N.  
Klebebrücken – Möglichkeiten und Grenzen  
Heidelberg, Hüthig 1995
130. Wirz J, Besimo C, Schmidli F.  
Verbundfestigkeit von Metallgerüst und Haftvermittler in der  
Adhäsivbrückentechnik  
Schweiz. Monatsschr. Zahnmed. 1989a; Vol.99: 1
131. Wirz J, Schmidli F, Jäger K.  
Silanhaftung von Verblendkunststoffen auf verschiedenen  
Metalloberflächen  
Quintessenz 1989b; 10
132. Wirz J, Schmidli F, Steinmann S, Wall R.  
Aufbrennlegierungen im Spaltkorrosionstest  
Schweiz. Monatsschr. Zahnmed. 1987; 97: 571 – 590



## 10 Danksagung

Als erstens möchte ich Herrn Prof. Dr. med. dent. Helmut Stark für die Überlassung des Themas danken. Für seine stets geduldige und freundliche Betreuung sowie der Anregungen zur Gestaltung der Arbeit.

Herzlicher Dank gilt Herrn Dipl. Phys. Manfred Grüner, für die eingehende Unterstützung und Beratung. Ebenso bedanke ich mich bei Herrn Zahntechniker R. Hültenschmidt und den Mitarbeitern im Hauslabor.

Danken möchte ich Herrn Prof. Dr. rer. nat. Bourauel und seinen Mitarbeitern für ihre Hilfestellungen bei der Einstellung der Prüfmaschine (Zwick 1445/Ulm) und des Rasterelektronenmikroskops.

Auch möchte ich meinen Dank aussprechen an Frau Lange und Frau Stachel vom wissenschaftlichen Labor für die schnelle Vorbereitung der Prüfkörper zum Mikroskopieren und an Frau Dr. Bogdanow vom Institut für Medizinische Biometrie/ Informatik und Epidemiologie für die statistische Auswertung der Ergebnisse.

Herzlicher Dank gilt Frau Dr. Behrens von der Firma 3M ESPE für die Herstellung der Prüfkörper und der Verfügungstellung von Rely X Unicem.

Ebenso danke ich der Firma Voco und Kuraray für die Verfügungstellung von Bifix QM und Panavia F.

Danken möchte ich meinem Kollegen Zahnarzt Andreas Gruszinkat für seine Anregungen und konstruktive Kritik.

Großer Dank gebührt meiner Familie, die mich jederzeit unterstützt hat.