

Optimierung des Debondingverfahrens in der Bracketadhäsivtechnik

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Hohen Medizinischen Fakultät
der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität
Bonn

Mohammed Sanad

aus Sanaa - Jemen

2020

Angefertigt mit der Genehmigung
der Medizinischen Fakultät der Universität Bonn

1. Gutachter: Prof. Dr. Andreas Jäger
2. Gutachter: Prof. Dr. Helmut Stark

Tag der Mündlichen Prüfung: 16. März.2020

Aus der Klinik und Poliklinik für Kieferorthopädie

Direktor: Prof. Dr. Andreas Jäger

Meiner Familie gewidmet

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungaverzeichnis.....	8
1. Einleitung.....	9
1.1 Debondingverfahren	10
1.1.1 Bracketentfernung.....	10
1.1.2 Adhäsiventfernung und Schmelzpolitur.....	13
2. Fragestellung und Ziel	17
3. Material und Methode.....	18
3.1 Materialien	18
3.1.1 Testzähne	18
3.1.2 Bracket.....	18
3.1.3 Adhäsive	19
3.1.4 Instrumente	25
3.1.5 Geräte	28
3.2 Methode.....	30
3.3 Experimenteller Ablauf.....	33
3.3.1 Herstellung der Prüfkörper	33
3.3.2 Stufe 1.....	34
3.3.3 Stufe 2.....	38
3.3.4 Stufe 3.....	42
3.4 Statistische Auswertung.....	43
4. Ergebnisse.....	44
4.1 Versuch 1.....	44
4.1.1 Ergebnisse der Bracketentfernungsmethoden	44
4.1.2 Auswertung der Ergebnisse der Bracketentfernungsmethoden	53
4.1.3 Statistische Auswertung der Ergebnisse der Bracketentfernungsmethoden ...	56

4.2	Versuch 2.....	58
4.2.1	Ergebnisse der Adhäsiventfernungsverfahren.....	58
4.2.2	Auswertung der Ergebnisse der Adhäsiventfernungsverfahren.....	62
4.2.3	Statistische Auswertung der Ergebnisse der Adhäsiventfernungsverfahren .	65
4.2.4	Evaluation der Zeit	67
4.3	Versuch 3.....	72
4.3.1	Auswertung der Ergebnisse der Polierverfahren	72
4.3.2	Statistische Auswertung der Ergebnisse der Polierverfahren.....	75
4.3.3	Zeitevaluierung.....	76
4.4	Qualitative Oberflächenevaluierung	80
4.4.1	Beurteilung der Schmelzoberflächen nach Adhäsiventfernung	80
4.4.2	Beurteilung der Schmelzoberflächen nach Politur.....	81
5.	Diskussion	85
5.1	Diskussion der Methode	85
5.1.1	Studiendesign	85
5.1.2	Rinderzähne.....	85
5.1.3	Quantitative Oberflächenevaluierung	86
5.1.4	Qualitative Oberflächenevaluierung	86
5.2	Diskussion der Ergebnisse	87
5.2.1	Bracketentfernung.....	87
5.2.2	Adhäsiventfernung	90
5.2.3	Politur	94
6.	Zusammenfassung	99
7.	Anhang	101
7.1	Tabellen der Ergebnisse für Versuch eins	101
7.2	Tabellen der Ergebnisse für Versuch zwei.....	104

7.3	Tabellen der Ergebnisse für Versuch drei.....	106
8.	Abbildungsverzeichnis.....	108
9.	Tabellenverzeichnis.....	111
10.	Literaturverzeichnis	113
11.	Danksagung	122

Abkürzungsverzeichnis

C = Cutter

B = Bracketentfernungszange

CB = die konstantere Methode aus Stufe 1 (kann C oder B)

ca = Carbidfinierer mit Drehzahl 100.000 rpm

cb = Carbidfinierer mit Drehzahl 30.000 rpm

f = Finierdiamant mit Drehzahl 100.000 rpm

m = Metalfinierer mit Drehzahl 30.000 rpm

CFM = die konstantere Methode aus Stufe 2 (kann Ca, Cb, F oder M)

ny = Nylonbürste mit Drehzahl 10.000 rpm

up = Universalpolierer mit Drehzahl 10.000 rpm

1. Einleitung

Dem Kieferorthopäden steht zur Behandlung von Zahnfehlstellungen eine Vielzahl von herausnehmbaren und festsitzenden Apparaturen zur Verfügung. Mit festsitzenden Apparaturen, und hierbei insbesondere mit der Multiband- oder Multibrackettechnik, können Zähne körperlich kontrolliert bewegt werden (Korkhaus, 1963). Dies macht komplexe Behandlungen von Zahnfehlstellungen lösbar. Daher hat diese Therapiemethode in der Kieferorthopädie eine besondere Bedeutung erlangt und ist die häufigste Therapieform in der Praxis (Dickinson and Powers, 1980). Magill beschrieb erstmals im Jahr 1868 den Einsatz von orthodontischen Bändern aus Platin, Gold, Neusilber oder Silber, die auf Zähne zementiert wurden (Schopf, 1994). Seit dem Jahr 1906 arbeitete Angle an ersten Multibandsystemen, bei denen körperliche Bewegungen von Zähnen das Ziel waren (Hannemann and Diedrich, 1986).

Multibandsysteme sind festsitzende kieferorthopädische Behandlungsapparaturen, die aus Brackets, Bändern und Drähten bestehen. Durch Aktivierung von Drähten entstehen Kräfte, die Zahnbewegungen induzieren. In diesem Zusammenhang haben Brackets die Aufgabe, die Kräfte vom Draht auf den Zahn zu vermitteln.

Zum Kleben von Brackets ist das Säureätzverfahren unter Verwendung von Klebstoffen (Adhäsivmaterialien) Methode der Wahl (Fischer-Brandies et al., 1993). Dabei werden Brackets auf die aufgeraute Zahnoberfläche geklebt. Der Verbund zwischen Attachment und Zahn muss so gestaltet sein, dass die Brackets die ausgeübten Kräfte überstehen, aber ohne Schädigung der Zähne wieder entfernt werden können.

Nach der Therapie müssen die Brackets entfernt werden, was als Debonding bezeichnet wird. Beim Debonding unterscheidet man drei hintereinander ablaufende Schritte: die Entfernung des Brackets, die Restkleberentfernung und die anschließende Oberflächenpolitur (Abbildung 1).

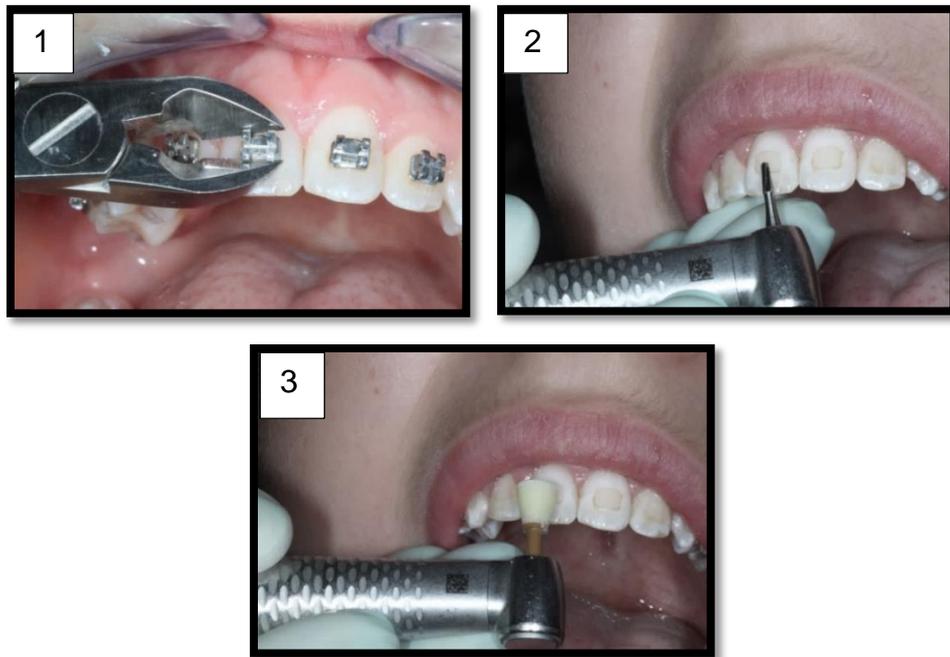


Abb. 1: Debondingsverfahren: 1. mechanische Bracketentfernung, 2. Restkleberentfernung, 3. Schmelzpolitur

1.1 Debondingverfahren

In der Praxis sind mehrere Debondingmethoden bekannt, die in der Literatur auf ihre Effektivität sowie ihre Wirkung auf die Schmelzoberfläche mehrfach untersucht wurden (Pus and Way, 1980; Brown and Way, 1978; Gwinnett and Gorelick, 1977; Zachrisson and Arthun, 1979; Retief and Denys, 1979; Zarrinnia et al., 1995; Rouleau et al., 1982).

1.1.1 Bracketentfernung

Die Bracketentfernungsmethoden, die in der Literatur am häufigsten untersucht wurden, sind die mechanische Bracketentfernung (Stratmann et al., 1996; Arici and Minors, 2000; Kraut et al., 1991; Holberg et al., 2014; Al Shamsi et al., 2006), das thermoelektrische Debonding (Stratmann et al., 1996; Bishara and Trulove, 1990, 1990; Kraut et al., 1991; Tsuruoka et al., 2007; Cummings et al., 1999; Brouns et al., 1993), das Laserdebonding (Ahrari et al., 2012; Liu et al., 2009; Janiszewska-Olszowska et al., 2014; Mimura et al., 1995; Saito et al., 2013; Strobl et al., 1992; Yassaei et al., 2015) und das Ultraschalldebonding (Bishara and Trulove, 1990a,

1990b; Chen et al., 2013; Krell et al., 1993; Kumar et al., 2014; Alessandri Bonetti et al., 2014). Fehler in der Bracketentfernung können zu dauerhaften Schäden im Schmelz und zu verlängerten Debondingzeiten führen (Pus and Way, 1980; Ireland et al., 2005; Yamada et al., 2002; Brauchli et al., 2011).

Die Beseitigung des Adhäsivrestes von der Schmelzoberflächen wird in verschiedenen Studien mithilfe von rotierenden Instrumenten bzw. Bohrern (Gwinnett and Gorelick, 1977; Retief and Denys, 1979; Rouleau et al., 1982) oder Scalern (Pus and Way, 1980; Gwinnett and Gorelick, 1977; Zachrisson and Arthun, 1979; Retief and Denys, 1979) vorgenommen. Mehrere Studien haben gezeigt, dass diese Bohrer zu Schmelzschäden führen können (Zarrinnia et al., 1995).

Zur Schmelzpolitur nach Adhäsivrestentfernung wurden auch mehrere Techniken entwickelt und in der Literatur vorgestellt (Pus and Way, 1980; Zachrisson and Arthun, 1979).

Die Entfernung von Brackets kann mechanisch durch Abscheren oder Abspringen mit speziellen Zangen oder thermisch durch Erwärmung des Klebers, z. B. mit Laser oder mit Ultraschall, erfolgen (Diedrich et al., 2000).

Man unterscheidet hierbei zwischen Entfernung von Metallbrackets und Keramik- bzw. Kunststoffbrackets. Bei Metallbrackets und Keramikbrackets mit mechanischer Retention, wurde die konventionelle mechanische Bracketentfernung empfohlen, während bei chemisch rentierten Brackets das thermische Debonding Mittel der Wahl ist (Diedrich et al., 2000).

Die mechanische Bracketentfernung mit Zangen hat sich in der Praxis etabliert (Pus and Way, 1980; Brown and Way, 1978; Retief and Denys, 1979). Eine Bracketentfernung mit speziellen Bracketentfernungszangen oder Abzugsinstrumenten wie einem Cutter, ist bei den verschiedenen Brackettypen möglich. Brosh et al., 2005 untersuchten in einer *in-vivo*-Studie zwei Bracketentfernungstechniken: die Flügel-, und die Basistechnik. Während bei der Flügelmethode das Zangenarbeitsende zwischen Flügel und Bracketbasis platziert wird, befinden sich diese bei der Basismethode zwischen Bracketbasis und Schmelzoberfläche. Sie fanden dabei heraus, dass die Debondingkraft bei der Basismethode deutlich höher als bei der Flügelmethode ist und zwischen Debondingkraft und Adhäsivresten kein Zusammenhang besteht (Abbildung 2).

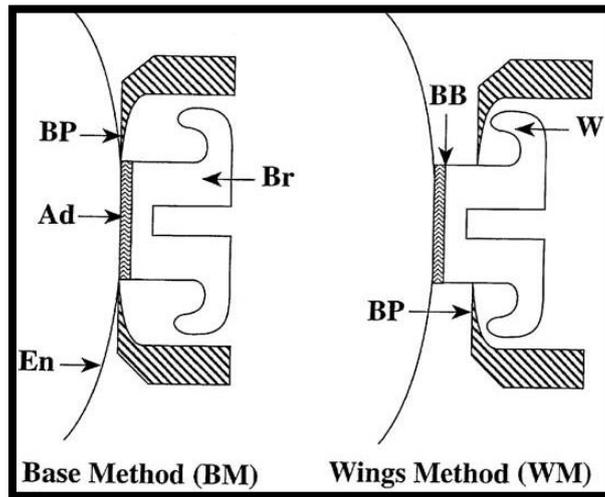


Abb. 2: Bracketentfernungstechniken; BM steht für die Basismethode und WM für die Flügelmethode (Brosh et al., 2005)

Bei der mechanischen Bracketentfernung liegt die Bruchlinie in der Regel an der Bracket-Adhäsiv-Grenze und ist daher unproblematisch (Bishara and Trulove, 1990a, 1990b; Bishara and Fehr, 1997; Bordeaux et al., 1994; Viazis et al., 1990). Bei der chemischen oder kombinierten Retention besteht bei der mechanischen Bracketentfernung die Gefahr der Entstehung von Schmelzausrissen und -sprüngen oder Bracketfrakturen. Die Ablösung der Brackets hängt sehr vom Adhäsiv (Füllergehalt) oder der Interaktion zwischen Schmelz und Adhäsiv ab, wobei die Bruchlinie durch niedrig gefüllte Adhäsive an die Schmelz-Adhäsiv-Grenze verlagert wird (Diedrich et al., 2000).

Die Verwendung von Bracketentfernungszangen erzeugt im Vergleich zu anderen Methoden an der Bracket-Adhäsiv-Grenze eine Bruchlinie ohne Zahnschäden und erfordert zudem die Entfernung der Adhäsivreste vom Zahn (Zarrinnia et al., 1995). Größere Zahnschäden können eher bei den Verdrehungstechniken als bei der Scher-/Abzugmethode gefunden werden (Knox et al., 2000). Übermäßige Ablösefestigkeit ($> 11.3\text{MPa}$) verursacht Schmelzrisse, die weniger wahrscheinlich sind, wenn niedrigere Kräfte aufgebracht werden (7.3MPa) (Bishara et al., 1995). In einer weiteren Studie war eine geringere Ablösefestigkeit erforderlich, wenn Torsionskräfte verwendet wurden (Arici and Minors, 2000). In einer Finite-Elemente-Studie wurde herausgefunden, dass ein Zahn weniger Schaden nimmt, wenn Zugkräfte statt Scher-/Abzugkräften verwendet werden (Katona, 1997).

1.1.2 Adhäsiventfernung und Schmelzpolitur

Für die Beseitigung des verbliebenen Adhäsivs nach der Bracketentfernung wurden unterschiedliche Methoden zur sicheren und effizienten Entfernung beschrieben. Dabei sollte diese möglichst ohne Verletzung der Schmelzoberfläche erfolgen. Am häufigsten wurde die Entfernung mittels Carbidfinierer genannt (Zachrisson and Arthun, 1979; Retief and Denys, 1979; Campbell, 1995; Oliver and Griffiths, 1992; Hong and Lew, 1995).

(Ireland et al., 2005) verglichen in einer Untersuchung die Adhäsiventfernung mit vier Methoden: Carbidfinierer sowohl mit hoher Geschwindigkeit als auch mit niedriger Geschwindigkeit, Ultraschall-Scaler und Bracketentfernungszangen. Sie fanden dabei heraus, dass der niedrigste Schmelzverlust nach der Verwendung eines langsam rotierenden Carbidfinierers vorkam und der größte Verlust mit dem Ultraschall-Scaler bzw. Carbidfinierer mit Hochgeschwindigkeit zu sehen war.

In eine Studie von Gwinnett and Gorelick, 1977 wurden Grünstein gefolgt von Weißstein, Sandpapierscheiben, grünem Gummipolierer und Carbidfinierer mit Hochgeschwindigkeit untersucht. Die Ergebnisse der Studie zeigten, dass tiefe Riefen verursacht wurden, obwohl Grünstein und Weißstein effektiv Adhäsivreste entfernten. Mit den Sandpapierscheiben war die Entfernung des Restadhäsives effektiv, jedoch verbunden mit Schmelzabtrag. Das grüne Gummirad war am wirksamsten, aber es wurde festgestellt, dass Wärme erzeugt wurde. Obwohl keine dieser Techniken eine völlig glatte Schmelzoberfläche erzeugen konnte, wurde das grüne Gummirad als Methode der Wahl empfohlen.

Im Jahr 1979 haben Zachrisson and Arthun, verschiedene Methoden untersucht und herausgefunden, dass keine der untersuchten Techniken eine perfekte Schmelzoberfläche erzeugte. Sie berichteten, dass der höchste Schmelzschaden durch die Verwendung von Finierdiamant verursacht wurde. Bei den Sandpapierscheiben konnte das Restadhäsiv nicht vollständig entfernt werden. Das grüne Gummirad war beim Abtragen des Adhäsives effizienter als Sandpapierscheiben, jedoch wurden im Gegensatz zu der Studie von Gwinnett and Gorelick, 1977 Kratzer wie bei den Scheiben verursacht und das Verfahren war daher auch nicht akzeptabel. Die glatteste Schmelzoberfläche wurde beim Carbidfinierer beobachtet.

Retief and Denys, 1979 verwendeten in einem mehrstufigen Polierverfahren Zangen zur Bracketentfernung, Scaler, Diamantfinierer, Carbidfinierer, Metallfinierer, SofLex Disks und Gummipolierer. Sie zeigten nach einer REM-Analyse, dass unabhängig von der verwendeten Methode eine Beschädigung der Schmelzoberfläche nicht zu vermeiden war und keine der verwendeten Methoden den Zahn mit der ursprünglichen Schmelzoberfläche wiederherstellen konnte. Sie berichteten auch, dass die Bracketentfernung durch Scaler und Diamantfinierer zum signifikanten Schmelzverlust führt.

Campbell, 1995 hat in einer Studie herausgefunden, dass ein Carbidfinierer mit hoher Geschwindigkeit und leichten Zügen das effizienteste und sicherste Verfahren zur Entfernung des Adhäsivrestes darstellt.

Zarrinnia et al., 1995 haben bei einer rasterelektronenmikroskopischen Untersuchung herausgefunden, dass Diamantfinierer tiefe Rillen auf der Zahnschmelzoberfläche erzeugen, die auch nach der Bimssteinbehandlung erhalten blieben. Shofuscheiben konnten den Großteil der verbleibenden Kleber nicht entfernen. Sie empfehlen einen 12-fach geriffelten Carbidfinierer als ersten Schritt gefolgt von SofLex-Scheiben und einer endgültigen Politur mit einem Gummikelch und Zircatpaste.

Eliades et al., 2004 haben in ihrer Studie die Rauheit der Schmelzoberflächen jeweils vor und nach Adhäsiventfernung gemessen. Die Zeit wurde ebenfalls notiert. Verglichen wurde ein Carbidfinierer mit einem ultrafeinen Diamantschleifer. Alle Oberflächen wurden im Anschluß mit SofLex Disks poliert. Die Ergebnisse dieser Studie zeigten, dass sich die Rauheit mit der Verwendung von beiden Finierern erhöhte, aber umso mehr bei der Verwendung des ultrafeinen Diamantschleifers. Allerdings war der Diamantbohrer beim Entfernen des überschüssigen Klebstoffes zweimal schneller als die Metallfräse.

Ulusoy, 2009 führte eine Studie durch, um die Auswirkungen von acht verschiedenen Finier- bzw. Polierverfahren zu vergleichen. Die Ergebnisse der Studie zeigten, dass die effektivste Adhäsiventfernungsmethode das PoGo-Mikropoliersystem war. Es wurde jedoch herausgefunden, dass dieses Verfahren sehr zeitaufwendig (maximale Zeit aufgezeichnet) ist. Dabei wurde festgestellt, dass die maximale Bearbeitungszeit mit dem PoGo-Poliersystem und die minimale Zeit mit dem 30-fach geriffelten Carbidfinierer erreicht wurde. Alle Finishingsysteme erwiesen sich als „klinisch

akzeptabel“ bei der Beseitigung des Adhäsivs nach Bracketentfernung, mit Ausnahme der OptiShine-Bürstengruppe ohne Vorbehandlung.

Ozer et al., 2010 haben in ihre Studie einen Profilometer verwendet, um die Rauheit von Schmelzoberflächen zu beurteilen. Folgende Verfahren zur Bearbeitung der Schmelzoberflächen kamen zum Einsatz: 1) Carbidfinierer mit Hochgeschwindigkeit, 2) Carbidfinierer mit niedriger Geschwindigkeit, 3) Carbidfinierer mit Hochgeschwindigkeit, gefolgt von SofLex Discs, 4) Carbidfinierer mit niedriger Geschwindigkeit, gefolgt von SofLex Discs, 5) SofLex Discs allein, 6) Carbidfinierer mit Hochgeschwindigkeit und einem Glasfaser Bohrer, 7) Carbidfinierer mit niedriger Geschwindigkeit, gefolgt von Bohrern aus Glasfaser, 8) Bohrern aus Fiberglas. Die Ergebnisse der Studie zeigten, dass SofLex Discs und Glasfaserbohrer mehr Zeit als Carbidfinierer benötigen, um die verbliebenen Adhäsive zu entfernen. Ähnlich wie in früheren Studien konnte keines der Verfahren die Schmelzoberfläche in der ursprünglichen Rauheit wiederherstellen. Die SofLex Discs waren am erfolgreichsten bei der Wiederherstellung des Schmelzes in der Nähe des ursprünglichen Rauhwertes.

Brauchli et al., 2011 verwendeten konfokale Laser-Scanning-Mikroskope (CLSM), um die Schmelzoberflächenrauheit zu messen. Nach der Bracketentfernung wurden Adhäsivreste entweder mit Carbidfinierer oder über Air Abrasion entfernt. Air Abrasion ist aufgrund der unerwünschten Ergebnisse während des Verlaufes der Behandlung nicht zu empfehlen. Die Oberfläche der Zähne, die mit Air Abrasion bearbeitet wurden, war sehr glatt, während die Oberfläche nach der Verwendung eines Carbidfinierer ein wellenförmiges Muster zeigte. Dennoch war die Differenz der Rauheitswerte für beide Verfahren statistisch nicht signifikant. Aufgrund der möglichen Gefahr des Einatmens von erhöhten Mengen an Staub aus Air Abrasion wird die Entfernung mit einem Carbidfinierer in dieser Studie angeregt. Brauchli et al, 2011 empfehlen in ihrer Studie nach Bracketentfernung die Verwendung von Carbidfinierern mit hoher Geschwindigkeit und Luftkühlung gefolgt von Polierscheiben und Bimsstein.

Bei den unterschiedlichen Verfahren wurden für den Schmelzverlustwerte zwischen 150 und 160 μm beobachtet (Diedrich, 1980). Das Auftreten der Schmelzausrisse hängt u. a. sehr stark von den spezifischen Materialeigenschaften der Adhäsive ab. Daher es ist für die heute zur Verfügung stehenden Adhäsive wichtig, eher selektive

Debondingverfahren anzustreben, um eine zahnschonende Verbundlösung zu erreichen (Diedrich et al., 2000).

Verschiedene Faktoren wie verwendetes Adhäsiv, Debondingverfahren und Polierinstrument haben einen Einfluss auf den Schmelzverlust beim Debonding. Da die fluoridreiche Schmelzschicht eine besondere kariesprotektive Funktion hat (Lussi et al., 2012; Cate, 1990) ist es wichtig, diese durch ein sicheres Debondingverfahren möglichst zu schonen. Die Hauptziele der Debondingverfahren ist zum einen, Kleberreste möglichst vollständig zu entfernen, zum anderen die Entstehung zusätzlicher Läsionen zu vermeiden (Diedrich, 1980).

In letzter Zeit wurden für die Multibandtechnik verschiedene Bracketabnehm- sowie Kleberrestentfernungsverfahren entwickelt, die alle das Ziel haben, eine möglichst naturbelassene Schmelzoberfläche zu erzielen. Bisher gab es jedoch keine Studie, die alle drei Schritte des Debondingprozesses vergleichend untersucht hat.

Das Ziel der vorliegenden *in-vitro*-Untersuchung war es daher, die Entwicklung von Debondingprotokollen auf Schmelzoberflächen für sechs verschiedene Bracketadhäsivmaterialien zu vergleichen. Für diese Materialien wurden zwei unterschiedliche Bracketentfernungsmethoden, vier Adhäsiventfernungsmethoden und zwei Politurverfahren vergleichend analysiert. Dies erfolgte quantitativ unter standardisierten und reproduzierbaren Bedingungen mithilfe eines optischen Messsystems (Profilometer), sowie qualitativ durch rasterelektronenmikroskopische und makroskopische Aufnahmen.

2. Fragestellung und Ziel

Bei der Bracketentfernung kann es zu Schäden der Schmelzstruktur kommen. Diese sind sehr stark abhängig von den spezifischen Materialeigenschaften der Adhäsive und dem anschließenden Debonding und Politurprozesses. Daher es ist wichtig für das jeweils zur Verfügung stehende Adhäsiv einen Goldstandard zu entwickeln

Ziel der Arbeit ist es unter *in vitro*-Bedingungen über ein Ausschlussverfahren für sechs gängige Bracketadhäsivmaterialien ein jeweiliges Optimum für den Debondingprozess zu differenzieren.

3. Material und Methode

3.1 Materialien

Es wird darauf hingewiesen, dass im Folgenden der kieferorthopädischen Fachliteratur entsprechend und entgegen der Bedeutung in der konservierenden Zahnheilkunde der Begriff Adhäsiv analog zu Komposit gebraucht wird.

3.1.1 Testzähne

Als Alternative zu menschlichen Zähnen wurden für diese Studie nach Norm DIN 13990 Frontzähne von Rindern verwendet. Rinderzähne haben vergleichbare Eigenschaften zum menschlichen Zahnschmelz [ISO/TS 11405]. Die Zähne wurden durch die Firma Rocholl (Rocholl Co. 74858 Aglasterhausen, Deutschland) vorbereitet (Befreiung von Geweberesten unmittelbar nach Extraktion und Trennung der Wurzeln) und geliefert. Bei Raumtemperatur wurden die Zahnkronen in 0,5%iger Chloramin-T-Lösung gelagert, um deren bakterizide und nicht schmelzverändernde Eigenschaft zu nutzen. Die ausgewählten Zähne sind auf Kariesfreiheit, Schmelzausrisse sowie iatrogene Einflüsse (chemischer oder mechanischer Art) untersucht worden.

3.1.2 Bracket

Es wurden 144 konventionelle Metallbrackets (Discovery smart Fa. Dentaaurum, Deutschland) mit +17 ° Torque und Angulation von +4 ° verwendet (Abbildung 3). Dabei fanden ausschließlich für obere mittlere Incisivi (11) hergestellte Brackets Verwendung. Damit wurde gewährleistet, dass diese Versuchsreihe mit stets konstanten Parametern durchgeführt wird.

Tab. 1: Übersicht über verwendete Brackets mit den Herstellerangaben

(Discovery/smart, Dentaaurum, Germany)

Brack	Hersteller	Bestell Nr.	Slot (mm)	Torque	Angulation	Basisgröße (mm ²)
Discovery/smart	Dentaaurum	722-902-11	0.56x0.76	+ 17°	+ 4°	17,4

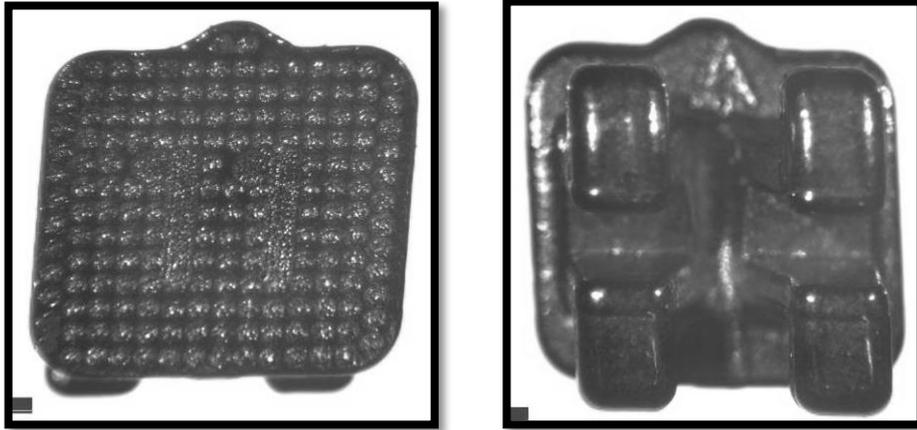


Abb. 3: Bilder der verwendeten Brackets in 25-facher Vergrößerung (Lichtmikroskop DSM 962 der Fa. Carl Zeiss, Oberkochen, Germany)

3.1.3 Adhäsive

Es wurden insgesamt sechs verschiedene Adhäsive verwendet, wobei vier mit herkömmlichen Primersystemen und zwei mit selbstätzendem Primer als Haftvermittler arbeiteten.

Bei den herkömmlichen Systemen wurde die Schmelzoberfläche mit Opal® etch konditioniert. Dies ist ein 35%iges Phosphorsäureätzgel, leicht viskös für leichtes und gezieltes Aufbringen. Laut Hersteller erreicht es 1,5 µm durchschnittliche Tiefe bei 15 Sekunden Ätzung, es ist glycerinfrei und lässt sich rasch und vollständig beim Spülen entfernen (Opal®, orthodontics, Ultradent, USA)

Die verwendeten Adhäsiven mit den zugehörigen Primersystemen sind wie folgt gelistet:

Transbond™ XT Light Cure Adhäsiv ist ein lichthärtendes Bracketadhäsiv der Firma 3M (Unitek). Die Harzkomponente der Basispaste besteht aus Bis-GMA und Bis-A-Bis-DIMA (Bisphenol-A-Bis (2-Hydroxyethyl-ether)-Dimethacrylat). Der zugehörige Primer enthält Bis-GMA, TEGDMA und DL-Campherchinon. Nach Applikation des Primers mit einem Kunststoffschwämmchen auf die geätzte Schmelzoberfläche erfolgt das Aufbringen der Adhäsivpaste Transbond™ XT auf die Bracketbasis und die nachfolgende Positionierung auf der Zahnoberfläche. Die Aushärtung findet nach Herstellerangaben für jeweils 10 Sekunden an den interproximalen Seiten statt (3M, Unitek, USA) (Abbildung 4).

- Transbond XT Adhäsivpaste
- Transbond XT Primer
- Ätzzgel



Abb. 4: Transbond XT

Transbond™ PLUS Color Change Adhesive ist ein lichthärtendes selbstätzendes Adhäsivsystem 3M (Unitek). Seine Haftkraft ist denen des Transbond™ XT vergleichbar gut. Nach Herstellerangaben verfügt dieser Kleber über Farbumschlag für verbesserte Bracketpositionierung und leichteres Entfernen des Klebers nach der Bracketentfernung. Dieses Produkt soll feuchtigkeitsunempfindlich sein und somit ein sicheres Kleben auch unter schwierigen Umständen ermöglichen (3M, Unitek, USA).

- Transbond Plus
Adhäsive Paste
- Transbond Plus
selbstätzend Primer



Abb. 5: Transbond Plus

Opal® bond ist ein lichthärtendes Adhäsivsystem der Firma Ultradent. Es besteht aus 0,3 g Compulen und wird mit einem Compulen-Dispenser appliziert. Es handelt sich bei den Pasten um ein Bis-GMA und Ethyl 4-dimethylaminobenzoate. Dieses Behandlungsset besteht auch aus Opal® etch und Opal® seal. Opal® etch ist eine 35%iges Phosphorsäureätzgel, leicht viskös für leichtes und gezieltes Aufbringen. Laut Hersteller erreicht es 1,5 µm durchschnittliche Tiefe bei 15 Sekunden Ätzung, ist glycerinfrei und lässt sich rasch und vollständig beim Spülen entfernen. Opal® seal ist ein lichtsuhärtendes Grundiermittel zum Verkleben von orthodontischen Brackets auf den geätzten Zahn und ist zu 38 % mit GI-Partikeln und Nanofüllstoffen versetzt, die laut Hersteller während der Behandlung Fluorid freisetzen (Opal®, orthodontics bei Ultradent, USA) (Abbildung 6).

- Opal Adhäsive Compule
- Compule Dispenser
- Opal Primer
- Opal Äztgel 35%



Abb. 6: Opal bond

Opal bond MV ist ein lichthärtendes Adhäsiv der Firma Ultradent. Dieser Kleber zeichnet sich durch eine mittlere Viskosität aus. Es besteht aus einem dünn fließenden Primer und einer Adhäsiv-Paste. Laut Herstellerangaben enthält es fluoreszierende Eigenschaften, sodass es unter UV-Licht sichtbar wird, um die Entfernung zu erleichtern. Das Komponentensystem wird mit einer Spritze appliziert. Wie bei den Pasten von Opal Bond handelt es sich um ein Bis-GMA und Ethyl 4-dimethylaminobenzoate. Dieses Behandlungsset besteht auch aus dem Opal® etch und Opal® seal (Opal®, orthodontics, Ultradent, USA) (Abbildung 7).

- Opal Adhäsivspritze
- Opal Primer
- Opal Ätztgel 35 %



Abb. 7: Opal bond MV

ConTec LC Set – Lichthärtendes Bracketadhäsiv ist ein lichthärtendes Ein-Komponenten-Bracket adhäsive, das aus dem flüssigen Primer ConTec Prime, Ätztgel ConTec Etch und dem pastösen Adhäsive ConTec LC besteht. Laut Herstellerangaben enthält es kein Methylmethacrylat (Dentaurum, Deutschland) (Abbildung 8).

- Adhäsiv in Spritze
- Primer in Flasche
- Ätztgel in Spritze



Abb. 8: ConTec LC Set – Lichthärtendes Bracketadhäsiv

ConTec SE ist ein lichthärtendes Adhäsiv mit selbstkonditionierendem Zweikomponenten-Primersystem (Primer A + Primer B) und einem mit Dentalglas und pyrogener Kieselsäure gefüllten lichthärtenden Adhäsiv (Dentaurum, Deutschland) (Abbildung 9).

- ConTec SE Adhäsiv
in Spritze
- ConTec SE Primer A
in Flasche
- ConTec SE Primer B
in Flasche



Abb. 9: ConTec SE

Die zum Bracketkleben angewendeten Adhäsiven sind in der Tabelle 2 aufgelistet.

Tab. 2: Übersicht über die Zusammensetzung der verwendeten Materialien. Angaben laut Hersteller

Adhäsive	Hersteller	Einsatz	Zusammensetzung
1. TransbondTM XT Light Cure Adhesive	3M (Unitek)	- lichthärtend	- Füller - Bis-GMA - Bisphenol A Bis(2-Hydroxyethylether) Dimethacrylate (Bis EMA)
2. TransbondTM PLUS Color Change Adhesive	3M (Unitek)	- lichthärtend - selbstätzend	- Methacrylierte Phosphorsäureester - Phosphinoxid - Stabilisator - Fluoridkomplex - Parabene
3. Opal bond	Ultradent	- lichthärtend	- Bis GMA - Ethyl 4-dimethylaminobenzoate
4. Opal bond MV	Ultradent	- lichthärtend - Fluorid abgebend - mittlere Viskosität	- Bis GMA - Ethyl 4-dimethylaminobenzoate
5. Contec LC	Dentaurum	- lichthärtend	- Dimethacrylate - Amine
6. Contec SE	Dentaurum	- lichthärtend - selbstätzend - Zweikomponenten-Primer	- Dentalglas - pyrogene Kieselsäure

3.1.4 Instrumente

In dieser Studie wurden die verwendeten Instrumente in drei Schritte eingeteilt. In Schritt eins wurden die beklebten Brackets mechanisch durch Zangen entfernt, in Schritt zwei wurden die verbliebenen Adhäsivreste mittels rotierenden Bohren entfernt und in Schritt drei wurden die Proben zum Erreichen von dem naturbelassenen Zahnschmelz ähnlichen Strukturen mithilfe von Polierbohren poliert.

3.1.4.1 Bracketentfernung

Bei diesen Versuchen sind zwei herkömmliche Bracketentfernungsmethoden zum Einsatz gekommen: Cutter und Bracketentfernungszange.

Cutter

Hard Wire Cutter schwarz (Modelbezeichnung: ODG-1000HWB, Densply, USA). Dieser Cutter hat einen Schnittwinkel von 15 ° und diamantgeschliffene Kanten. Er besteht aus Edelstahl mit schwarzer Oxidbeschichtung (Abbildung 10).

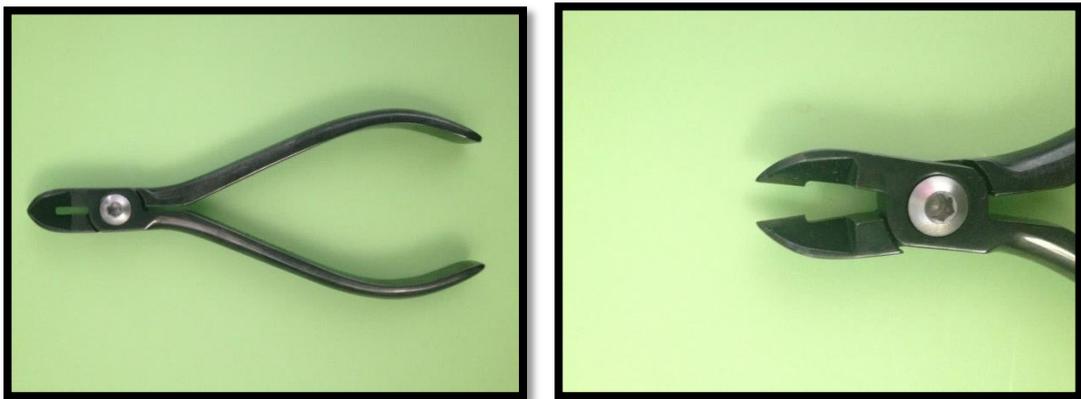


Abb. 10: Cutter (Modelbezeichnung: ODG-1000HWB, Densply, USA).

Bracketentfernungszange

Die schmalen Spitzen (Modellbezeichnung ODG-345, Densply, USA) greifen zwischen die beiden Ränder der Basis der Brackets und der Zahnoberfläche. Diese Zange kann in gingivaler (vertikal) oder in mesialdistaler (horizontal) Richtung verwendet werden (Abbildung 11).

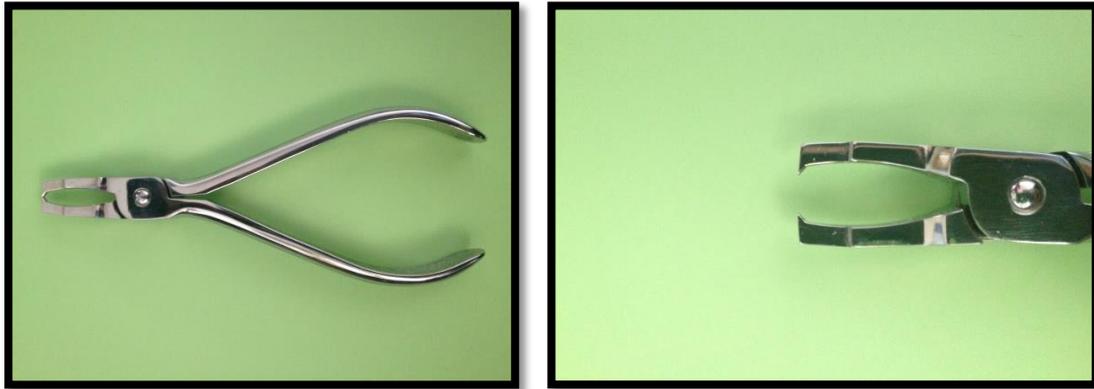


Abb. 11: Bracketentfernungszange (Modell ODG-345, Densply, USA)

3.1.4.2 Adhäsiventfernung

Für die Entfernung der Kleberreste wurden vier verschiedene rotierende, in der Praxis etablierte, Bohrer verwendet

Carbidfinierer mit Luftkühlung (Drehzahl von 100.000 rpm)

Diese konischen Klebstoffentferner sind für das Winkelstück und die Turbine jeweils in zwei Längen (4,75 mm und 8 mm) erhältlich (Abbildung 12, links). Laut Herstellerangaben tragen die Instrumente durch die spezielle Schneidengeometrie den weichen Kleber zügig ab, der harte Schmelz wird hingegen durch die besondere Verzahnung geschont. Dieses Instrument ist im vorderen Bereich des Arbeitsteiles unverzahnt (glatter Kuppe) und soll dazu dienen, die Gingiva zu schützen.

Carbidfinierer mit Luftkühlung (Drehzahl von 30.000 rpm)

Hier wird der gleiche Klebstoffentferner verwendet, aber mit niedriger Drehzahl (Abbildung 12, links).

Finiererdiamant mit Luftkühlung (Drehzahl von 100.000 rpm)

Dieser diamantierte Bohrer wird für das Winkelstück und die Turbine geliefert (Abbildung 12, mitte)

Metallfinierer mit Luftkühlung (Drehzahl von 30.000 rpm)

Dieser Finierer wird mit einem grünen Winkelstück mit einer Drehzahl von 30.000 rpm betrieben. Um das Erhitzen des Zahnes zu vermeiden, werden die Kleberreste ebenso unter Luftkühlung entfernt (Abbildung 12, rechts).

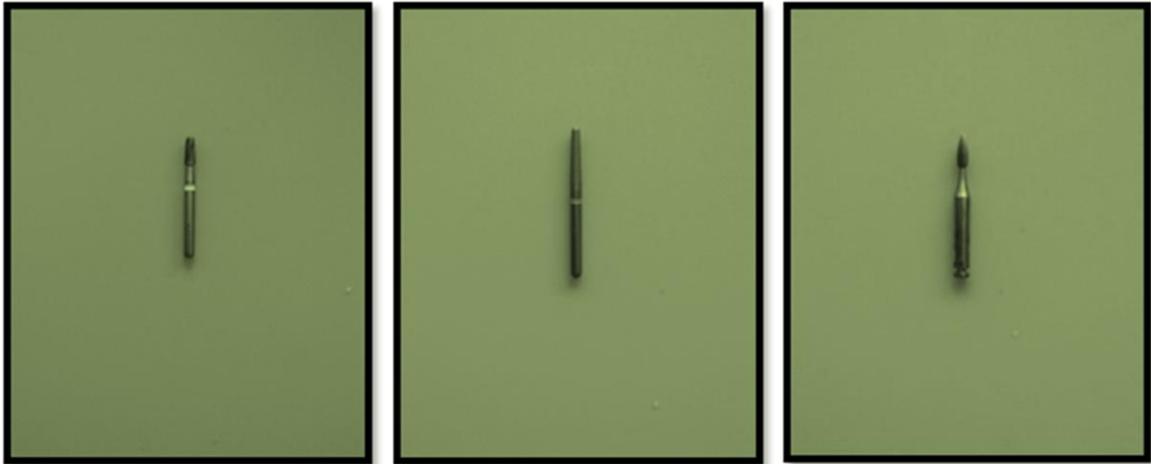


Abb. 12: von links nach rechts: Carbidfinierer, Finierdiamant, Metallfinierer

3.1.4.3 Politur

Für die Schmelzoberflächenpolitur wurden für diese Versuchsreihe zwei verschiedene Poliersysteme angewendet.

Universalpolierer (Drehzahl von 30.000 rpm)

Der Universalpolierer wird von Komet Dental hergestellt. Dieser Polierer wird für das grüne Winckelsück geliefert und hat eine Länge von 15 mm (Herstellernummer: 9557 204 060, Komet Dental Germany) (Abbildung 13 rechts).

Nylonbürste (Drehzahl von 10.000 rpm)

Der Nylonbürste wird von Komet Dental hergestellt. Diese Nylonbürste wird für das grüne Winkelstück geliefert und hat einen Durchmesser von 1/10 mm (Herstellernummer: 9645.204.060, Komet Dental Germany) (Abbildung 13 links).

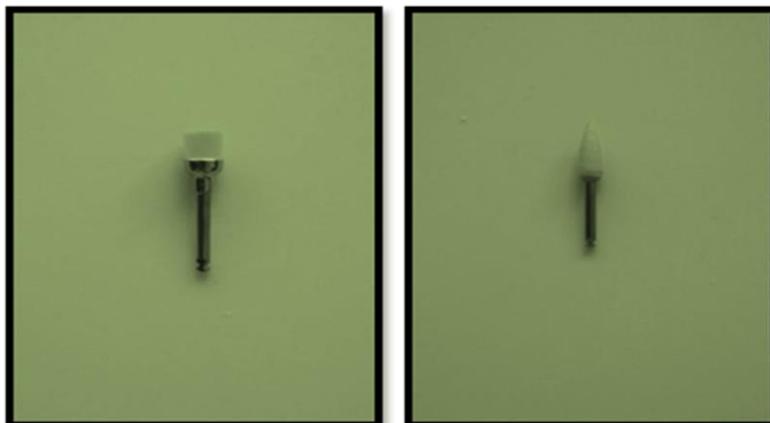


Abb. 13: von links nach rechts Universalpolierer, Nylonbürste

3.1.5 Geräte

3.1.5.1 Lichtmikroskop

Lichtmikroskop DSM 962 der Fa. Carl Zeiss, Oberkochen, Germany

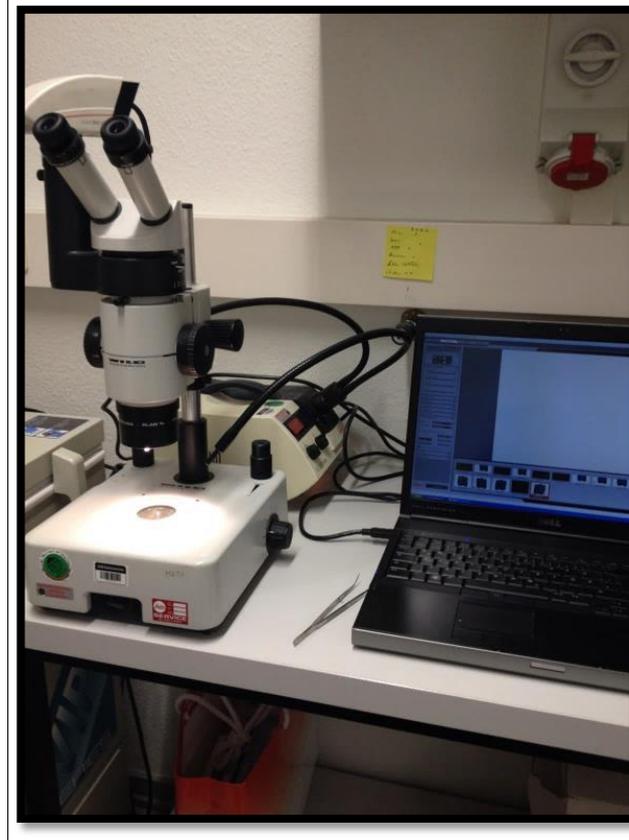


Abb. 14: Lichtmikroskopie Einheit besteht aus Mikroskop, Rechner (Laptop) und Lichtquelle.

3.1.5.2 Profilometer

Profilometer dient zur hochgenauen und dreidimensionalen Vermessung von Oberflächen. Damit können Oberflächenstrukturen mit einer Auflösung von bis zu 1 μm vermessen und analysiert werden (Mikroprofilometer MicroSpy, FRS Fries Research and Technologie, FRS GmbH, Germany).

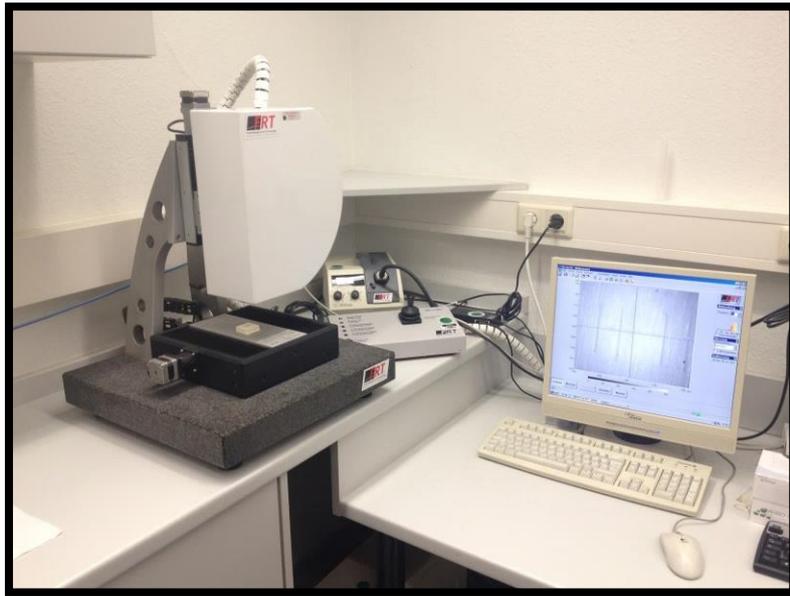


Abb. 15: Optisches Oberflächenmesssystem bestehend aus Granitbasis, Messtisch, Lichtquelle, Steuersystem und Rechner

3.1.5.3 Rasterelektronenmikroskop

Das Rasterelektronenmikroskop ist ein vollständig rechnergesteuertes REM mit einer Beschleunigungsspannung bis 30 kV und einer maximalen Vergrößerung von 100.000. Es eignet sich zur Oberflächenanalyse aller elektrisch leitenden Materialien. Für die Beschichtung nichtleitender Materialien steht ein Sputtergerät zur Verfügung. (REM- Philips XL-30, Scanning Electron Microscope SEM).



Abb. 16: Rasterelektronenmikroskop mit Steuereinheit und Rechner.

3.2 Methode

Versuchsaufbau

Der praktische Teil der Studie erfolgt in drei hintereinander ablaufenden Stufen und wurde wie folgt aufgebaut:

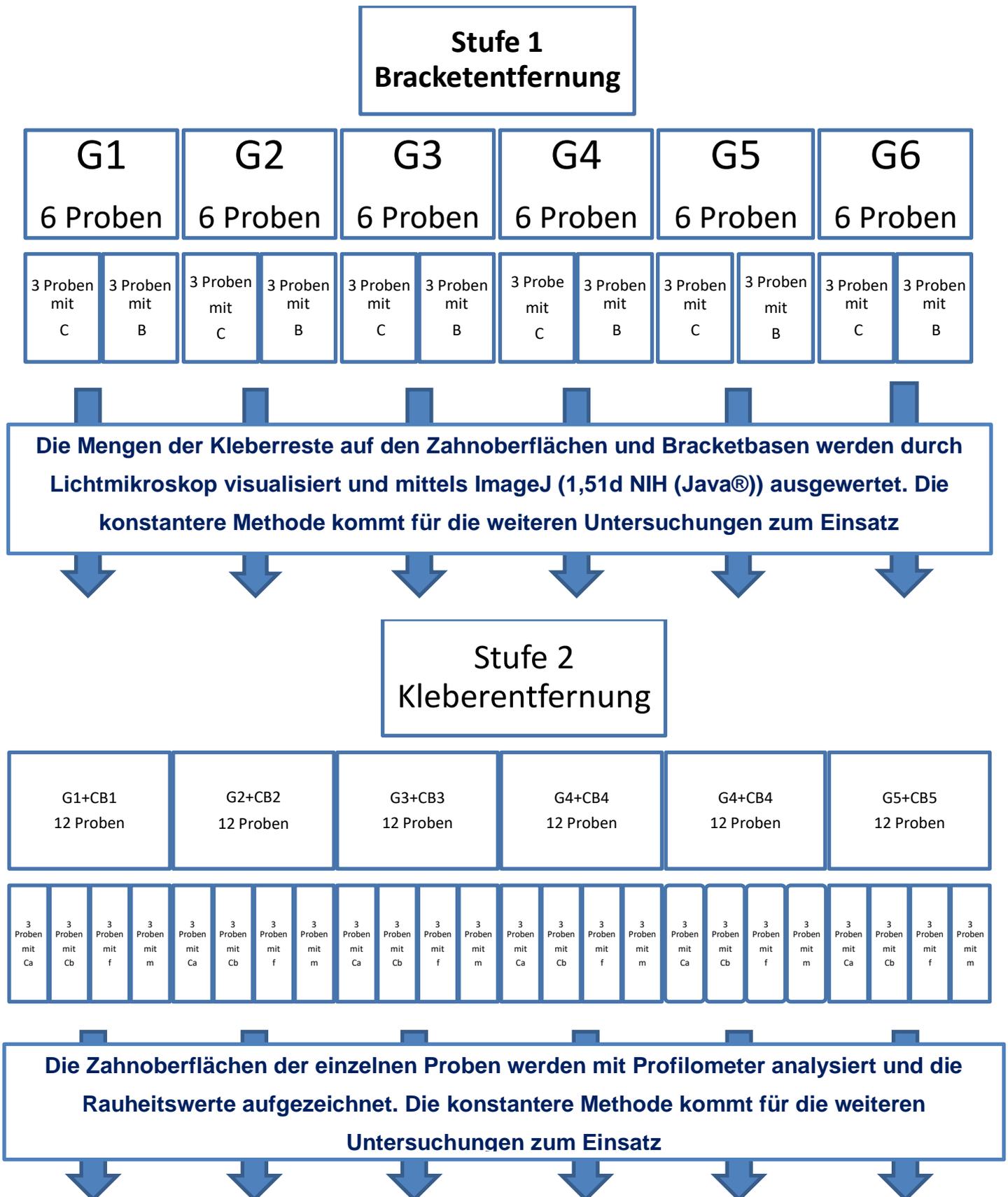
- In **Stufe 1** wurden zwei Bracketentfernungsmethoden evaluiert und miteinander verglichen. Für diese Untersuchung wurden die Proben mit einem Lichtmakroskop vergrößert und die zurückgebliebenen Kleberreste mittels eines Berechnungsprogrammes quantifiziert. Die konstantere Methode von beiden kam bei der nächsten Stufe zum Einsatz.
- In **Stufe 2** wurden vier Methoden der Kleberrestentfernung untersucht und miteinander verglichen. Es wurde ein Profilometer zur Untersuchung verwendet. Die konstantere Methode kam für die weitere Untersuchung zum Einsatz.
- In **Stufe 3** wurden zwei Poliermethoden untersucht und miteinander verglichen. Für diese Versuchsreihe wurden die Proben ebenso profilometrisch untersucht.
-

Einteilung der Versuchsgruppen

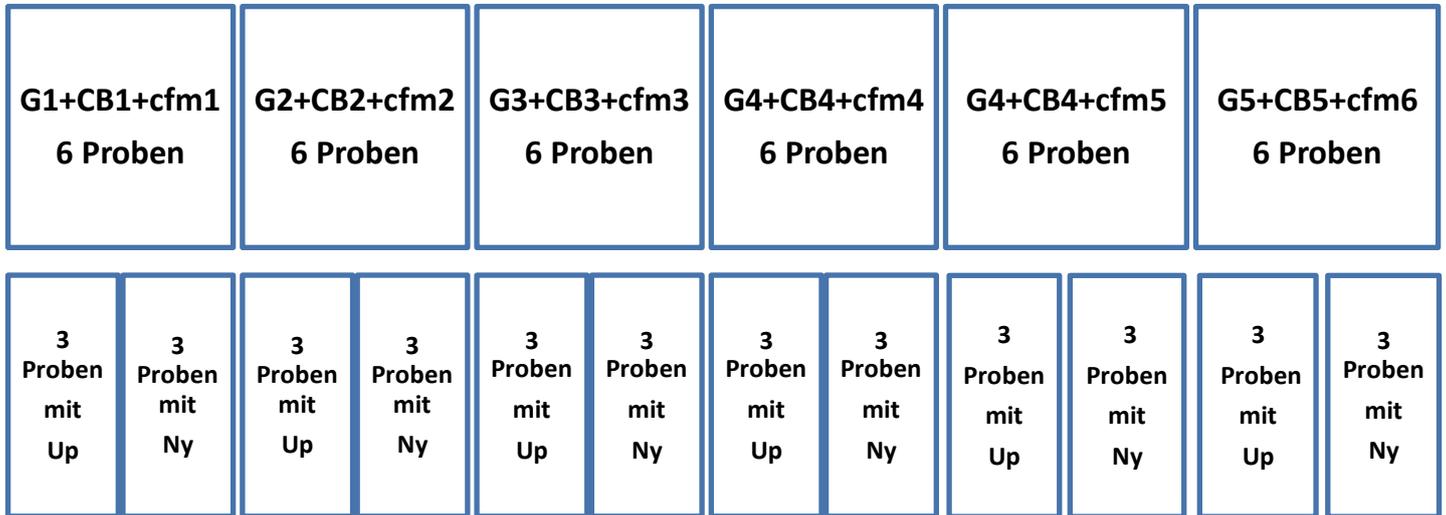
In allen drei Stufen wurden jeweils sechs Gruppen unterschieden, wobei die Gruppen nach den untersuchten Adhäsivmaterialien zugeteilt und wie folgt beschriftet wurden:

- Gr.1 (Opal® bond MV – Ultradent)
- Gr.2 (Opal® bond – Ultradent)
- Gr.3 Trasbond™ XT – 3M Unitek)
- Gr.4 (Trasbond™ Plus – 3M Unitek)
- Gr.5 (ConTec LC – Dentaaurum)
- Gr.6 (ConTec SE – Dentaaurum)

Übersicht zum Versuchsablauf der gesamten Studie



Stufe 3 Politur



Die einzelnen Proben werden nach der Politur mit dem Profilometer analysiert und die Rauheitswerte dann aufgezeichnet.

Abb. 17: Vereinfachte Darstellung des Versuchsaufbaus der gesamten Studie. Stufen eins: Bracketentfernung mittel Cutter vs. Bracketenfernungszange, Stufe zwei: Kleberrestentfernung mittels Carbidfinierer 100,000 r/min vs. Carbidfinierer 30.000 r/min vs. Finiererdiamanten vs. Metallfinierer und Stufe drei: Politur mittels Nylonbürste vs. Universalpolierer

3.3 Experimenteller Ablauf

3.3.1 Herstellung der Prüfkörper

Vorbereitung des Zahnmaterials:

Für die Untersuchung wurden nur intakte Zähne ohne Schmelzrisse verwendet. Diese wurden mittels fluoridfreier Polierpaste (Zircate Prophy Paste – Dentsply) und Bürste für je 15 Sekunden bei langsamer Geschwindigkeit poliert.

Im Anschluss wurden die Brackets mit den sechs zuvor beschriebenen Adhäsiven auf den Prüfkörpern fixiert.

Tab. 3: Gruppenbildung nach der untersuchten Adhäsivmaterialien

Gruppen	Abkürzung	Verwendete Material	Hersteller
Gruppe 1	G1	Opal® bond MV	Ultradent
Gruppe 2	G2	Opal® bond	Ultradent
Gruppe 3	G3	Trasbond™ XT	3M Unitek
Gruppe 4	G4	Trasbond™ Plus	3M Unitek
Gruppe 5	G5	ConTec LC	Dentaurum
Gruppe 6	G6	ConTec SE	Dentaurum

Klebeprozess

Die Prüfkörper wurden streng nach Herstellerangaben sowie nach folgendem Protokoll vorbereitet:

- 1: Vor dem Kleben wurden die Zahnflächen mit Phosphorsäure geätzt, gespült und getrocknet.
- 2: Eine dünne Schicht Primer (je nach Adhäsiv) wurde auf die geätzte Zahnfläche aufgetragen.
3. Zum Ausdünnen wurde 2 Sekunden pro Zahn mit Luft sanft verblasen.
- 4: Eine dünne Schicht Adhäsiv wurde auf die Basis des Brackets aufgetragen.
- 5: Das mit Kleber beschichtete Bracket wurden auf den Zahn gesetzt.

6: Die überschüssigen Kleber wurden um die Bracketbasis sofort entfernt.

7: Die beklebten Brackets wurden für 15 Sekunden am mesialen und für 15 Sekunden am distalen Ende des Zahnes ausgehärtet.



Abb. 18: Klebeprozess

Wie vorhin beschrieben wird die Untersuchung in drei Schritte bzw. Stufen eingeteilt. In Schritt eins wurden die beklebten Brackets mechanisch entfernt. In Schritt zwei wurden die verbliebenen Adhäsivreste entfernt und in Schritt drei wurden die Proben poliert.

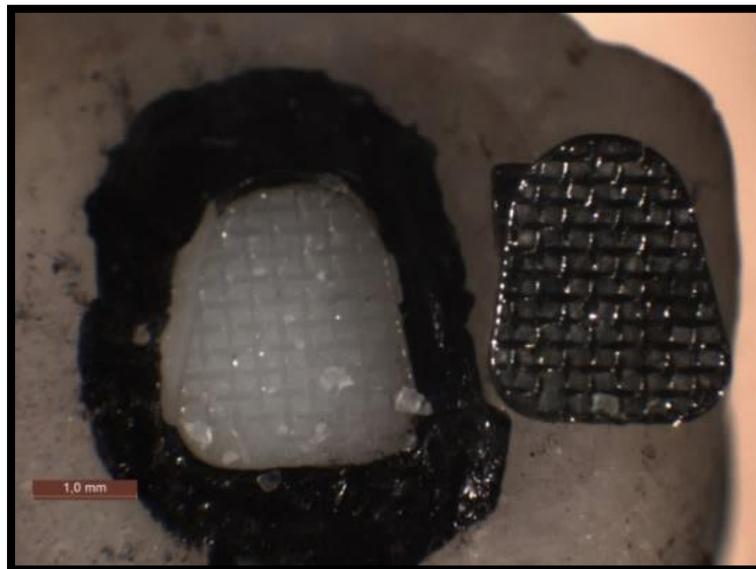
3.3.2 Stufe 1

Für diese Versuchsreihe wurden 36 Proben zugeteilt und entsprechend vorbereitet. Die Proben wurden anhand der oben erwähnte Gruppierungen G1 bis G6 aufgeteilt und mit den zugeordneten Adhäsivmaterialien (siehe Klebeprozess) beklebt, wobei jede Gruppe aus sechs Proben bestand. Es wurden drei Proben für jede Methode zugeteilt und wie folgt beschriftet (Tabelle 4).

Tab. 4: Probenbeschriftung in Stufe 1

Gruppen G1 - G6	Bracketentfernungszange	Cutter
Gruppe 1	G1B (3 Proben)	G1C (3 Proben)
Gruppe 2	G2B (3 Proben)	G2C (3 Proben)
Gruppe 3	G3B (3 Proben)	G3C (3 Proben)
Gruppe 4	G4B (3 Proben)	G4C (3 Proben)
Gruppe 5	G5B (3 Proben)	G5C (3 Proben)
Gruppe 6	G6B (3 Proben)	G6C (3 Proben)

Für die Beurteilung und somit die Quantifizierung der zurückgebliebenen Kleberreste auf der Zahnoberfläche wurden die Ränder der beklebten Brackets mit einem wasserfesten Stift umrandet und dabei markiert (Abbildung 19), damit später nach der Bracketentfernung die beklebte Stelle auf dem Zahn zum Vermessen nachvollziehbar blieb.

**Abb. 19:** Beschriftung und Bracketentfernung in Stufe 1

Für die Entfernung der Brackets wurden die zwei oben beschriebenen unterschiedlichen Bracketentfernungsmethoden verwendet (Abbildung 19):

- Bracketentfernungszange (B)
- Cutter (C)

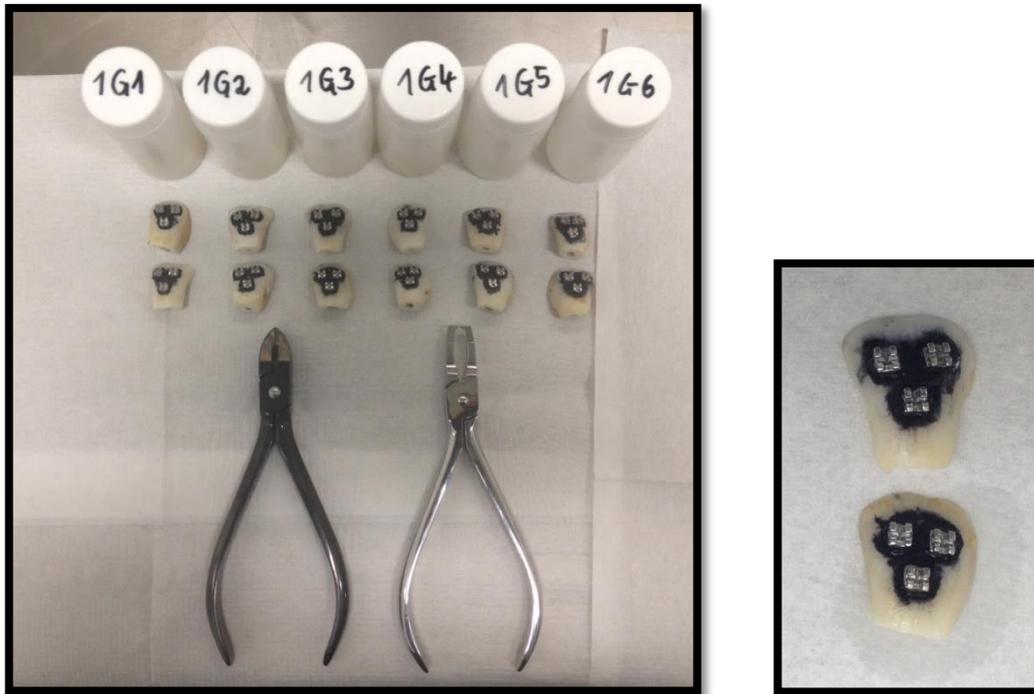


Abb. 20: Versuchsaufbau Stufe 1.

Oberflächenbeurteilung mit dem Lichtmikroskop

Nachdem die Brackets aus den Schmelzoberflächen entfernt worden waren, wurden diese sowie die Zahnoberflächen unter einem Lichtmikroskop mit 16-facher Vergrößerung begutachtet. Dabei wurde das Bracket auf die Flügel gelegt und die Klebefläche, die sich nun im rechten Winkel zur Lichtachse befand, aufgenommen (Abbildung 20). Die Auswertung der Umriss des verbliebenen Adhäsiven auf der Bracketbasis erfolgte mittels des Computerprogramms ImageJ (1,51d NIH, Java®). In der anschließenden Berechnung der verbliebenen Adhäsivfläche auf dem Bracket, gemessen in Prozent, wurde diese ins Verhältnis zu der Gesamtfläche (17,4 mm²) der Bracketbasis gesetzt. Dabei wurden die Kleberreste außerhalb der Bracketbasis nicht in Betracht gezogen. Mithilfe des Adhesive Remnant Index (ARI) wurden die verbliebene Kunststoffe bestimmt. Dieser gibt Auskunft über die Menge des am Zahn verbliebenen Klebers und damit über den Verlauf der Bruchlinie.

Die erstellten Bilder wurden entsprechend analysiert und der ARI wurde mit folgender Formel berechnet.

$$\text{ARI} = \frac{\text{Fläche Kleberrest auf Zahn}}{\text{Fläche Bracketbasis}} \times 100$$

100 % bedeutet die gesamten Kleberreste auf die Schmelzoberfläche.

0 % bedeutet keine Kleberreste auf der Schmelzoberfläche.

ARI 0 = kein Adhäsiv auf dem Schmelz

ARI 1 = < 50 % auf dem Schmelz

ARI 2 = > 50 % auf dem Schmelz

ARI 3 = gesamtes Adhäsiv auf dem Schmelz

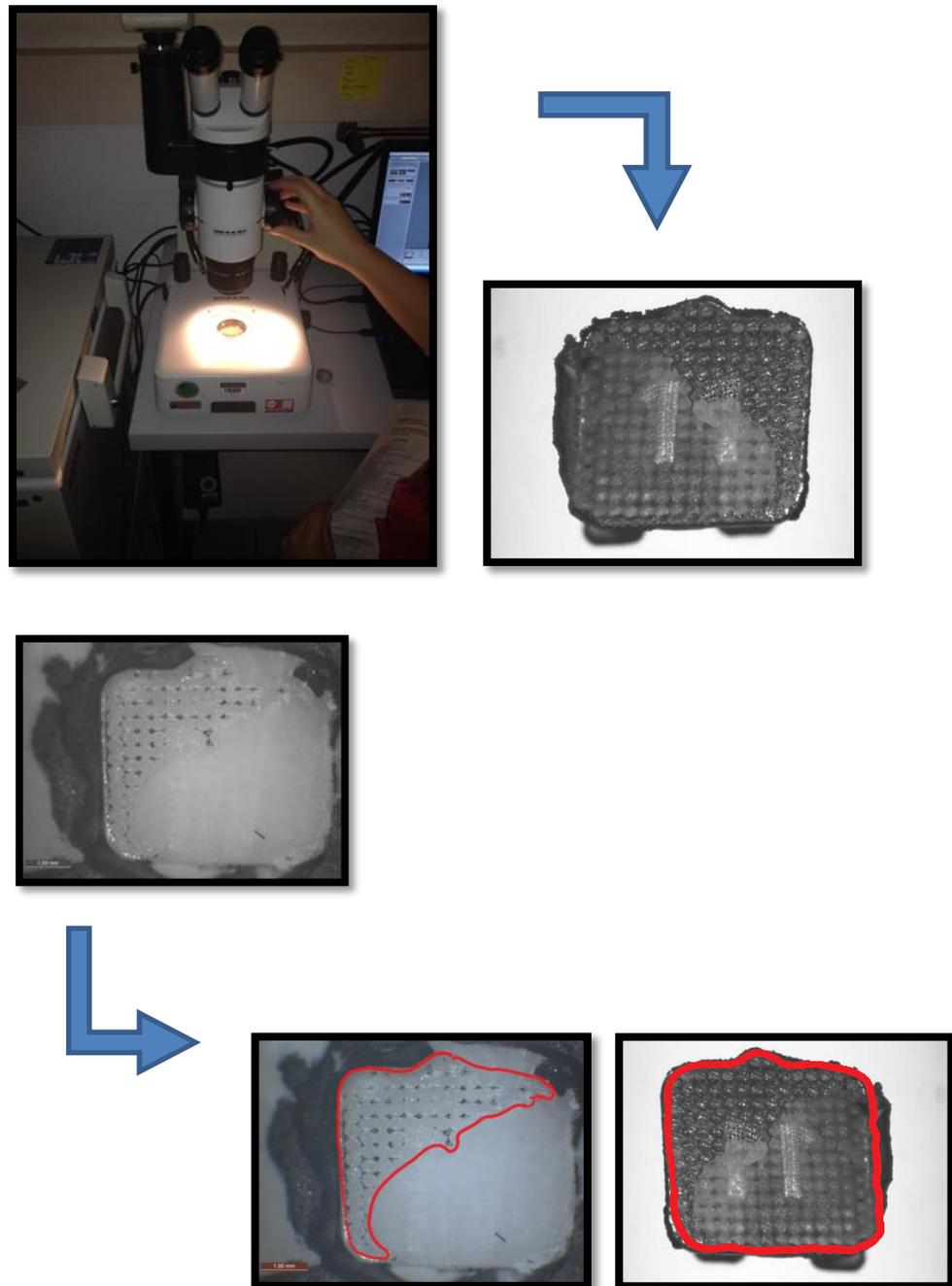


Abb. 21: Oberflächenbeurteilung mit dem Lichtmikroskop und Berechnung des Restadhäsives mit Image J

3.3.3 Stufe 2

Der zweiten Versuchsreihe wurden 72 Proben zugeteilt, welche aus dem zuvor am besten abgeschrittenen Verfahren hervorgingen. Die Proben wurden anhand der oben

Erwähnten Gruppierungen G1 bis G6 aufgeteilt und mit den zugeordneten Adhäsivmaterialien wie in Stufe eins beklebt. Jede Gruppe bestand aus zwölf Proben. Es wurden drei Proben für jede Methode zugeteilt und wie in Tabelle 5 beschriftet.

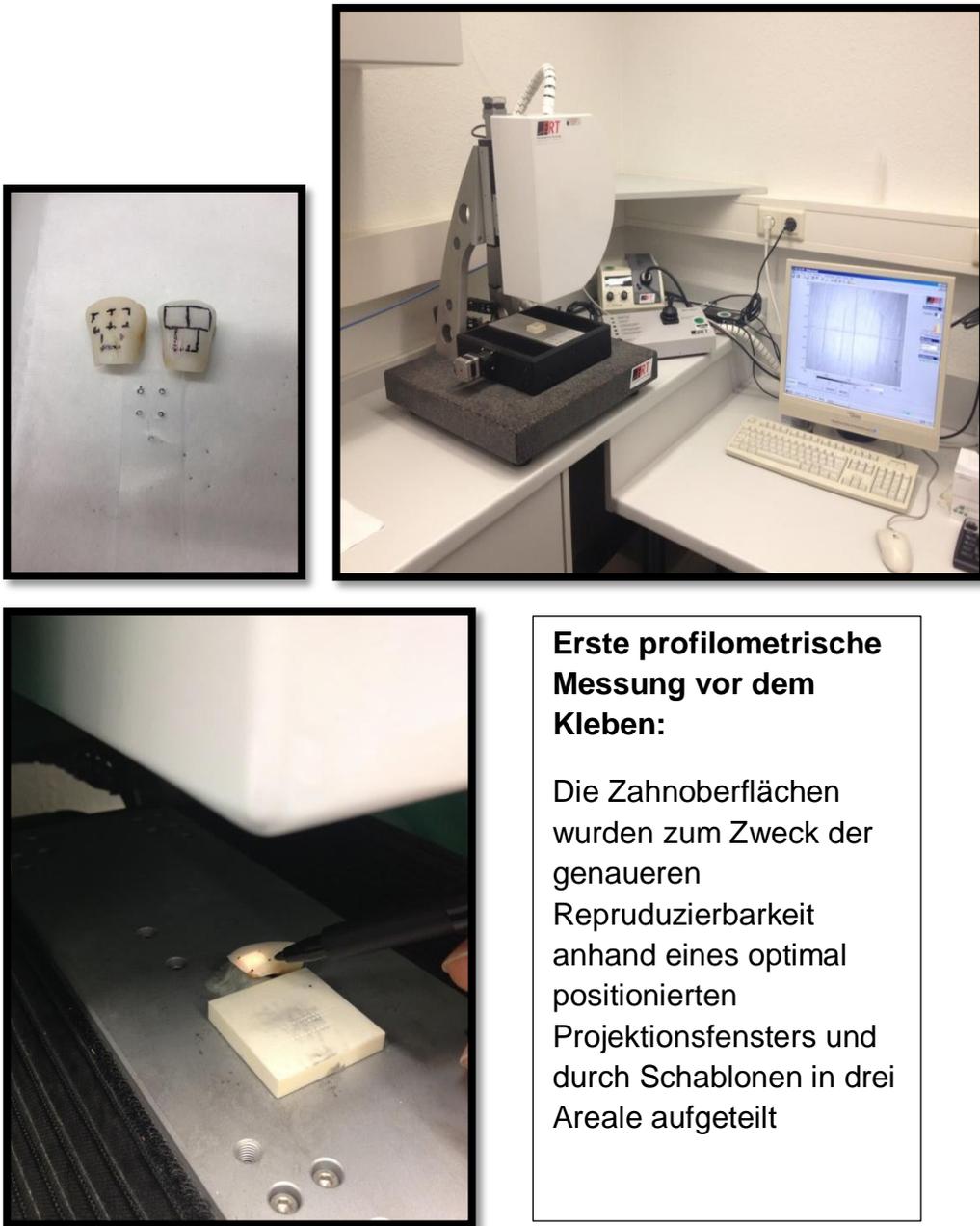
Tab. 5: Probenbeschriftung in Stufe 2

	Carbidfinierer 100	Carbidfinierer 30	Finierdiamant	Metallfinierer
Gruppe 1	G1C1	G1C2	G1F	G1M
Gruppe 2	G2C1	G2C2	G2F	G2M
Gruppe 3	G3C1	G3C2	G3F	G3M
Gruppe 4	G4C1	G4C2	G4F	G4M
Gruppe 5	G5C1	G5C2	G5F	G5M
Gruppe 6	G6C1	G6C2	G6F	G6M

Oberflächenbeurteilung mit dem Profilometer

Die einzelnen Zahnoberflächen wurden in dieser Stufe einer profilometrischen Untersuchung vor und nach dem Bracketkleben unterzogen. Zunächst wurde der optimale Abstand zwischen Strahlquelle und Zahnoberfläche im Profilometer bestimmt. Das Strahlfenster wurde dann markiert und zum Zweck der genauen Reproduzierbarkeit wurde eine Schablone hergestellt. Die Zahnoberflächen wurden dann anhand dieser Schablone in drei gleich große Areale aufgeteilt. Mithilfe dieser markierten Areale konnte die gleiche Stelle sowohl vor als auch nach dem Bekleben eingescannt werden (Abbildung 22).

Die Zahnoberflächen wurden beschriftet und vor dem Kleben profilometrisch untersucht. Anhand der Kleberprotokolle in Stufe eins wurden die Brackets geklebt. Die Brackets wurden dann entfernt, wobei die gut etablierte bzw. konstantere Methode der Bracketentfernung für jede Gruppe aus Stufe eins zum Einsatz kam.



**Erste profilometrische
Messung vor dem
Kleben:**

Die Zahnoberflächen
wurden zum Zweck der
genaueren
Reproduzierbarkeit
anhand eines optimal
positionierten
Projektionsfensters und
durch Schablonen in drei
Areale aufgeteilt

Abb. 22: Oberflächenbeurteilung mit dem Profilometer

Nach der Bracketentfernung kamen zur Entfernung der verbliebenen Kleber vier verschiedenen Verfahren zum Einsatz.

- Carbidfinierer mit 100.000 rpm
- Carbidfinierer mit 30.000 rpm
- Ultrafeiner Diamantfinierer mit 100.000 rpm
- Metallfinierer mit 30.000 rpm

Die Proben wurden von dem gleichen Behandler bearbeitet und die benötigte Zeit für jede Methode, vom Moment des Beginnes bis zum Ende dokumentiert. Dieser Prozess wurde für jede Probe fortgesetzt, bis kein Klebstoff mehr an der Schmelzoberfläche zu sehen war (visuelle Inspektion) und die Schmelzoberfläche sich glatt anfühlte (taktil mit Sonde) (Abbildung 23). Schließlich wurden alle beklebten Areale nochmals profilometrisch untersucht und die Differenz der Rauheitswerte wurde dann vor und nach dem Bracketkleben dokumentiert.



Abb. 23: Bracketkleben und Debondingprozess nach der ersten profilometrischen Untersuchung

3.3.4 Stufe 3

Für die dritte Versuchsreihe wurden 36 Proben zugeteilt und nach dem aus Stufe eins und zwei ermittelten Protokollen vorbereitet. Die Proben wurden dann in die Gruppen G1 bis G6 aufgeteilt und mit den zugeordneten Adhäsivmaterialien wie in Stufe zwei beklebt. Jede Gruppe bestand aus sechs Proben. Dabei wurden drei Proben für jede Methode zugeteilt und wie folgt beschriftet.

Tabelle 6: Probenbeschriftung in Stufe drei

	Nylonbürste	Universalpolierer
Gruppe 1	G1Ny	G1Up
Gruppe 2	G2Ny	G2Up
Gruppe 3	G3Ny	G3Up
Gruppe 4	G4Ny	G4Up
Gruppe 5	G5Ny	G5Up
Gruppe 6	G6Ny	G6Up

Oberflächenbeurteilung mit dem Profilometer

Die Zahnoberflächen wurden beschriftet und wie in Stufe zwei vor und nach dem Bracketkleben profilometrisch untersucht. Anhand der Kleberprotokolle in Stufe eins und zwei wurden die Brackets geklebt. Die Brackets wurden dann entfernt, wobei die gut etablierte bzw. konstantere Methode der Bracketentfernung aus Stufe eins und Kleberentfernung aus Stufe eins für jede Gruppe hier zum Einsatz kam.

Nach der Bracketentfernung wurden zum Polieren der Oberflächen verschiedene Verfahren verwendet.

- Nylonbürste mit Sprayeinsatz und 10.000 rpm
- Universalpolierer mit Sprayeinsatz und 10.000 rpm

Hier wurden die Proben auch von dem gleichen Behandler bearbeitet und die benötigte Zeit wurde für jede Methode vom Moment des Beginnes bis zum Ende dokumentiert. Dieser Prozess wird für jede Probe fortgesetzt, bis eine glatte Oberfläche zu sehen ist (visuelle Inspektion). Schließlich wurden alle beklebten Areale nochmals profilometrisch untersucht und die Differenz der Rauheitswerte vor und nach dem Bracketkleben wurde dokumentiert.

3.4 Statistische Auswertung

Zur Analyse der Messergebnisse wurde die Analysesoftware (IBM SPSS Statistics Version 19.0.0, SPSS Inc., Chicago, USA) verwendet. Ziel der statistischen Auswertung ist die Abgrenzung signifikanter beobachteter Ereignisse von zufälligen Erscheinungen, um dadurch die Ergebnisse als gesichert ansehen zu können. Die Effekte der Bracketentfernungsmethoden in der ersten Versuchsreihe, sowie der Adhäsiventfernung in der zweiten Stufe, sowie die Effekte der Poliermethoden in der dritten Versuchsreihe auf den verschiedenen Klebern, wurden mit Hilfe einer multifaktoriellen Varianzanalyse (ANOVA) bestimmt. Durch den Mann-Whitney-Test erfolgte für jedes Substrat getrennt die grundsätzliche Erfassung eines statistisch signifikanten Unterschiedes innerhalb der sechs Adhäsivgruppen. Beide Verfahren ermöglichten eine genaue Unterscheidung der Untergruppen im Hinblick auf statistische Signifikanzen, wobei ein p-Wert von $< 0,05$ einen signifikanten Unterschied signalisierte. Die verschiedenen Tests untersuchten folgende Parameter: die Rauheitswerte R_a , den ARI und die Zeit.

4. Ergebnisse

4.1 Versuch 1

4.1.1 Ergebnisse der Bracketentfernungsmethoden

4.1.1.1 Ermittlung des Restadhäsives nach dem Adhesive Remnant Index (ARI)

Nach der Bracketentfernung wurden Schmelzoberflächen und Bracketbasen bei 16-facher Vergrößerung unter dem Lichtmikroskop fotografisch dokumentiert. Dies diente dazu, den Adhäsivrest mithilfe des Adhesive Remnant Index (ARI) nach (Artun and Bergland, 1984) zu bestimmen. Dieser gibt Auskunft über die Menge des am Zahn verbliebenen Adhäsiven. Der Adhesive Remnant Index (ARI) teilt sich wie in der Tabelle 7 in vier Grade ein:

Tab. 7: Adhesive Remnant Index (ARI) nach (Artun und Bergland 1984)

ARI Grad	Restadhäsiv am Zahnschmelz bzw. an der Bracketbasis
Grad 0	0 % Adhäsiv am Zahnschmelz bzw. 100 % an der Bracketbasis
Grad 1	weniger als 50 % Adhäsiv am Zahnschmelz bzw. mehr als 50 % an der Bracketbasis
Grad 2	mehr als 50 % Adhäsiv am Zahnschmelz bzw. weniger als 50 % an der Bracketbasis
Grad 3	100 % Adhäsiv am Zahnschmelz bzw. 0 % an der Bracketbasis

Die Vermessung der verbliebenen Adhäsive erfolgte am Computer mithilfe des Programms Image J (Wayne Rasband - National Institut of Health) und wurde dann als Prozentsatz ins Verhältnis zu der Gesamt-Bracket-Basisfläche gesetzt. Dabei wurde das verbliebene Adhäsiv in Abhängigkeit von der Lokalisation und Menge in vier Kategorien eingeteilt. Bei der Einteilung können sich Adhäsivreste entweder auf der Bracketbasis oder auf dem Zahn befinden. Weiterhin kann es zu einem kohäsiven Bruch im Adhäsiv selbst kommen. In manchen Fällen jedoch verläuft der Bruch nicht in diesen

gewünschten Grenzflächen, sondern auf dem Zahnschmelz (wie im Probe Nr.1, Transbond TMXT, BEZ: Abbildung 24). Für die Versuche wurden nach Adhäsivart sechs Gruppen gebildet. Jede Gruppe besteht aus sechs Messwerten, wobei die Hälfte der Werte nach der Bracketabnahme mit der Bracketentfernungszange und die andere Hälfte nach Abnahme mit Cutter gemessen wurden.

Bei allen Gruppen wurden 36 Zahnoberflächen auf Adhäsivreste und den jeweiligen ARI-Wert in Prozent untersucht. Alle gemessenen Werte und Daten wurden wie in die folgenden Tabellen evaluiert.

Tab. 8: Die ermittelten Werte für Restadhäsiv in mm² und Prozentsatz unter Berücksichtigung der Basisfläche des Brackets (17,4 mm²), sowie der dazugehörige ARI-Wert.

Opal Bond MV				
Br.Entfernungsmethode	Probe Nr.	Restadhäsiv	Restadhäsiv in %	ARI-Score
BEZ	1	17,3	99,4	2
BEZ	2	16,1	97,3	2
BEZ	3	17,1	98,3	2
Cutter	1	16,8	96,1	2
Cutter	2	16,0	92,0	2
Cutter	3	5,9	33,6	1

Opal Bond

Br.Entfernungsmethode	Proben Nr.	Restadhäsiv	Restadhäsiv in %	ARI-Score
BEZ	1	17,2	99,1	2
BEZ	2	17,3	99,3	2
BEZ	3	15,2	87,1	2
Cutter	1	17,3	99,5	2
Cutter	2	17,1	97,9	2
Cutter	3	17,2	98,7	2

**Transbond
XT**

Br.Entfernungsmethode	Proben Nr.	Restadhäsiv	Restadhäsiv in %	ARI-Score
BEZ	1	13,2	75,5	2
BEZ	2	17,4	100	3
BEZ	3	17,4	100	3
Cutter	1	17,4	100	3
Cutter	2	17,4	99,8	2
Cutter	3	17,4	100	3

**Transbond
Plus**

Br.Entfernungsmethode	Proben Nr.	Restadhäsiv	Restadhäsiv in %	ARI-Score
BEZ	1	5,8	33,3	1
BEZ	2	10,8	61,8	2
BEZ	3	17,3	99,3	2
Cutter	1	17,4	99,6	2
Cutter	2	17,1	98,0	2
Cutter	3	17,2	98,4	2

ConTec LC

Br.Entfernungsmethode	Proben Nr.	Restadhäsiv	Restadhäsiv in %	ARI-Score
BEZ	1	17,4	100	3
BEZ	2	17,4	100	3
BEZ	3	17,4	100	3
Cutter	1	17,3	99,4	2
Cutter	2	17,2	98,8	2
Cutter	3	17,4	100	3

ConTec SE				
Br.Entfernungsmethode	Proben Nr.	Restadhäsiv	Restadhäsiv in %	ARI-Score
BEZ	1	17,4	99,8	2
BEZ	2	17,4	99,6	2
BEZ	3	17,3	99,3	2
Cutter	1	16,9	96,9	2
Cutter	2	17,4	99,8	2
Cutter	3	17,4	99,5	2

Die lichtmikroskopische Betrachtung zeigt exemplarisch unterschiedliche Adhäsivverteilungen auf der Zahnoberfläche, wie in den folgenden Abbildungen am Beispiel des Adhäsives Transbond™ XT mit Bracketentfernungszange bzw. Cutter zu sehen ist.

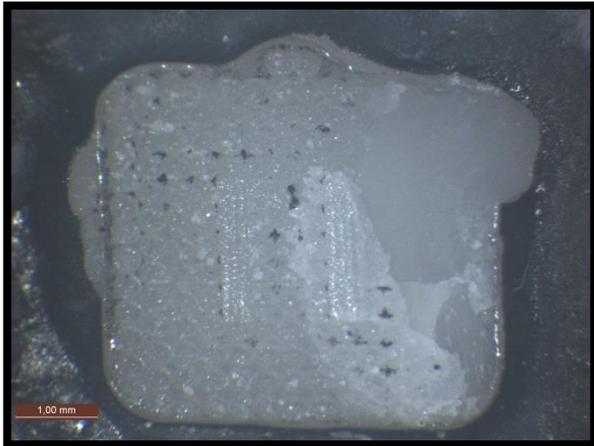


Abb. 24: Darstellung des Adhäsivrestes auf der Zahnoberfläche nach Bracketentfernung mit BEZ, Probe 1; Transbond XT; Licht x 16.

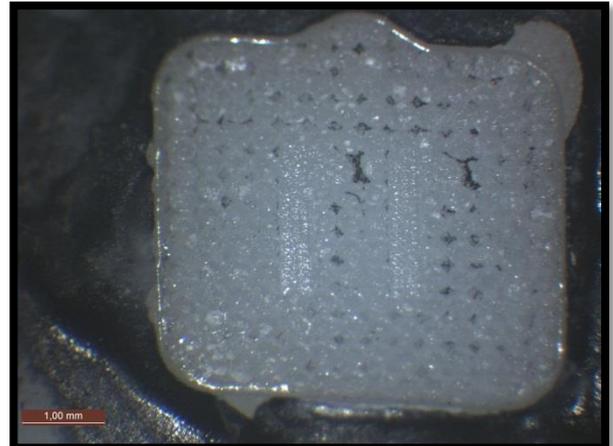


Abb. 26: Darstellung des Adhäsivrestes auf der Zahnoberfläche nach Bracketentfernung mit Cutter, Probe 1; Transbond XT; Licht x 16.

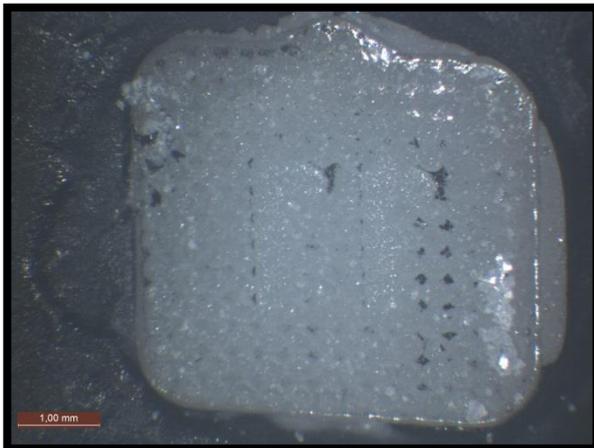


Abb. 25: Darstellung des Adhäsivrestes auf der Zahnoberfläche nach Bracketentfernung mit BEZ, Probe 2; Transbond XT; Licht x 16.

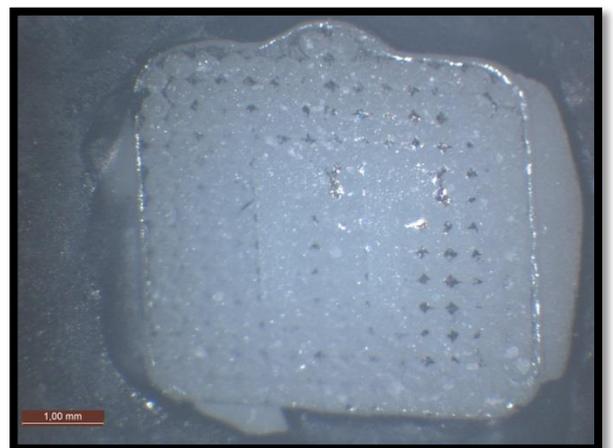


Abb. 27: Darstellung des Adhäsivrestes auf der Zahnoberfläche nach Bracketentfernung mit Cutter; Probe 2; Transbond XT; Licht x 16.

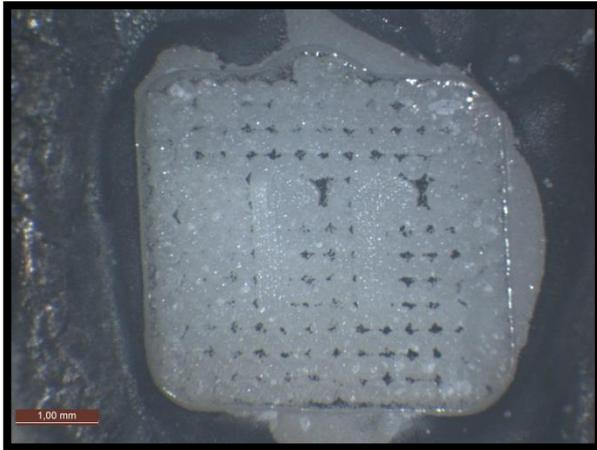


Abb. 28: Darstellung des Adhäsivrestes auf der Zahnoberfläche nach Bracketentfernung mit BEZ; Probe 3; Transbond XT; Licht \times 16.

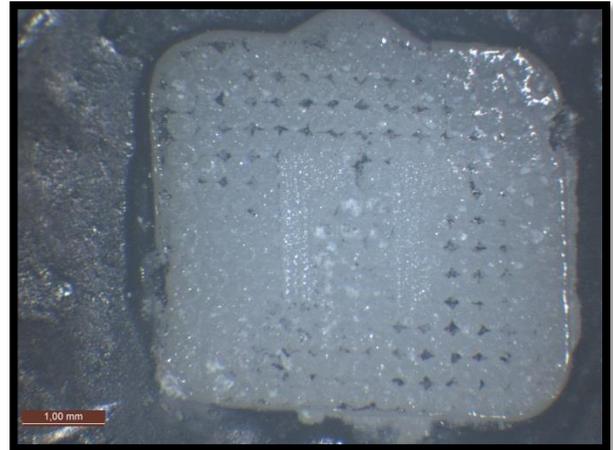


Abb. 29: Darstellung des Adhäsivrestes auf der Zahnoberfläche nach Bracketentfernung mit Cutter; Probe 3; Transbond XT; Licht \times 16.

Tabelle 9 veranschaulicht den Adhäsivrest auf dem Zahn, ausgedrückt in ARI-Graden von null bis drei. Keine der untersuchten Proben nach Bracketabnahme mit Bracketentfernungszange (BEZ) bzw. Cutter zeigt einen ARI-Wert von null.

Tab. 9: Die ermittelten ARI-Grade des Adhäsivrestes unter Berücksichtigung der Basisfläche des Brackets (17,4 mm²).

Gruppen 1 – 6	Verfahren	ARI-Grade 0 – 3		
		Probe 1	Probe 2	Probe 2
Opal®bond MV	BEZ	2	2	2
	Cutter	2	2	1
Opal®bond	BEZ	2	2	2
	Cutter	2	2	2
Transbond™ XT	BEZ	2	3	3
	Cutter	3	2	3
Transbond™ Plus	BEZ	1	2	2
	Cutter	2	2	2
ConTec LC	BEZ	3	3	3
	Cutter	2	2	3
ConTec SE	BEZ	2	2	2
	Cutter	2	2	2

ARI-Wert bei der Bracketabnahme mittels Bracketentfernungszange (BEZ)

Das Diagramm in Abbildung 30 zeigt die Verteilung der ARI-Grade nach der Bracketabnahme mittels Bracketentfernungszange und verdeutlicht, dass bei den Gruppen Opal® Bond MV, Opal® Bond und ConTec SE 100 % die Proben einen ARI-Grad 2 aufwiesen. Das bedeutet, dass mehr als 50 % des Restadhäsives nach der Bracketentfernung an der Zahnoberfläche verblieben sind. Während beim Adhäsiv Transbond™XT 66 % der Proben einen ARI-Grad 3 und 33 % der Proben Grad 2 zeigten, wies das Adhäsiv Transbond™Plus in 66 % der Proben einen ARI-Grad 2 und bei 33 % der Proben einen Grad 1 auf. Beim ConTec LC zeigten 100 % der Proben einen ARI-Grad 3, womit 100 % des Adhäsives auf der Zahnoberfläche verblieben waren.

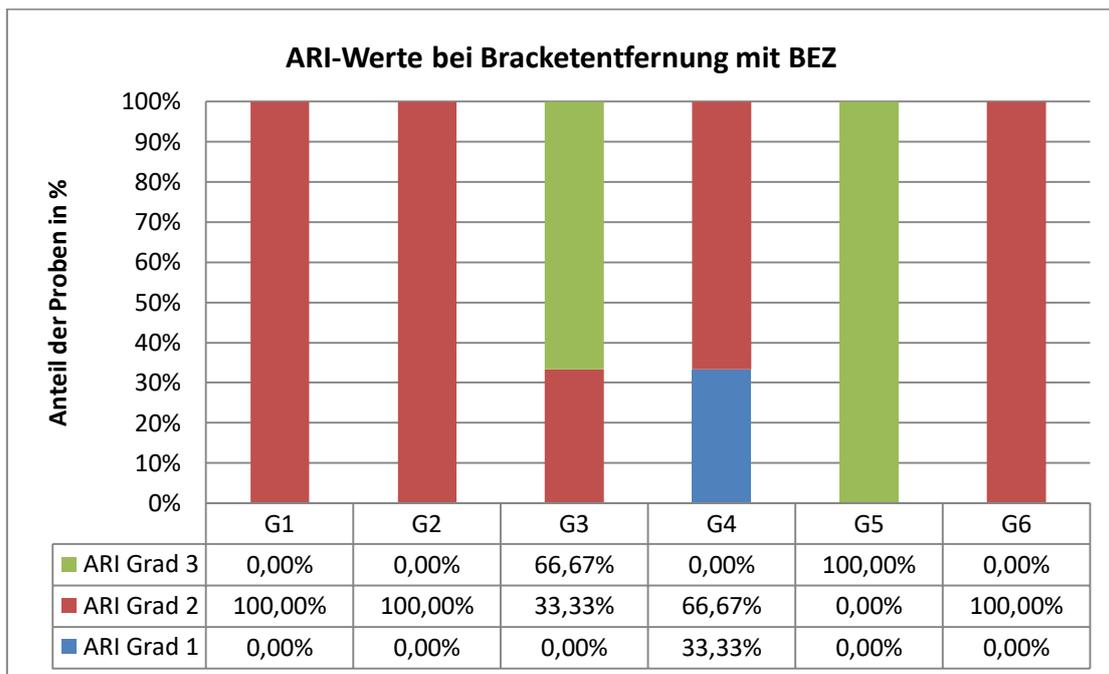


Abb. 30: ARI-Grade des Restadhäsives für alle Kleber nach Bracketabnahme mittels Bracketentfernungszange

ARI-Wert bei der Bracketabnahme mittels Cutter

Das Diagramm in Abbildung 31 zeigt, dass bei den Gruppen Opal® Bond Transbond™Plus und ConTec SE 100 % die Proben einen ARI-Grad 2 hatten. Das bedeutet, dass mehr als 50 % des Restadhäsives nach der Bracketentfernung an der Zahnoberfläche geblieben sind. Beim Adhäsiv Opal® Bond zeigten 66 % der Proben einen ARI-Grad 2 und 33 % der Proben einen ARI-Grad 1. Während beim Adhäsiv Tarnsbond™XT 66 % der Proben einen ARI-Grad 3 und 33 % der Proben einen Grad 2 hatten, wies das Adhäsiv ConTec LC eine deutliche Reduktion des Restadhäsives auf der Zahnoberfläche auf. Dabei hatten 66 % der Proben einen ARI-Grad 2 und 33 % der Proben einen Grad 3.

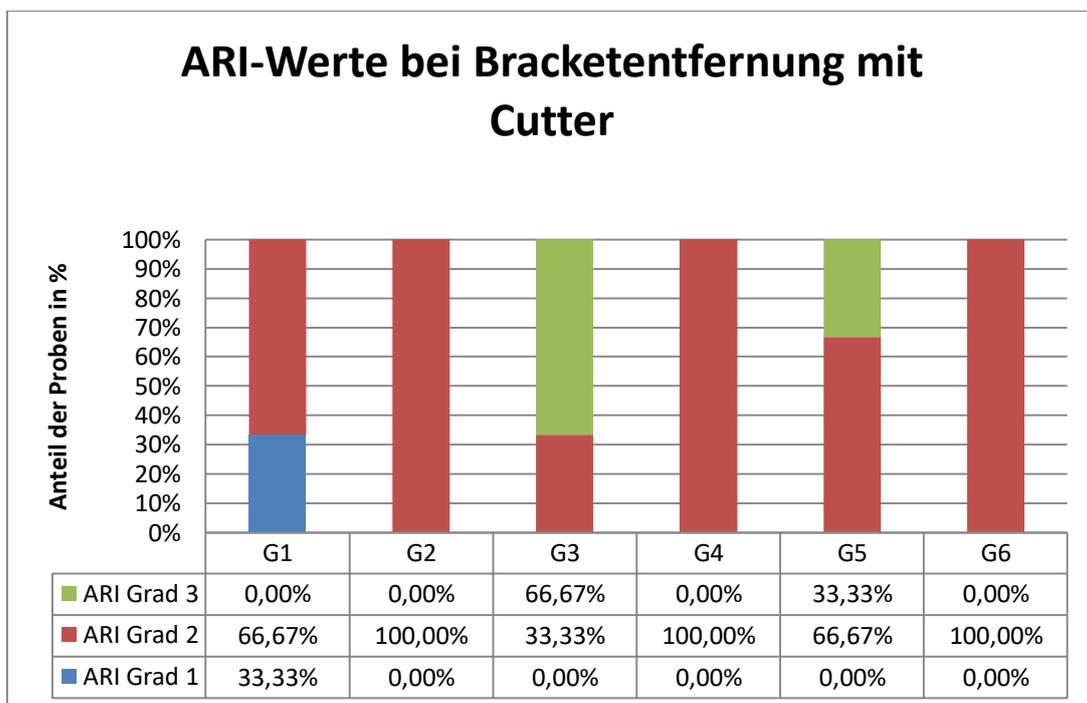


Abb. 31: ARI-Grade des Restadhäsives für alle Kleber nach Bracketabnahme mittels Cutter.

Der Anteil der Proben mit den ARI-Graden bei den Adhäsiven Opal® Bond, Transbond™XT und ConTec SE in Abbildung 31 war identisch mit den gleichen Adhäsiven in Abbildung 30. Um einen genaueren Vergleich zwischen den zwei verwendeten Bracketentfernungsmethoden innerhalb der Gruppen, insbesondere Opal®

Bond, Transbond™XT und ConTec SE, zu erhalten, wurden im Folgenden die prozentualen Messwerte des ARI verwendet.

4.1.1.2 Ermittlung der Restadhäsive nach ARI in Prozent

Um eine genauere statistische Analyse der ARI-Messwerte zu erhalten, wurden für die statistische Auswertung die prozentualen Messwerte des ARI wie in Tabelle 10 am Beispiel des Adhäsives Transbond™XT verwendet. Alle Messwerte befinden sich in tabellarischer Form im Anhang.

Tab. 10: Die ermittelten Werte des Restadhäsives für das Material Transbond™XT in mm², der Prozentsatz unter Berücksichtigung der Basisfläche des Brackets (17,4 mm²) und die dazugehörigen ARI-Werte

Transbond™XT			
Br.Entfernungsmethode	Proben Nr.	Restadhäsiv	Restadhäsiv in %
BEZ	1	13,2	75,5
BEZ	2	17,4	100
BEZ	3	17,4	100
Cutter	1	17,4	100
Cutter	2	17,4	99,8
Cutter	3	17,4	100

4.1.2 Auswertung der Ergebnisse der Bracketentfernungsmethoden

Um die durch die verschiedenen Bracketentfernungsmethoden zurückgebliebenen Adhäsivreste in den einzelnen Gruppen miteinander zu vergleichen, wurden Mittelwert, Standardabweichung, Median sowie minimal und maximal ermittelte Werte in der Tabelle 11 zusammengefasst. Im Folgenden wird mit Hilfe von Säulendiagrammen ein

Vergleich zwischen den verschiedenen Bracketentfernungsmethoden innerhalb einer Gruppe vorgenommen.

Tab. 11: Deskriptive Statistik zu den ARI-Werten des Adhäsivrestes; dabei wurden Mittelwert, Standardabweichung, Median sowie minimale und maximale Werte ermittelt.

Gruppen 1 – 6	Adhäsiventfernungs- verfahren	Auswertung der Oberflächenrauheitsdifferenz in μm				
		Mittelwert	Median	SD	Max.	Min.
Opal Bond MV	BEZ	98,3	98,3	1,1	99,4	97,3
	Cutter	73,9	92,0	35,0	96,1	33,6
Opal Bond	BEZ	95,2	99,1	7,0	99,3	87,1
	Cutter	98,7	98,7	0,8	99,5	97,9
Transbond XT	BEZ	91,8	100,0	14,1	100,0	75,5
	Cutter	99,9	100,0	0,1	100,0	99,8
Transbond Plus	BEZ	64,8	61,8	33,1	99,3	33,3
	Cutter	98,7	98,4	0,8	99,6	98,1
ConTec LC	BEZ	100,0	100,0	0,0	100,0	100,0
	Cutter	99,4	99,4	0,6	100,0	98,8
ConTec SE	BEZ	99,6	99,6	0,2	99,7	99,3
	Cutter	98,7	99,6	1,6	99,8	96,9

Wie in Tabelle 11 und Abbildung 30 ersichtlich ist, hat die Bracketentfernung mittels BEZ in den Adhäsivgruppen Opal® bond MV, ConTec LC und ConTec SE die höchsten ARI-Werte (Mittelwerte) erreicht (mit Opal® bond MV 98,8 mm^2 , ConTec LC 100,0 mm^2 und ConTec SE 99,6 mm^2).

In den restlichen Adhäsivgruppen nämlich Opal® bond, Transbond™XT und Transbond™Plus hat die Methode Cutter die höchsten ARI-Werte (Mittelwerte) erreicht (mit Opal® bond 98,7 mm², Trasbond™ XT 99,9 mm² und Trasbond™ Plus 98,70 mm²). Während bei den Kombinationen BEZ mit ConTec LC der höchste ARI-Wert (100,0 mm²) erreicht wird, zeigt die gleiche Methode mit Transbond™Plus den niedrigsten ARI-Wert (64,8 mm²). Bei den Gruppen ConTec LC und ConTec SE zeigten beide Bracketentfernungsmethoden einen fast identischen Restadhäsivverbleib.

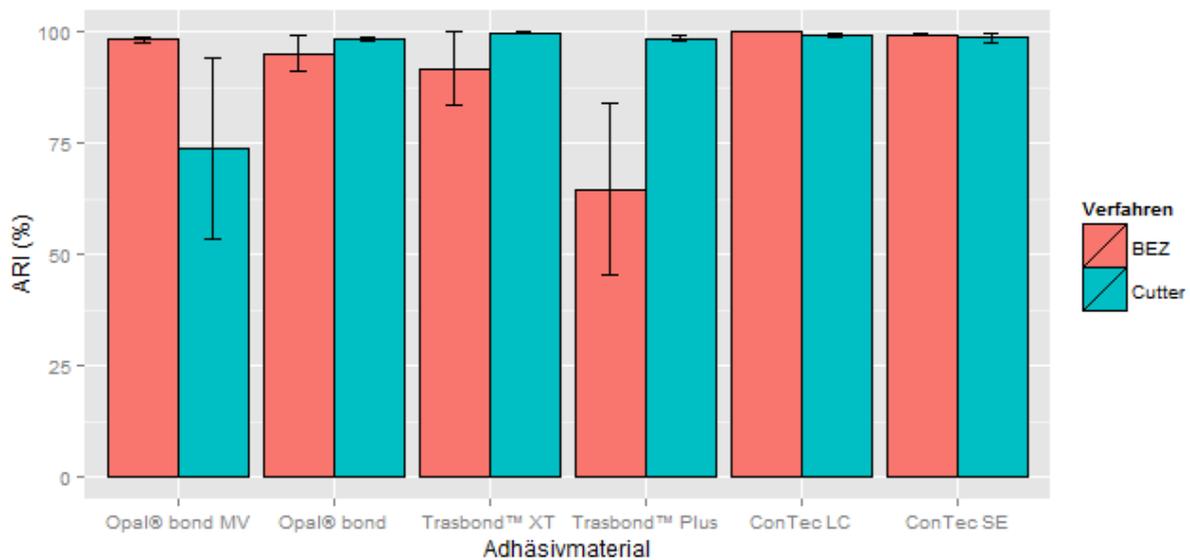


Abb. 32: Gegenüberstellung des Mittelwertes und der Standardabweichung der ARI-Werte (in Prozent) für die zwei geprüften Bracketentfernungsmethoden innerhalb der sechs verwendeten Adhäsive

Abbildung 33 zeigt die Interaktion zwischen beiden verwendeten Bracketentfernungsmethoden innerhalb der sechs Adhäsivmaterialien. Dabei erzeugt der Cutter einen fast konstanteren hohen Verlauf bei allen Adhäsivmaterialien, ausschließlich bei der Gruppe Opal®bond MV hat er seinen tiefsten ARI-Wert. Die BEZ zeigt im Gegensatz dazu einen höheren ARI-Wert bei der Gruppe Opal®bond und nimmt im Verlauf zum tiefsten ARI-Wert bei der Gruppe Transbond™Plus ab.

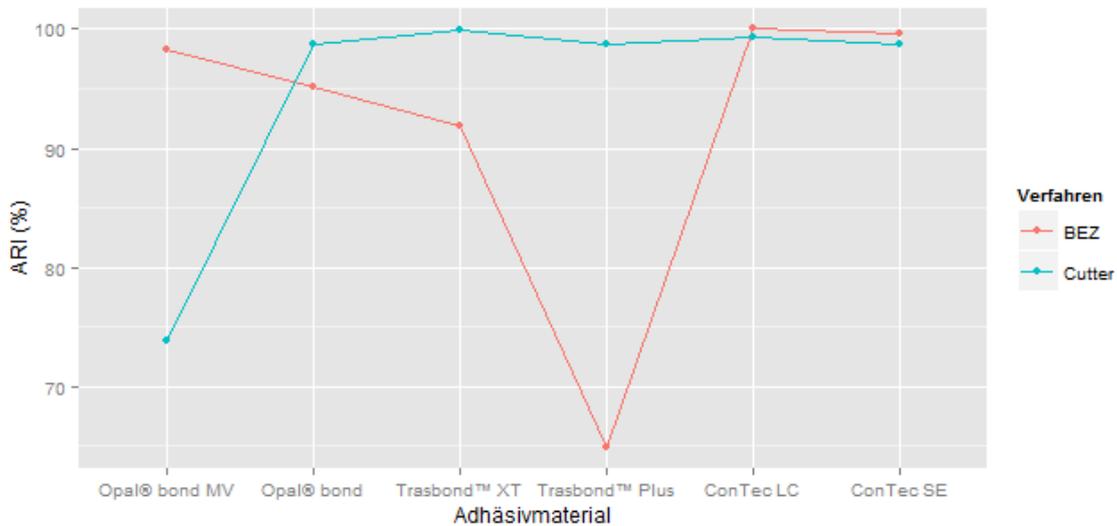


Abb. 33: Interaktionsdiagramm zeigt die Interaktion zwischen BEZ und Cutter.

4.1.3 Statistische Auswertung der Ergebnisse der Bracketenfernungsmethoden

Die Übersicht der multifaktoriellen Varianzanalyse in Tabelle 12 und der Mann-Whitney-Test in Tabelle 13 zeigen signifikante Unterschiede zwischen den angewendeten Adhäsivarten, den Entfernungsmethoden und den einzelnen Proben.

Bei der Varianzanalyse der ARI-Werte innerhalb der Adhäsivarten untereinander konnte kein signifikanter Einfluss (p -Wert = 0,2) des Faktors Adhäsiv zum ARI-Wert festgestellt werden. Bei der Analyse der Bracketenfernungsmethoden untereinander konnte ein signifikanter Einfluss (p -Wert = 0,03) des Faktors und dem ARI-Wert festgestellt werden. Bei der Analyse der Gruppen der einzelnen Verfahren konnte ebenfalls ein signifikanter Einfluss der ARI-Werte gezeigt werden. Um festzustellen, zwischen welchen Bracketenfernungsmethoden innerhalb der einzelnen Gruppen der signifikante Unterschied liegt, wurde ein Mann-Whitney-Test durchgeführt. Beim Vergleich der Entfernungsmethoden untereinander konnte nur bei der Gruppe 1 (Opal® Bond) ein signifikanter Unterschied zu den ARI-Mittelwerten beider Verfahren festgestellt werden.

Tab. 12: Resultat einer multifaktoriellen Varianzanalyse zur Bestimmung des Restadhäsives bei der Bracketentfernung mittels BEZ bzw. Cutter bei den sechs verschiedenen Adhäsiven.

Klassifikation	Levels	Values	
Gruppe	6	Opal Bond MV;Opal Bond;Transbond XT Transbond Plus;ConTec LC;ConTec SE	
Verfahren	2	Bracketentfernungszange; Cutter	
Source	Freiheitsgrad(DF)	F Value	Pr>F
Gruppe	5	1,6	0,2
Verfahren	1	5,1	0,03
Gruppe:	5	2,7	0,04
Verfahren			

In Tabelle 13 sind die Ergebnisse des Mann-Whitney-Tests aufgelistet. Der Vergleich von BEZ mit Cutter zeigt für die Adhäsiv-Gruppe Opal® Bond einen signifikanten Unterschied ($p = 0,05$). Daher hat der Faktor Entfernungsmethode nur zwischen BEZ und Cutter in Gruppe eins einen signifikanten Einfluss. In den anderen Adhäsiv-Gruppen konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen der verwendeten Methoden ($p > ,05$) festgestellt werden.

Tab.13: Ergebnisse des Mann-Whitney-Tests zwischen den Bracketentfernungsmethoden. Es zeigt sich ein signifikanter Unterschied nur bei dem Vergleich BEZ und Cutter in Gruppe eins

Signifikanz p=	Cutter in G1	Cutter in G2	Cutter in G3	Cutter in G4	Cutter in G5	Cutter in G6
	0,05					
BEZ in G2		0,5				
BEZ in G3			0,5			
BEZ in G4				0,2		
BEZ in G5					0,2	
BEZ in G6						0,5

4.2 Versuch 2

4.2.1 Ergebnisse der Adhäsiventfernungsmethoden

In dieser Versuchsreihe wurden zwölf Proben je Gruppe zugeteilt. Alle Proben wurden vor dem Bracketkleben und nach der Adhäsiventfernung profilometrisch untersucht. Durch eine spezielle Mess- und Analysesoftware [FRT GmbH 2006, 2011] wurden die aufgenommenen Bilder analysiert und mehrere Parameter ermittelt. Es besteht die Möglichkeit, mit dieser Software verschiedene Oberflächenkenngrößen zu ermitteln: den Mittenrauheitswert R_a , die maximale Rauheitstiefe, die gemittelte Rauheitstiefe R_z und R_q .

Für die vorliegende Untersuchung war der Mittenrauheitswert R_a (der arithmetische Mittelwert der Beträge aller Profilwerte des Rauheitsprofils) am wichtigsten, da er in der Literatur häufiger verwendet wurde.

Ergebnisse der Oberflächenrauheit vor dem Bracketkleben sowie nach der Adhäsiventfernung

Die gewonnenen Rauheitswerte der untersuchten Proben vor dem Bracketkleben und nach der Adhäsiventfernung sind in Tabellen 14 und 15 aufgelistet.

Differenz zwischen der Oberflächenrauheit vor dem Bracketkleben und nach der Adhäsiventfernung

Nach der Evaluierung von Rauheitswerten R_a vor und nach Bracketentfernung wurde daraus die Rauheitsdifferenz ermittelt. Diese ist in Tabelle 16 aufgelistet.

Tab. 14: Die ermittelten Rauheitswerte Ra für die Proben der Gruppen eins bis sechs vor dem Bracketkleben

Gruppen 1 – 6	Adhäsiventfernungs- verfahren	Rauheit Ra in μm vor dem Bracketkleben		
		Probe 1	Probe 2	Probe 3
G1 Opal Bond MV	Carbidfinierer/100	2,0	1,1	2,3
	Carbidfinierer/30	1,9	1,7	2,1
	Finierdiamant	3,7	4,0	4,5
	Metallfinierer	2,5	2,3	2,5
G2 Opal Bond	Carbidfinierer/100	3,7	2,0	1,9
	Carbidfinierer/30	2,4	1,7	2,7
	Finierdiamant	1,7	1,8	2,3
	Metallfinierer	1,7	1,5	1,3
G3 Transbond XT	Carbidfinierer/100	2,4	2,8	3,1
	Carbidfinierer/30	2,3	2,1	2,2
	Finierdiamant	1,7	1,4	1,7
	Metallfinierer	1,9	1,6	1,7
G4 Transbond Plus	Carbidfinierer/100	2,1	2,2	2,6
	Carbidfinierer/30	1,17	2,0	2,0
	Finierdiamant	2,5	1,9	2,3
	Metallfinierer	2,8	2,3	2,0
G5 ConTec LC	Carbidfinierer/100	3,4	2,3	4,3
	Carbidfinierer/30	1,7	1,7	1,7
	Finierdiamant	4,	2,0	2,3
	Metallfinierer	3,4	2,5	3,3
G6 ConTec SE	Carbidfinierer/100	1,7	2,1	2,0
	Carbidfinierer/30	2,4	3,0	7,3
	Finierdiamant	2,6	2,1	2,6
	Metallfinierer	5,9	4,8	9,5

Tab. 15: Die ermittelten Rauheitswerte Ra für die Proben der Gruppen eins bis sechs nach Adhäsiventfernung

Gruppen 1 – 6	Adhäsiventfernungs- verfahren	Rauheit Ra in μm nach der Adhäsiventfernung		
		Probe 1	Probe 2	Probe 3
G1 Opal Bond MV	Carbidfinierer/100	4,0	18,3	4,3
	Carbidfinierer/30	6,3	2,5	2,1
	Finierdiamant	16,0	9,0	4,0
	Metallfinierer	39,4	13,0	25,7
G2 Opal Bond	Carbidfinierer/100	4,9	2,2	2,5
	Carbidfinierer/30	9,3	8,5	2,9
	Finierdiamant	20,4	4,0	2,6
	Metallfinierer	11,2	3,3	13,1
G3 Transbond XT	Carbidfinierer/100	4,6	5,0	3,0
	Carbidfinierer/30	2,3	4,0	3,2
	Finierdiamant	3,1	3,5	2,5
	Metallfinierer	24,1	7,6	10,0
G4 Transbond Plus	Carbidfinierer/100	7,5	19,9	8,0
	Carbidfinierer/30	11,2	3,0	2,0
	Finierdiamant	5,6	6,5	3,9
	Metallfinierer	17,5	21,9	2,9
G5 ConTec LC	Carbidfinierer/100	12,1	23,5	2,4
	Carbidfinierer/30	17,9	22,8	6,3
	Finierdiamant	4,0	3,0	3,2
	Metallfinierer	26,3	14,2	11,2
G6 ConTec SE	Carbidfinierer/100	2,9	3,8	2,7
	Carbidfinierer/30	3,0	4,1	3,9
	Finierdiamant	6,7	3,9	8,9
	Metallfinierer	6,8	6,2	7,2

Tab. 16: Differenz der Oberflächenrauheit Ra für die Proben der Gruppen eins bis sechs vor Bracketkleben und nach Adhäsiventfernung

Gruppen 1 – 6	Adhäsiventfernungs- verfahren	Differenz der Oberflächenrauheit Ra in μm		
		Probe 1	Probe 2	Probe 3
G1 Opal Bond MV	Carbidfinierer/100	2,0	17,2	2,0
	Carbidfinierer/30	4,4	0,8	0,0
	Finierdiamant	12,2	5,0	0,5
	Metallfinierer	36,9	10,6	23,2
G2 Opal Bond	Carbidfinierer/100	1,2	0,2	0,6
	Carbidfinierer/30	6,9	6,8	0,2
	Finierdiamant	18,7	2,2	0,3
	Metallfinierer	9,5	1,8	11,8
G3 Transbond XT	Carbidfinierer/100	2,2	2,2	0,1
	Carbidfinierer/30	0,1	1,8	1,0
	Finierdiamant	1,3	2,1	0,8
	Metallfinierer	22,4	6,0	8,3
G4 Transbond Plus	Carbidfinierer/100	5,4	17,6	5,5
	Carbidfinierer/30	9,6	1,0	0,5
	Finierdiamant	3,1	4,6	1,6
	Metallfinierer	14,8	19,7	0,8
G5 ConTec LC	Carbidfinierer/100	8,7	21,2	1,9
	Carbidfinierer/30	16,2	21,0	4,6
	Finierdiamant	0,0	1,0	0,9
	Metallfinierer	22,8	11,8	8,0
G6 ConTec SE	Carbidfinierer/100	1,1	1,7	0,7
	Carbidfinierer/30	0,6	1,1	3,3
	Finierdiamant	4,1	1,8	6,3
	Metallfinierer	01,0	1,3	2,2

4.2.2 Auswertung der Ergebnisse der Adhäsiventfernungsmethoden

Um die durch die verwendeten Adhäsiveentfernungsv erfahren entstehende Oberflächenrauheit innerhalb der einzelnen Gruppen miteinander zu vergleichen, wurden Median, Mittelwert, Standardabweichung sowie minimal und maximal ermittelte Werte in Tabelle 17 aufgelistet. Mithilfe von Säulendiagrammen (Abbildung 33) wird im Folgenden ein Vergleich zwischen den verschiedenen Adhäsiv-Entfernungsv erfahren innerhalb eines Adhäsives dargestellt.

Wie in den Abbildungen 34 und 35 zu sehen ist, haben die vier Adhäsiventfernungsv erfahren mit den bearbeiteten Adhäsiven unterschiedlich reagiert. Bei allen Adhäsivmaterialien hat der Metallfinierer außer beim ConTec SE den höchsten Rauheitswert erzeugt. In der Gruppe Opal®bond MV hat das Verfahren Metallfinierer mit 23,6 µm den höchsten Rauheitswert gezeigt, während der Carbidfinierer(30) mit 1,7 µm den geringsten Rauheitswert aufgewiesen hat. Die beiden anderen Verfahren Carbidfinierer(100) und Finierdiamant liegen mit jeweils 7,1 µm und 5,6 µm fast auf ähnlichem Niveau dazwischen. Während beim Opal®bond der Carbidfinierer(100) mit 0,7 µm den geringsten Rauheitswert erreicht hat, hat der Metallfinierer mit 7,7 µm den höchsten Wert gezeigt. Carbidfinierer(30) und Finierdiamant liegen mit 4,6 µm und 7,0 µm dazwischen.

Tab. 17: Deskriptive Statistik zu der Rauheitsdifferenz vor und nach der Bearbeitung mit den verschiedenen Adhäsiventfernungsverfahren.

Gruppen 1 – 6	Adhäsiventfernungs- verfahren	Auswertung der Oberflächenrauheitsdifferenz in μm					
		Mittelwert	Median	SD	Max.	Min.	
G1	Opal Bond MV	Carbidfinierer/100	7,1	2,0	8,8	17,2	2,0
		Carbidfinierer/30	1,7	0,8	2,3	4,4	0,04
		Finierdiamant	5,6	5,0	6,4	12,3	-0,5
		Metallfinierer	23,6	23,2	13,2	37,0	10,6
G2	Opal Bond	Carbidfinierer/100	0,7	0,6	0,5	1,2	0,2
		Carbidfinierer/30	4,6	6,8	3,8	6,8	0,2
		Finierdiamant	7,0	2,2	10,1	18,7	0,2
		Metallfinierer	7,7	9,5	5,2	11,8	1,8
G3	Transbond XT	Carbidfinierer/100	1,4	2,2	1,3	2,2	-0,1
		Carbidfinierer/30	1,0	1,0	0,9	1,8	0,05
		Finierdiamant	1,4	1,3	0,7	2,1	0,8
		Metallfinierer	12,2	8,3	8,9	22,3	6,0
G4	Transbond Plus	Carbidfinierer/100	9,5	5,5	7,1	17,6	5,4
		Carbidfinierer/30	3,7	1,0	5,1	9,6	0,5
		Finierdiamant	3,1	3,1	1,5	4,6	1,6
		Metallfinierer	11,8	14,8	9,8	19,7	0,8
G5	ConTec LC	Carbidfinierer/100	9,4	8,7	11,6	21,2	-1,9
		Carbidfinierer/30	14,0	16,2	8,5	21,1	4,6
		Finierdiamant	0,6	0,9	0,6	1,0	-0,04
		Metallfinierer	14,1	11,8	7,7	22,8	8,0
G6	ConTec SE	Carbidfinierer/100	1,2	1,1	0,5	1,7	0,7
		Carbidfinierer/30	-0,0	0,6	2,5	1,1	-3,4
		Finierdiamant	4,1	4,1	2,3	6,3	1,8
		Metallfinierer	0,0	1,0	2,0	1,3	-2,3

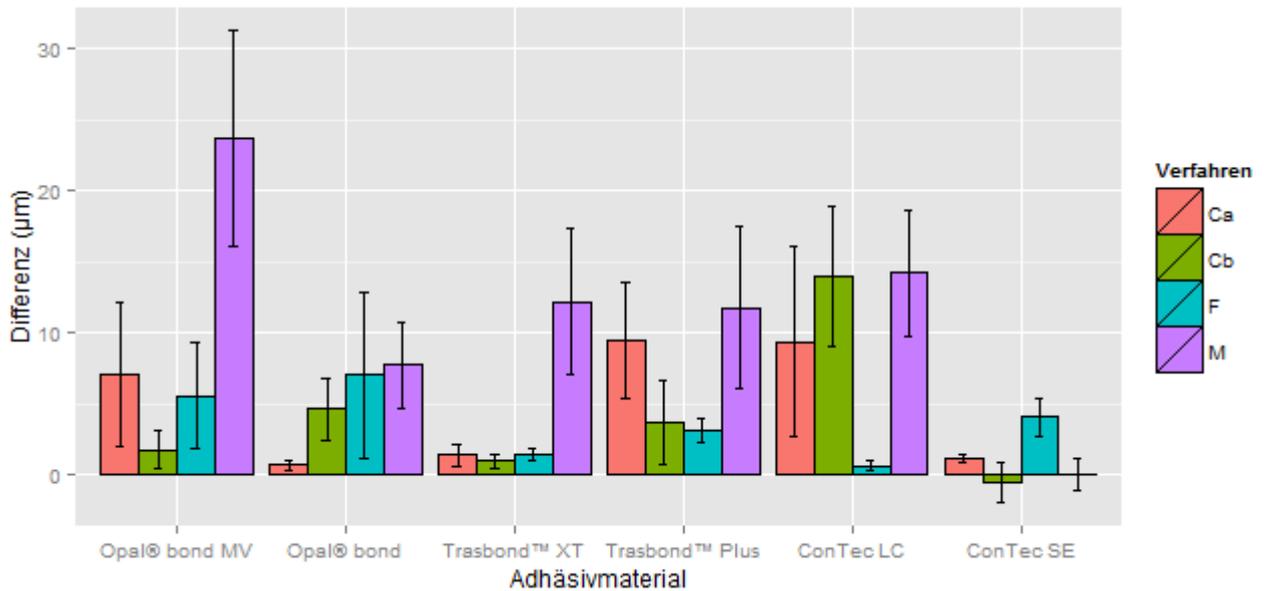


Abb. 34: Gegenüberstellung des Mittelwertes und der Standardabweichung der Rauheitswerte für die vier Adhäsiventfernungsverfahren innerhalb der sechs verwendeten Adhäsive.

In Gruppe Transbond™XT lagen Carbidfinierer(100), Carbidfinierer(30) und Finierdiamant mit jeweils 1,4 µm, 1,0 µm und 1,4 µm auf ähnlichem Niveau. Der Metallfinierer erreichte mit 12,2 µm den höchsten Rauheitswert. Finierdiamant hat beim Adhäsive Transbond™Plus mit 3,1 µm den geringsten Rauheitswert erzeugt. Carbidfinierer(30) und Carbidfinierer(100) haben mit 3,7 µm und 9,5 µm noch höhere Rauheitswerte gezeigt. Der höchste Rauheitswert für dieses Adhäsiv ist beim Metallfinierer aufgetreten. Für das Adhäsiv ConTec LC hat der Finierdiamant mit 0,6 µm deutlich den geringsten Rauheitswert gezeigt. Carbidfinierer(30) und Metallfinierer lieferten mit jeweils 14,0 µm und 14,2 µm die höchsten Rauheitswerte. Beim ConTec SE hat der Metallfinierer mit 0,002 µm einen sehr geringen Rauheitswertunterschied erzeugt. Den höchsten Wert hat der Finierdiamant erzeugt. Der Carbidfinierer(30) hat mit -0,5 µm einen negativen Rauheitswert gezeigt, d. h., der gemessene Rauheitswert nach der Adhäsiventfernung war geringer als vorher. Jedoch war der Unterschied der Ausgangsmessung deutlich höher als beim Metallfinierer.

Abbildung 35 zeigt die Interaktion zwischen den vier untersuchten Adhäsiventfernungsverfahren. Der Metallfinierer zeigt einen höheren

Rauheitswertverlauf entlang der verwendeten Adhäsive. Alle anderen Verfahren zeigen mehr oder weniger einen ähnlichen Verlauf.

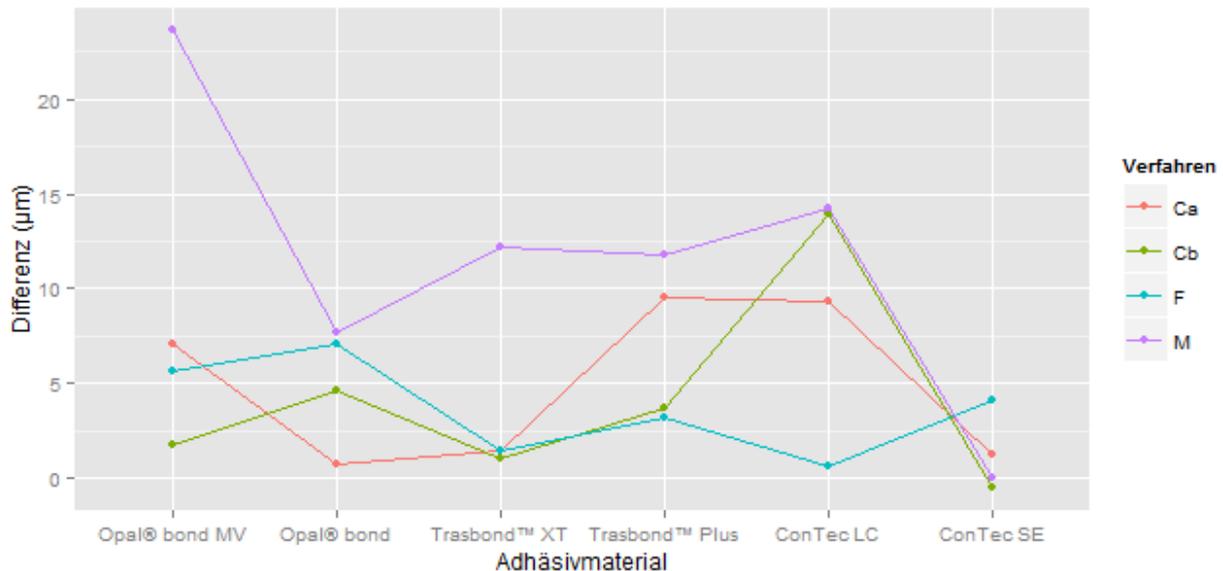


Abb. 35: Interaktionsdiagramm zeigt den Verlauf der verschiedenen Verfahrenskurven in Bezug auf die Oberflächenrauheit bei den Adhäsivgruppen eins bis sechs.

4.2.3 Statistische Auswertung der Ergebnisse der Adhäsiventfernungsmethoden

Die zweifaktorielle Varianzanalyse (ANOVA) in Tabelle 18 und der Mann-Whitney-Tests in Tabelle 19 zeigen signifikante Unterschiede zwischen der verwendeten Adhäsivartmaterialien, den Adhäsiventfernungsverfahren und den einzelnen Proben in Bezug auf den Rauheitswert. Bei der Varianzanalyse der Oberflächenrauheit zwischen den sechs Adhäsiven untereinander konnte ein signifikanter Einfluss (p -Wert = 0,003) des Faktors Adhäsiv auf den Rauheitswert festgestellt werden. Bei der Analyse der vier Adhäsiventfernungsverfahren untereinander war ein signifikanter Einfluss (p -Wert = 0,004) im Bezug auf das jeweilige Verfahren und dem Rauheitswert zu erkennen. Bei der Analyse der Gruppen und den jeweiligen Verfahren konnte jedoch kein signifikanter Einfluss auf die Rauheitswerte festgestellt werden. Daher hat der Faktor Gruppen gegen Verfahren keinen Einfluss auf die Ergebnisse.

Tab. 18: Resultat einer multifaktoriellen Varianzanalyse zur Bestimmung des Rauheitswertes für die vier Adhäsiventfernungsverfahren bei den sechs verschiedenen Adhäsiven.

Klassifikation	Levels	Values	
Gruppe	6	Opal Bond MV; Opal Bond; Transbond XT Transbond Plus; ConTec LC; ConTec SE	
Verfahren	4	Cabidfinierer/100; Cabidfinierer/30 Finiererdiamant; Metallfinierer	
Source	Freiheitsgrad (DF)	F Value	Pr>F
Gruppe	5	4,1	0,003
Verfahren	3	5,1	0,003
Gruppe: Verfahren	15	1,8	0,05

Der Mann-Whitney-Test wurde durchgeführt, um festzustellen, zwischen welchen der Adhäsiventfernungsverfahren ein signifikanter Unterschied liegt (Tabelle 19). Beim Vergleich der vier Verfahren untereinander konnte bei Gruppe 1 (Opal® Bond MV) nur bei der Kombination Carbidgefinierer(30) und Metallfinierer ein signifikanter Unterschied zum Rauheitswert festgestellt werden. Der Vergleich zwischen Carbidgefinierer(100) mit Metallfinierer zeigt mit $p = 0,05$ bei Gruppe Opal®bond einen signifikanten Unterschied. Alle anderen getesteten Verfahren innerhalb dieser Gruppe zeigen keine signifikanten Unterschiede untereinander ($p > ,05$). Daher hat der Faktor Verfahren für Opal®bond nur zwischen Carbidgefinierer(100) und Metallfinierer einen signifikanten Einfluss. Bei der Gruppe Transbond™XT zeigt der Metallfinierer jeweils zu Carbidgefinierer(100), Carbidgefinierer(30) und Finiererdiamant mit $p = 0,05$ einen signifikanten Unterschied. Alle anderen Kombinationsverfahren haben keinen signifikanten Unterschied.

Beim Transbond™Plus weist nur die Kombination Carbidgefinierer(100) mit Finiererdiamant einen signifikanten Unterschied auf. Alle anderen Kombinationen innerhalb dieser Gruppe zeigen keine signifikanten Unterschiede untereinander ($p > ,05$).

Nur die Kombinationen Carbidgefinierer(30) mit Finiererdiamant und Finiererdiamant mit Metallfinierer unterschieden sich beim ConTec LC signifikant. Bei der Gruppe ConTec SE haben mit $p = 0,05$ die Kombinationsverfahren Carbidgefinierer(100) mit Finiererdiamant,

Carbidfinierer(30) mit Finierdiamant und Finierdiamant mit Metallfinierer signifikante Unterschiede aufgewiesen.

Tab.19: Ergebnisse des Mann-Whitney-Tests zwischen den untersuchten Adhäsiventfernungsverfahren.

Signifi.		G1				G2				G3								
P =		Ca	Cb	F	M	Ca	Cb	F	M	Ca	Cb	F	M					
G1	Ca		0,2	0,5	0,1	G2	Ca		0,2	0,2	0,05	G3	Ca		0,35	0,35	0,05	
	Cb			0,35	0,05		Cb			0,5	0,2		Cb			0,35	0,05	
	F				0,1		F				0,5		F					0,05
	M						M						M					
		G4				G5				G6								
G4		Ca	Cb	F	M	G5		Ca	Cb	F	M	G6		Ca	Cb	F	M	
	Ca		0,2	0,05	0,5		Ca		0,5	0,35	0,35		Ca		0,1	0,05	0,35	
	Cb			0,35	0,2		Cb			0,05	0,5		Cb			0,05	0,35	
	F				0,35		F				0,05		F					0,05
	M						M						M					

4.2.4 Evaluation der Zeit

4.2.4.1 Auswertung der Ergebnisse der verschiedenen Adhäsiventfernungsverfahren in Bezug auf die benötigte Zeit

Für diese zweite Versuchsreihe wurde für vier Verfahren bei den Gruppen eins bis sechs die benötigte Zeit gemessen. Dabei wurden Anfang und Ende der Oberflächenbearbeitung notiert.

Um die Bearbeitungsdauer der untersuchten Adhäsiventfernungsverfahren für die einzelnen Gruppen miteinander zu vergleichen, wurden der Median, der Mittelwert, die Standardabweichung, sowie die minimal und maximal ermittelten Werte in Tabelle 20 aufgelistet. Mithilfe von Säulendiagrammen (Abbildung 35) wird im Folgenden ein

Vergleich zwischen den verschiedenen Adhäsiventfernungsverfahren in Bezug auf die Bearbeitungsdauer innerhalb eines Adhäsivs dargestellt.

Tab.20: Deskriptive Statistik zu der Bearbeitungsdauer der untersuchten Adhäsiventfernungsverfahren.

Gruppen 1 – 6		Adhäsiventfernungs- verfahren	Auswertung der verbrachter Zeit in Sek.				
			Mittelwert	Median	SD	Max.	Min.
G1	Opal Bond MV	Carbidfinierer/100	25,8	22,0	8,9	36,0	19,4
		Carbidfinierer/30	39,6	39,0	1,1	40,9	38,9
		Finierdiamant	65,9	64,9	6,0	72,4	60,6
		Metallfinierer	32,7	31,5	2,9	36,0	30,6
G2	Opal Bond	Carbidfinierer/100	28,9	29,2	2,4	31,0	26,4
		Carbidfinierer/30	31,8	28,0	10,9	44,1	23,3
		Finierdiamant	39,7	36,9	8,1	48,8	33,4
		Metallfinierer	20,7	19,8	4,1	25,2	17,2
G3	Transbond XT	Carbidfinierer/100	21,3	21,0	2,2	23,7	19,3
		Carbidfinierer/30	30,2	28,6	5,9	36,8	25,3
		Finierdiamant	36,3	32,5	9,9	47,6	28,9
		Metallfinierer	67,6	61,8	15,3	85,0	56,0
G4	Transbond Plus	Carbidfinierer/100	23,1	23,0	1,4	24,6	21,8
		Carbidfinierer/30	27,0	25,5	2,6	23,0	25,5
		Finierdiamant	34,0	34,0	0,6	34,7	33,4
		Metallfinierer	69,0	70,0	11,9	80,4	56,6
G5	ConTec LC	Carbidfinierer/100	27,5	26,8	3,5	31,3	24,4
		Carbidfinierer/30	30,9	31,0	2,8	33,6	28,1
		Finierdiamant	58,7	60,3	7,6	65,5	50,5
		Metallfinierer	22,4	23,2	3,1	25,0	19,0
G6	ConTec SE	Carbidfinierer/100	22,4	22,1	4,1	26,6	18,5
		Carbidfinierer/30	23,3	25,5	5,0	26,9	17,6
		Finierdiamant	30,1	26,1	10,5	42,0	22,2
		Metallfinierer	20,3	19,9	1,4	21,8	19,1

Die Abbildungen 36 und 37 zeigen, dass die untersuchten Adhäsiventfernungsverfahren bei den verschiedenen Adhäsivgruppen unterschiedliche Bearbeitungsdauer brauchen. Für alle Adhäsivmaterialien hat die Oberflächenbearbeitung mit Finierdiamant mit Ausnahme der Gruppen Transbond™XT und Transbond™Plus am längsten gedauert. Bei der eben genannten Adhäsivgruppe hat das Bearbeiten mit Metallfinierer am längsten gedauert. Die kürzeste Bearbeitungszeit wurde in den Adhäsivgruppen Opal®bond MV, Transbond™XT und Transbond™Plus durch die Bearbeitung mit Carbidgefinierer(100) erreicht. In den übrigen Gruppen Opal®bond, ConTec LC und ConTec SE hat die Bearbeitung durch Metallfinierer mit jeweils 20,7 s 22,4 s und 20,3 s am wenigsten Zeit gebraucht.

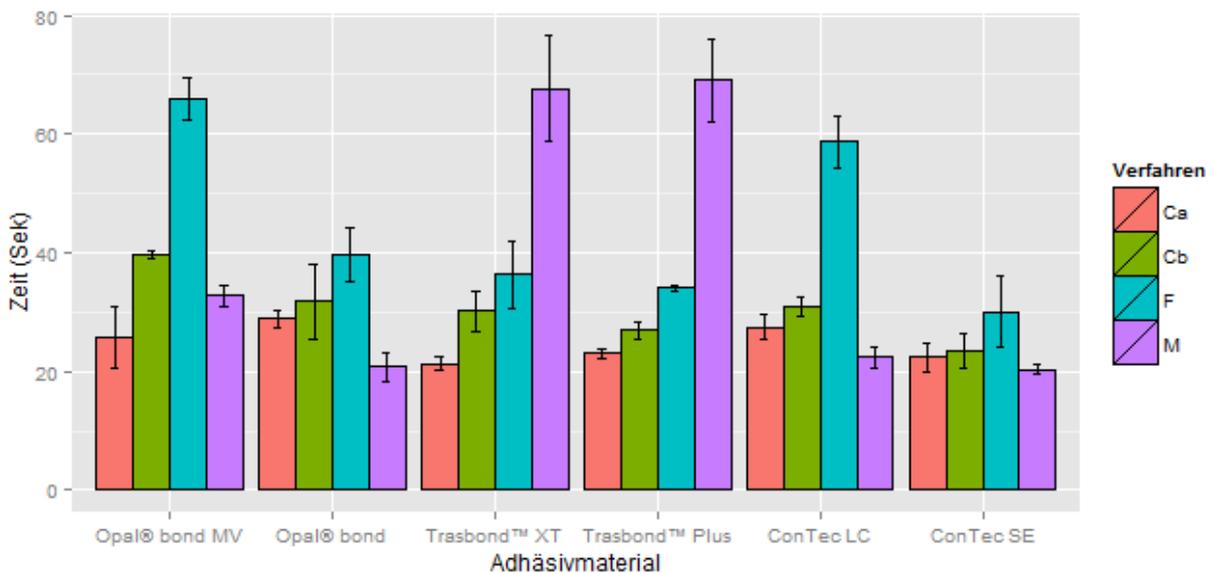


Abb.36: Gegenüberstellung des Mittelwertes und der Standardabweichung der Bearbeitungszeiten für die vier Adhäsiventfernungsverfahren innerhalb der sechs verwendeten Adhäsive.

Das Interaktionsdiagramm in der folgenden Abbildung zeigt das Verhalten zwischen den untersuchten Verfahren bezüglich der Bearbeitungszeit. Es zeigt, dass Carbidgefinierer(100) und Carbidgefinierer(30) sich im unteren Bereich bewegen und in Bezug auf die Bearbeitungsdauer einen ähnlichen Verlauf haben. Der Finierdiamant bewegt sich leicht im höheren Bereich, insbesondere bei den Adhäsivmaterialien Opal®bond MV und ConTec LC. Demgegenüber nimmt das Verfahren mit Metallfinierer einen anderen Verlauf, wobei die Bearbeitungszeit bei den Adhäsivgruppen Transbond™XT und Transbond™Plus am höchsten war.

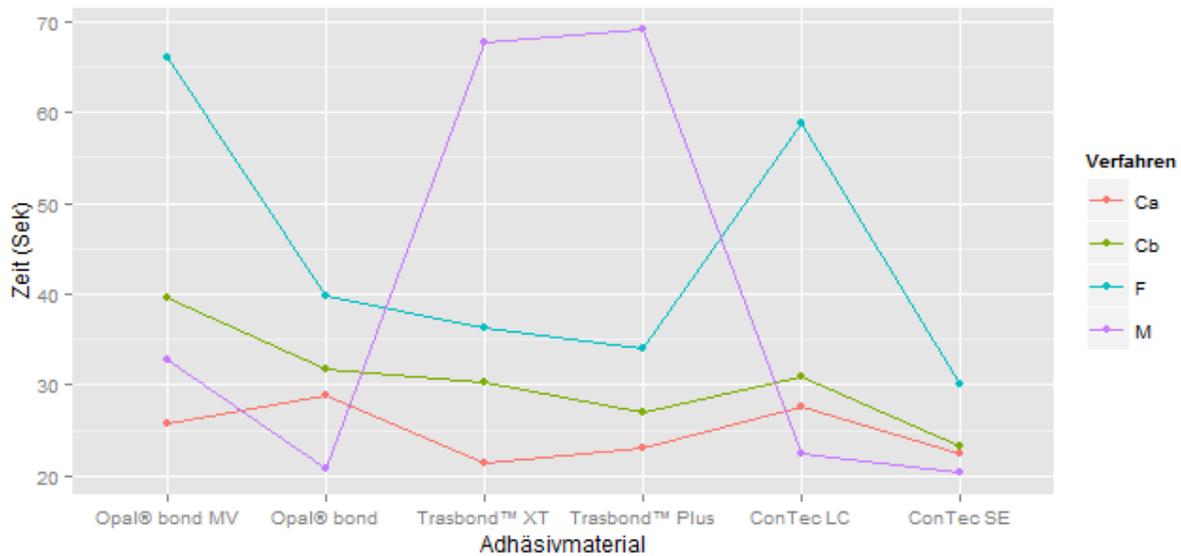


Abb.37: Interaktionsdiagramm zeigt den Verlauf der verschiedenen Verfahrenskurven in Bezug auf die Bearbeitungszeit bei den Adhäsivgruppen 1 bis 6.

4.2.4.2 Statistische Auswertung der Adhäsiventfernungsmethoden in Bezug auf die benötigte Zeit

Die zweifaktorielle Varianzanalyse (ANOVA) in Tabelle 21 und der Mann-Whitney-Test in Tabelle 22 zeigen signifikante Unterschiede zwischen den verwendeten Adhäsivmaterialien, den Adhäsiventfernungsverfahren und den einzelnen Proben in Bezug auf die Bearbeitungsdauer.

Bei der Varianzanalyse der Bearbeitungszeit für die sechs verwendeten Adhäsive konnte ein hoch signifikanter Einfluss (p -Wert = 0,0000005) des Faktors Adhäsiv auf die Bearbeitungsdauer festgestellt werden. Bei der Analyse der vier Adhäsiventfernungsverfahren untereinander konnte ein signifikanter Einfluss (p -Wert = 7,48E-13) des Faktors Verfahren auf die Bearbeitungsdauer festgestellt werden. Bei der Analyse der Gruppen gegenüber den Verfahren konnte auch mit $p = 1,86E-13$ ein signifikanter Einfluss auf die Bearbeitungsdauer festgestellt werden. Daher hat der Faktor Gruppen gegen Verfahren auch einen Einfluss auf die Ergebnisse (Tabelle 21).

Tab.21: Resultat einer multifaktoriellen Varianzanalyse zur Bestimmung der Bearbeitungszeit für die vier Adhäsiventfernungsverfahren bei den sechs verschiedenen Adhäsiven.

Klassifikation	Levels	Values	
Gruppe	6	Opal Bond MV; Opal Bond; Transbond XT Transbond Plus; ConTec LC; ConTec SE	
Verfahren	4	Cabidfinierer/100; Cabidfinierer/30 Finiererdiamant; Metallfinierer	
Source	Freiheitsgrad (DF)	F Value	Pr>F
Gruppe	5	10,8	0,0000005
Verfahren	3	38,6	7,48E-13
Gruppe: Verfahren	15	15,4	1,86E-13

Um festzustellen zwischen welchen der Adhäsiventfernungsverfahren innerhalb der einzelnen Gruppen ein signifikanter Unterschied liegt, wurde der Mann-Whitney-Test durchgeführt (Abbildung 22). Beim Vergleich der vier Verfahren untereinander waren bei der Gruppe Opal® Bond MV alle Bohrer signifikant, außer zwischen dem Carbidfinierer(100) und dem Metallfinierer. Es wurde kein signifikanter Unterschied zu der Bearbeitungsdauer festgestellt. Bei der Gruppe Opal®bond zeigen der Carbidfinierer(100) mit jeweils Finierdiamant und Metallfinierer, sowie der Metallfinierer und der Finierdiamant einen signifikanten Unterschied. Alle getesteten Verfahren in der Gruppe Transbond™XT zeigten signifikante Unterschiede untereinander ($p < ,05$), außer zwischen Carbidfinierer und Finierdiamat war $p > ,05$ nicht signifikant. Bei der Gruppe Transbond™Plus zeigten alle Verfahren signifikante Unterschiede. Bei ConTec LC wiesen alle Verfahren mit Ausnahme der Kombinationen Carbidfinierer(100) mit jeweils Carbidfinierer(30) und Metallfinierer signifikante Unterschiede auf. Nur die Kombinationen Finierdiamant mit Metallfinierer bei der Gruppe ConTec SE konnten einen signifikanten Unterschied zeigen.

Tab.22: Ergebnisse des Mann-Whitney-Tests zwischen den untersuchten Adhäsiventfernungsverfahren in Bezug auf die Bearbeitungsdauer.

Signifi.		G1				G2				G3							
P =		Ca	Cb	F	M	Ca	Cb	F	M	Ca	Cb	F	M				
G1	Ca		0,05	0,05	0,2	G2	Ca		0,5	0,05	0,05	G3	Ca		0,05	0,05	0,05
	Cb			0,05	0,05		Cb			0,2	0,1		Cb			0,2	0,05
	F				0,05		F				0,05		F				0,05
	M						M						M				
		G4				G5				G6							
G4		Ca	Cb	F	M	G5		Ca	Cb	F	M	G6		Ca	Cb	F	M
	Ca		0,05	0,05	0,05		Ca		0,2	0,05	0,1		Ca		0,5	0,2	0,35
	Cb			0,05	0,05		Cb			0,05	0,05		Cb			0,35	0,35
	F				0,05		F				0,05		F				0,05
	M						M						M				

4.3 Versuch 3

In dieser Versuchsreihe wurden sechs Proben je Gruppe zugeteilt. Jede Probe wurde jeweils vor dem Polieren und nach dem Polieren profilometrisch untersucht. Durch die in Versuch zwei schon erwähnte Mess- und Analysesoftware der Firma FRT wurden die aufgenommenen Bilder analysiert und mehrere Parameter ermittelt.

Der Mittenrauheitswert Ra wurde für alle Proben vor und nach dem Polieren notiert. Die Differenz wurde anschließend ermittelt. Alle gemessenen Rauheitswerte sind in tabellarischer Form im Anhang aufgelistet.

4.3.1 Auswertung der Ergebnisse der Polierverfahren

Um die gemessenen Oberflächenrauheitswerten miteinander zu vergleichen, wurden wie in Versuch zwei Median, Mittelwert, Standardabweichung, sowie minimale und maximale Werte ermittelt. Diese Werte sind in Tabelle 23 aufgelistet. Mithilfe von Säulendiagrammen 38 wird im Folgenden ein Vergleich zwischen den verschiedenen Polierverfahren innerhalb eines Adhäsivs dargestellt.

Tab. 23: Deskriptive Statistik zu der Rauheitsdifferenz (Rauheitswert vor und nach der Politur) für die verschiedenen Polierverfahren innerhalb der Adhäsivgruppen eins bis sechs.

Gruppen 1 – 6	Adhäsiventfernungs- verfahren	Auswertung der verbrachten Zeit in Sek.				
		Mittelwert	Median	SD	Max.	Min.
G1 Opal® Bond MV	Universalpolierer	21,0	16,2	8,8	31,2	15,7
	Nylonbürste	6,2	6,9	5,9	11,6	-0,1
G2 Opa® Bond	Universalpolierer	23,1	18,4	11,5	36,3	14,7
	Nylonbürste	7,5	2,2	12,3	21,6	-1,2
G3 Transbond™XT	Universalpolierer	10,5	12,3	8,3	17,7	1,4
	Nylonbürste	1,6	1,2	0,8	2,5	1,0
G4 Transbond™Plus	Universalpolierer	29,7	32,5	16,6	44,7	11,9
	Nylonbürste	9,1	11,6	6,4	13,9	1,8
G5 ConTec LC	Universalpolierer	32,1	29,4	11,1	44,3	22,5
	Nylonbürste	2,8	4,1	3,8	5,1	-0,6
G6 ConTec SE	Universalpolierer	15,1	15,5	11,0	25,9	3,9
	Nylonbürste	4,1	3,8	4,3	8,6	-0,1

Wie in den Abbildungen 38 und 39 zu sehen ist, haben die zwei Polierverfahren mit den verschiedenen Adhäsivmaterialien unterschiedlich reagiert. In allen Adhäsivgruppen waren die gemessenen Rauheitswerte beim Polieren mit dem Universalpolierinstrument höher als beim Polieren mit der Nylonbürste.

Während der Universalpolierer beim Adhäsiv ConTec LC mit 32,1 µm den höchsten Wert erreicht hat, hat er beim Transbond™XT mit 10,4 µm den geringsten Rauheitswert erzeugt. In der Gesamtheit hat die Nylonbürste die geringste Rauheit erzeugt. Den höchsten Rauheitswert hat sie mit 9,1 µm bei Transbond™Plus erreicht.

Bei allen anderen Adhäsiven hat das Polieren mit der Nylonbürste geringere Werte erreicht und bei Transbond™XT hat sie die geringste Rauheit erzeugt.

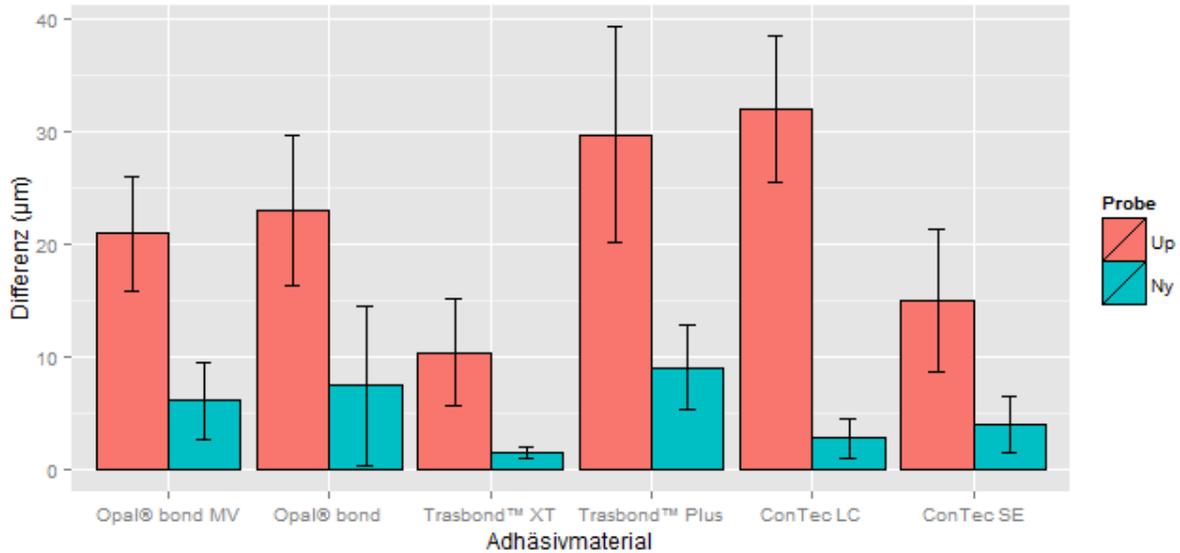


Abb.38: Gegenüberstellung des Mittelwertes und der Standardabweichung der Rauheitswerte für die zwei Polierverfahren innerhalb der sechs verwendeten Adhäsive.

Abbildung 38 verdeutlicht die Interaktion zwischen beiden Polierinstrumenten innerhalb der verschiedenen Adhäsivgruppen. Diese zeigt einen fast ähnlichen zackigen Verlauf der beiden Instrumente, jedoch für Universalpolierer im höheren Rauheitsbereich.

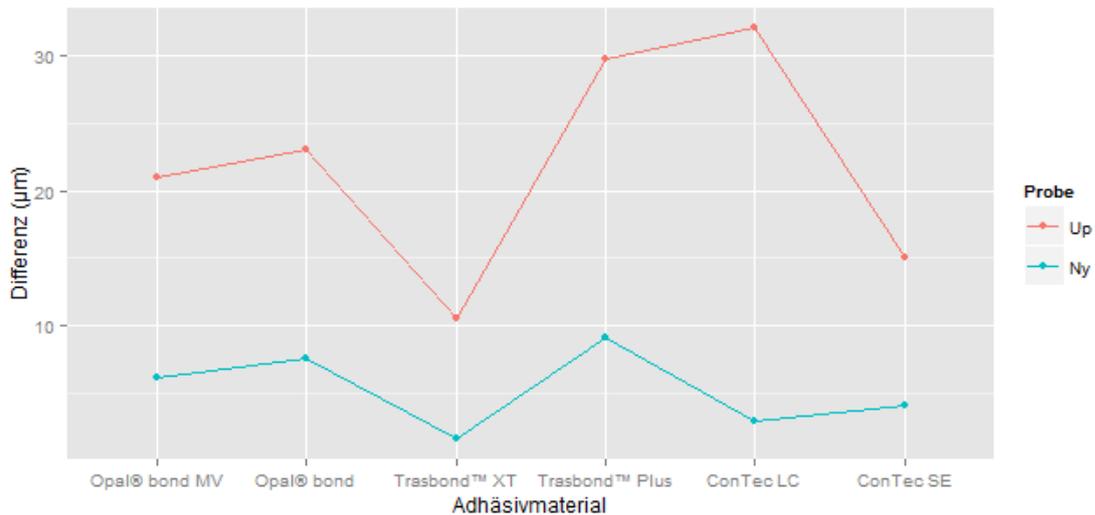


Abb. 39: Das Interaktionsdiagramm zeigt die Interaktion zwischen Universalpolierer (Up) und Nylonbürste (Ny) bei den Adhäsiven eins bis sechs.

4.3.2 Statistische Auswertung der Ergebnisse der Polierverfahren

Die zweifaktorielle Varianzanalyse (ANOVA) in Tabelle 24 und der Mann-Whitney-Test in Tabelle 25 zeigen signifikante Unterschiede zwischen den angewendeten Adhäsivmaterialien, dem Polierverfahren und den einzelnen Proben.

Bei der Varianzanalyse der Rauheitswerte innerhalb der sechs Adhäsive konnte ein signifikanter Einfluss (p-Wert = 5,22E-07) des Faktors Adhäsiv auf den Rauheitswert festgestellt werden. Bei der Analyse der Polierverfahren zeigte sich ein signifikanter Einfluss (p-Wert = 7,48E-13) des Faktors Verfahren auf den Rauheitswert. Im Rahmen der Analyse der Gruppen gegen die Verfahren konnte ebenso ein signifikanter Einfluss (p-Wert = 1,86E-13) auf die Rauheitswerte nachgewiesen werden. Daher hat der Faktor Gruppen gegen Verfahren auch einen Einfluss auf die Ergebnisse.

Tab. 24: Resultat einer zweifaktoriellen Varianzanalyse zur Bestimmung des Rauheitswertes bei der Politur mittels Universalpolierer und Nylonbürste.

Klassifikation	Levels	Values
Gruppe	6	Opal Bond MV; Opal Bond; Transbond XT Transbond Plus; ConTec LC; ConTec SE
Verfahren	2	Universalpolierer; Nylonbürste

Source	Freiheitsgrad (DF)	F Value	Pr>F
Gruppe	5	10,8	5,22E-07
Verfahren	3	38,6	7,48E-13
Gruppe: Verfahren	15	15,4	1,86E-13

Um festzustellen zwischen welchen der Polierverfahren innerhalb der einzelnen Gruppen der signifikante Unterschied liegt, wurde ein Mann-Whitney-Test durchgeführt (Tabelle 25).

Beim Vergleich der zwei Verfahren untereinander konnte bei den Gruppen Opal® Bond MV und Gruppe ConTec LC durch die Kombinationen Universalpolierer und Nylonbürste ein signifikanter Unterschied zu den Rauheitswerten festgestellt werden. In den anderen Adhäsivgruppen waren keine signifikanten Unterschiede zwischen den verwendeten Verfahren ($p > ,05$) erkennbar.

Tab. 25: Ergebnisse des Mann-Whitney-Tests zwischen den Polierverfahren innerhalb der Adhäsivgruppen eins bis sechs.

Signifikanz p = (Rauheit)	Nylonb. in G1	Nylonb. in G2	Nylonb. In G3	Nylonb. in G4	Nylonb. in G5	Nylonb. in G6
Uni.polierer in G1	0,05					
Uni.polierer in G2		0,2				
Uni.polierer in G3			0,1			
Uni.polierer in G4				0,1		
Uni.polierer in G5					0,05	
Uni.polierer in G6						0,1

4.3.3 Zeitevaluierung

Für diese dritte Versuchsreihe wurde für die zwei untersuchten Polierverfahren die benötigte Zeit gemessen. Dabei wurde die Zeit am Anfang und am Ende der Oberflächenpolitur notiert. Alle Tabellen mit den benötigten Zeiten für sämtliche Proben sind im Anhang aufgelistet.

4.3.3.1 Auswertung der Ergebnisse verschiedener Poliermethoden in Bezug auf die benötigte Zeit

Um die Bearbeitungsdauer der untersuchten Polierverfahren innerhalb der Adhäsivgruppen miteinander zu vergleichen, wurden auch hier Median, Mittelwert, Standardabweichung, minimale und maximale Werte ermittelt. Mithilfe der entsprechenden Säulendiagramme (Abbildung 41) wird im Folgenden ein Vergleich zwischen den verschiedenen Polierverfahren in Bezug auf die benötigte Zeit innerhalb eines Adhäsivs dargestellt.

Tab. 26: Deskriptive Statistik für die zwei Polierverfahren bezüglich der benötigten Zeit innerhalb der Adhäsive eins bis sechs.

Gruppen 1 – 6	Adhäsiventfernungs verfahren	Auswertung der verbrachten Zeit in Sek.				
		Mittelwert	Median	SD	Max.	Min.
G1 Opal Bond MV	Universalpolierer	14,3	14,1	0,7	15,2	13,7
	Nylonbürste	16,3	15,8	1,1	17,6	15,6
G2 Opal Bond	Universalpolierer	14,3	14,4	0,4	14,0	13,9
	Nylonbürste	13,0	13,3	0,9	13,7	12,0
G3 Transbond XT	Universalpolierer	12,3	12,3	0,3	12,7	12,0
	Nylonbürste	13,7	13,5	0,3	14,1	13,4
G4 Transbond Plus	Universalpolierer	16,5	15,3	3,1	20,1	14,2
	Nylonbürste	12,8	12,6	0,4	13,3	12,4
G5 ConTec LC	Universalpolierer	14,9	15,1	1,7	16,5	13,1
	Nylonbürste	15,4	15,9	1,0	16,0	14,3
G6 ConTec SE	Universalpolierer	11,6	11,5	0,4	12,0	11,3
	Nylonbürste	10,5	10,2	0,8	11,4	10,0

Wie in den Abbildungen 40 und 41 zu sehen ist, lassen sich die verschiedenen Adhäsivmaterialien durch die zwei Polierverfahren in Bezug auf die Zeit unterschiedlich bearbeiten. Bei der Hälfte der Adhäsivgruppen, sprich Opal®bond, Transbond™Plus und ConTec SE, hat das Polieren der Proben mit dem Universalpolierinstrument länger als mit der Nylonbürste gedauert. Dafür hat das Polieren mit der Nylonbürste bei der anderen Hälfte länger gedauert. Innerhalb alle Gruppen hat das Polieren der Proben mit dem Universalpolierer beim Transbond™Plus mit 16,5 s am längsten gedauert, während das Polieren mit der Nylonbürste beim ConTec SE mit 10,5 s die kürzeste Zeit erforderte.

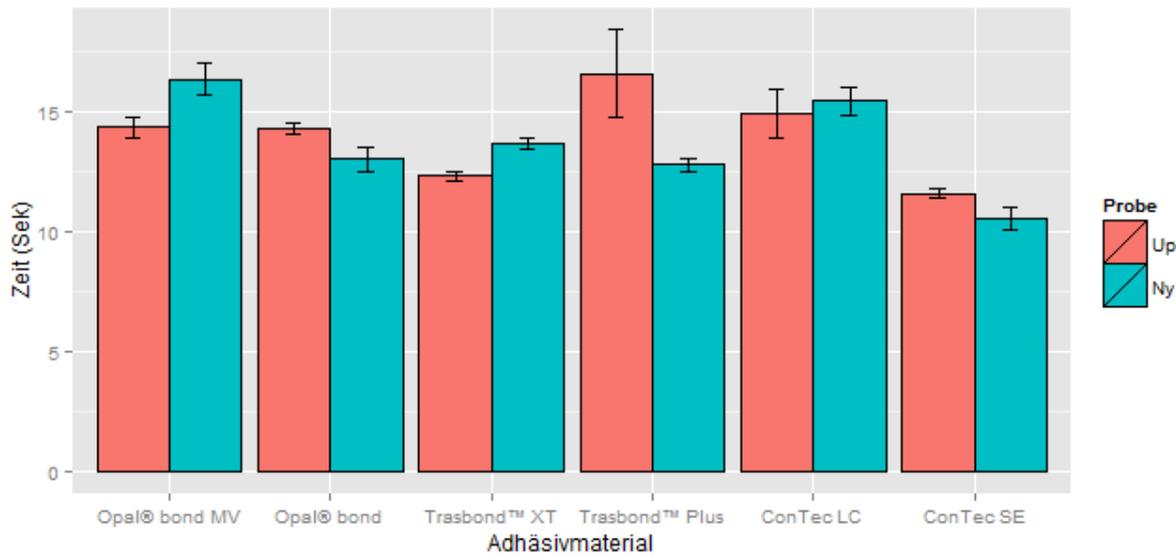


Abb. 40: Gegenüberstellung des Mittelwertes und Standardabweichung der benötigten Zeit beim Polieren mit Universalpolierer (Up) und Nylonbürste (Ny).

Abbildung 40 zeigt die Interaktion zwischen den beiden Polierverfahren innerhalb der verschiedenen Adhäsivgruppen.

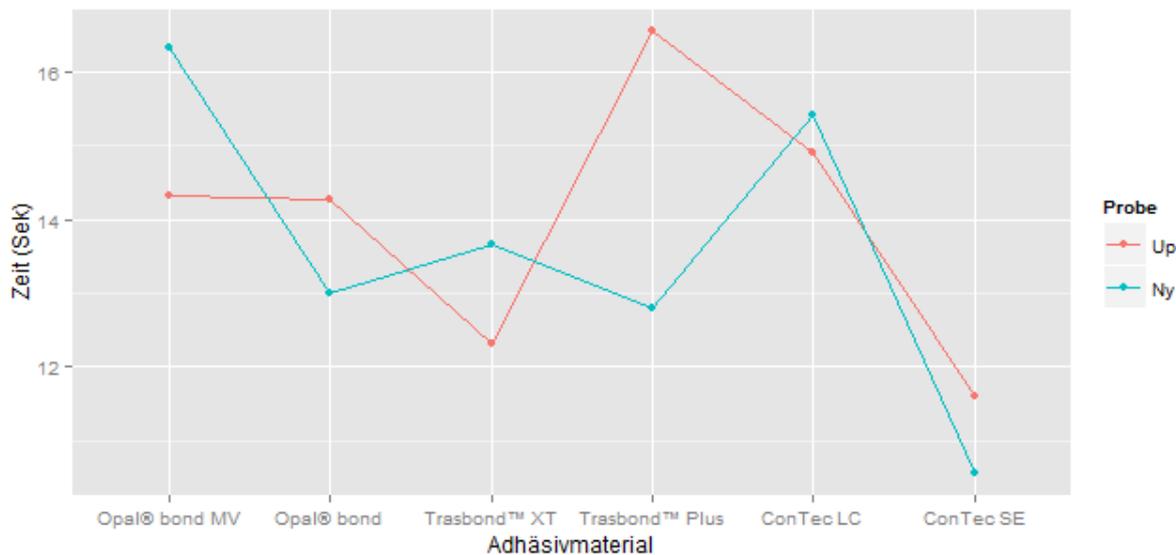


Abb. 41: Interaktionsdiagramm zeigt die Interaktion zwischen den zwei untersuchten Polierverfahren Universalpolierer (Up) und Nylonbürste (Ny) bei den Adhäsiven eins bis sechs.

4.3.3.2 Statistische Auswertung der verschiedenen Poliermethoden in Bezug auf die benötigte Zeit

Die zweifaktoriellen Varianzanalyse (ANOVA) in Tabelle 27 und der Mann-Whitney-Test in Tabelle 28 zeigen signifikante Unterschiede zwischen den angewendeten Adhäsivmaterialien und dem Polierverfahren, jedoch keine für die Kombination Gruppe und Verfahren.

Bei der Varianzanalyse der Bearbeitungsdauer innerhalb der sechs Adhäsive konnte ein signifikanter Einfluss (p -Wert = 0,003) des Faktors Adhäsiv auf der Bearbeitungsdauer festgestellt werden. Bei der Analyse der Polierverfahren untereinander hat sich ebenso ein signifikanter Einfluss (p -Wert = 0,004) des Faktors Verfahren auf die Bearbeitungsdauer gezeigt. Bei der Analyse der Gruppen gegen die Verfahren konnte jedoch kein signifikanter Einfluss (p -Wert = 0,06) auf die Bearbeitungsdauer festgestellt werden. Daher hat der Faktor Gruppen gegenüber Verfahren keinen Einfluss auf die Ergebnisse.

Tab. 27: Resultat einer zweifaktoriellen Varianzanalyse zur Bestimmung der Bearbeitungsdauer bei Politur jeweils mit Universalpolierer und Nylonbürste.

Klassifikation	Levels	Values
Gruppe	6	Opal Bond MV; Opal Bond; Transbond XT Transbond Plus; ConTec LC; ConTec SE
Verfahren	2	Universalpolierer; Nylonbürste

Source	Freiheitsgrad (DF)	F Value	Pr>F
Gruppe	5	4,1	0,003
Verfahren	3	5,1	0,004
Gruppe: Verfahren	15	1,8	0,06

Um festzustellen zwischen welchen der Polierverfahren innerhalb der einzelnen Gruppen ein signifikanter Unterschied liegt, wurde ein Mann-Whitney-Test durchgeführt (Tabelle 28). Beim Vergleich der zwei Verfahren untereinander konnte bei den Gruppen Opal® Bond MV, Opal® bond, Transbond™XT und Transbond™Plus ein signifikanter Unterschied zu der Bearbeitungsdauer festgestellt werden.

In den anderen Adhäsivgruppen, ConTec LC und ConTec SE war kein signifikanter Unterschied zwischen den verwendeten Verfahren ($p > ,05$) ersichtlich.

Tab. 28: Ergebnisse des Mann-Whitney-Tests zwischen den Polierverfahren in Bezug auf die Bearbeitungsdauer innerhalb der Adhäsivgruppen eins bis sechs.

Signifikanz $p =(\text{Zeit})$	Nylonb. in G1	Nylonb. in G2	Nylonb. In G3	Nylonb. in G4	Nylonb. in G5	Nylonb. in G6
Uni.polierer in G1	0,05					
Uni.polierer in G2		0,05				
Uni.polierer in G3			0,05			
Uni.polierer in G4				0,05		
Uni.polierer in G5					0,5	
Uni.polierer in G6						0,1

4.4 Qualitative Oberflächenevaluierung

Die Oberflächenqualität der Zahnproben nach Anwendung der vier unterschiedlichen Adhäsiventfernungsverfahren bzw. Polierverfahren stellte sich am Beispiel der Gruppe Transbond™XT auf den rasterelektroenmikroskopischen Aufnahmen in 100-facher Vergrößerung dar. Obwohl eine Kritische-Punkt-Trockung im Rahmen der Probenvorbereitung für die REM-Untersuchung stattgefunden hatte, traten außerdem noch einige Trocknungsartefakte in Form von Rissen in Erscheinung.

4.4.1 Beurteilung der Schmelzoberflächen nach Adhäsiventfernung

Die Unterschiede hinsichtlich der spezifischen Auswirkungen einzelner Verfahren waren nach deskriptiver Auswertung erkennbar.

Auf allen Bildern zeigten sich relativ homogene Schmelzgefüge, die in einigen Fällen wellenförmige Oberflächenunebenheiten und Auflagerungen aufwiesen. Auf den rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen waren bei allen bearbeiteten Proben in

Versuch zwei raue Oberflächen und ein generalisierter erosiver Abtrag der Schmelzoberfläche erkennbar (Abbildungen 43-46). Es traten weiterhin zahlreiche Rillen und Wellen in Erscheinung. Die mit den Adhäsiventfernungsverfahren bearbeiteten Proben zeigten raue, stark strukturierte Oberflächen, wohingegen sich die mit den Carbidfinierer(30) bearbeiteten Oberflächen vergleichsweise relativ glatt darstellten. Die Oberflächen der mit Metallfinierer bearbeiteten Proben wiesen demgegenüber die rauesten und zerklüftetesten Oberflächen innerhalb des Testfeldes auf.

4.4.2 Beurteilung der Schmelzoberflächen nach Politur

Nach Anwendung der Polierinstrumente zeigten sich auf den rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen mehrere nahezu parallel zueinander verlaufende Riefen (Abbildungen 47,48). Die Bearbeitungsspuren lagen in verschieden starken Ausprägungen vor, was den unterschiedlichen Körnungen des Bearbeitungssystems, sowie dem Unvermögen des Polierinstrumentes, die Riefen der gröberen Versionen einzuebnen, zuzuschreiben ist. Auf der Aufnahme der mit Universalpolierer bearbeiteten Proben waren die Bearbeitungsriefen erkennbar (Abbildung 48). Die mit Nylonbürste polierten Proben besaßen im direkten Vergleich aller Aufnahmen die glattesten Oberflächen mit den wenigsten Rillen und Auflagerungen (Abbildung 47).

Unbearbeitete Schmelzoberfläche

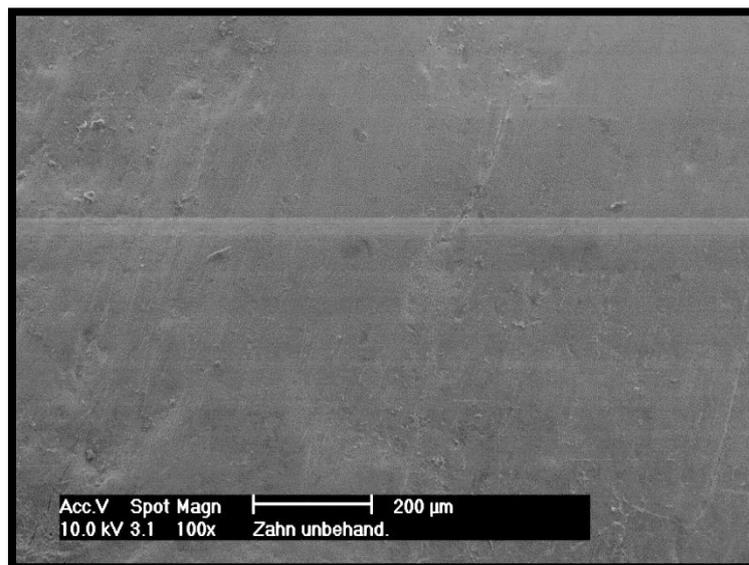


Abb.42: REM-Aufnahmen von unbehandelten Schmelzoberflächen in den Vergrößerungen x100

Schmelzoberflächen nach Anwendung der verschiedenen Adhäsiventfernungsverfahren

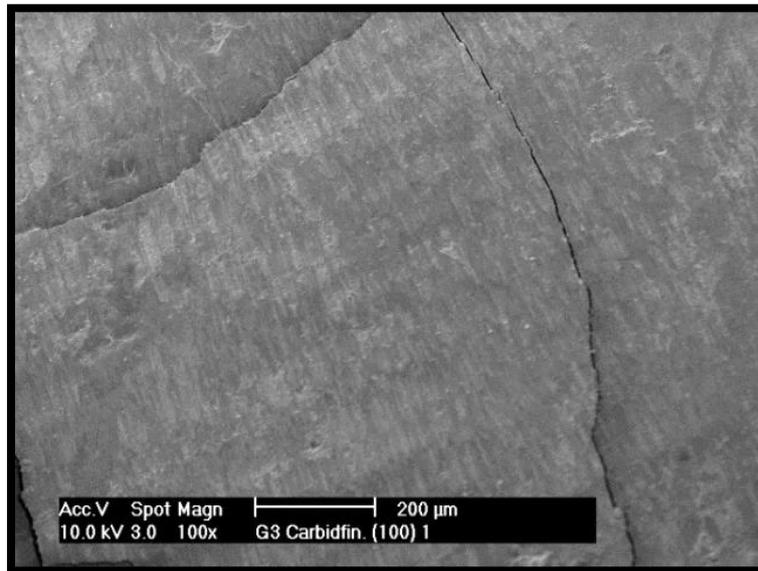


Abb.43: REM-Aufnahmen von Schmelzoberflächen nach Anwendung der Carbidfinierer(100).

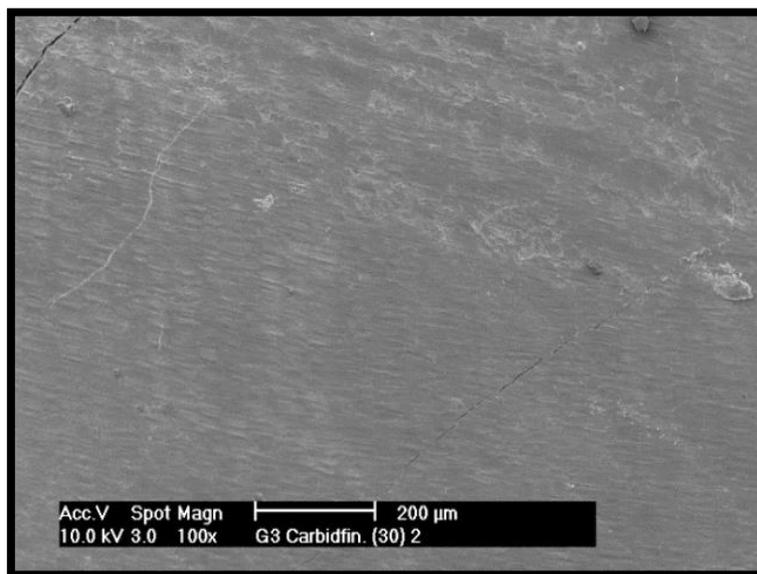


Abb.44: REM-Aufnahmen von Schmelzoberflächen nach Anwendung der Carbidfinierer(30).

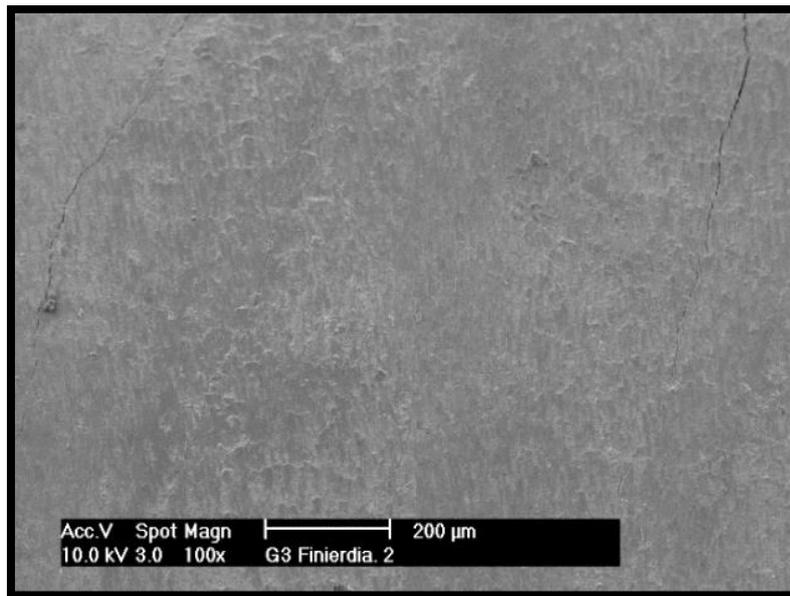


Abb.45: REM-Aufnahmen von Schmelzoberflächen nach Anwendung der Finierdiamanten.

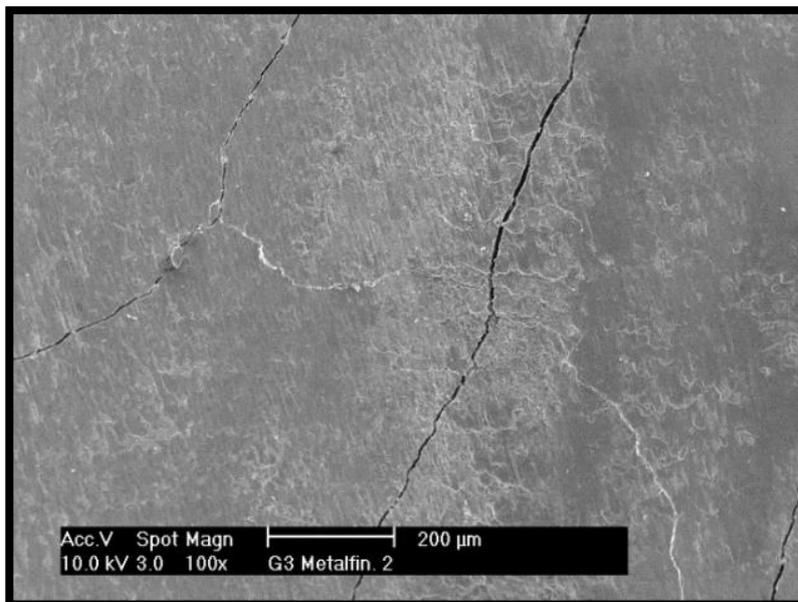


Abb. 46: REM-Aufnahmen von Schmelzoberflächen nach Anwendung der Metallfinierer.

Schmelzoberflächen nach Anwendung der verschiedenen Polierverfahren

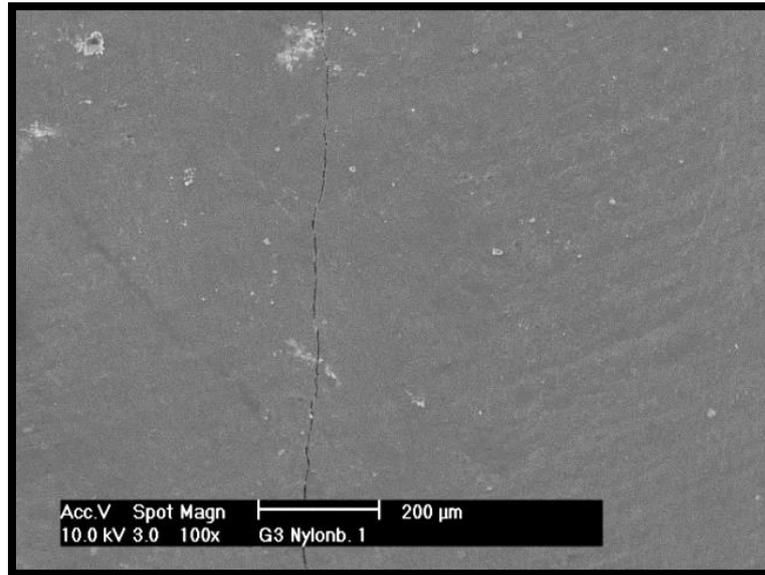


Abb. 47: REM-Aufnahmen von Schmelzoberflächen nach Anwendung der Nylonbürste.

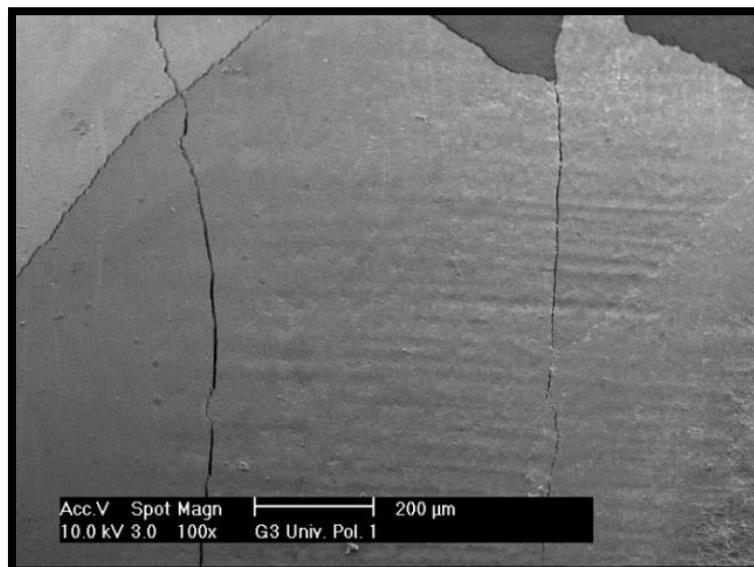


Abb.48: REM-Aufnahmen von Schmelzoberflächen nach Anwendung der Universalpolierer.

5. Diskussion

5.1 Diskussion der Methode

5.1.1 Studiendesign

Für die vorliegende Arbeit wurde ein *in-vitro*-Studiendesign gewählt. Zwar gibt es auch *in vivo* Ansätze zur Analyse der Kleberrestentfernung (Brosh et al., 2005; Alessandri Bonetti et al., 2011; Grunheid et al., 2015; Pont et al., 2010). Doch lag der Fokus der vorliegenden Arbeit im Gegensatz dazu auf einer vergleichenden Betrachtung unterschiedlicher in der Praxis etablierter Bracket- und Kleberrestentfernungsmethoden. Dieses Vorhaben erforderte standardisierte und reproduzierbare Versuchsbedingungen, die nur *in-vitro* möglich sind.

5.1.2 Rinderzähne

Zur Untersuchung der Bracket- und Kleberrestentfernung wurden Rinderzähne (Arici and Minors, 2000; Grunheid et al., 2015; Vidor et al., 2015; Zielinski et al., 2014) bzw. humane Zähne (Cardoso et al., 2014; Jonke et al., 2006; Pithon et al., 2015; Webb et al., 2016) eingesetzt. Rinderzähne werden in Schmelz-Adhäsiv-Studien häufig verwendet, denn sie haben den Vorteil der einfachen Beschaffung. Sie haben verglichen zu den humanen Zähnen eine ähnliche Mikrostruktur. Es müssen Frontzähne von Rindern nach Norm DIN 13990 verwendet werden. Rinderzähne haben vergleichbare Eigenschaften zum menschlichen Zahnschmelz [ISO/TS 11405].

(Nakamichi et al., 1983) konnten bei vergleichenden Haftfestigkeitsprüfungen zur Befestigung von Kunststoffadhäsiven an Rinder- und humanem Schmelz keinen signifikanten Unterschied feststellen. (Yassen et al., 2011) haben in einem Review die aktuelle Datenlage zu Studien, welche humane Zähne und Rinderzähne verglichen hatten, untersucht und herausgefunden, dass Rinderzähne eine Alternative zu menschlichen Zähnen in den Adhäsivfestigkeitsuntersuchungen darstellen. (Oesterle et al., 1998; Saleh and Taymour, 2003) fanden in ihren Studien heraus, dass Rinderzähne geeignete Alternativen zu menschlichen Zähnen bei Schmerz-Adhäsiv-Untersuchungen darstellen. In einer Studie von (Hobson et al., 2001) wurde herausgefunden, dass die Verwendung von verschiedenen Zahntypen bei Bracket-

Adhäsiv-Untersuchungen einen signifikanten Unterschied bei der Klebkraft hervorruft. Um aussagekräftige Vergleiche durchführen zu können, wird daher empfohlen denselben Zahntyp zu verwenden.

5.1.3 Quantitative Oberflächenevaluierung

Aufgrund des statischen Versuchsdesigns hinterließen die verschiedenen Kleberentfernungsmethoden auf den Schmerzoberflächen dreidimensionale Defekte. Diese wären durch Standardmethoden der Oberflächenevaluierung wie das Tastschnittverfahren nur mit großem Aufwand zu quantifizieren gewesen, da jeweils mehrere zweidimensionale Schnitte angefertigt und zu einem dreidimensionalen Bild hätten verrechnet werden müssen (Pelka et al., 2010). Aus diesem Grund wurden das mechanische und das optische Tastschnittverfahren bei der Auswertung der Oberflächen nicht verwendet.

Das Verfahren der Wahl zur Oberflächenbeurteilung war die berührungslose und dreidimensionale Abstandsmessung mit Hilfe eines chromatischen Weißlichtsensors (Profilometer). Mit diesem Verfahren konnten die Oberflächen einfach, reproduzierbar und detailliert in jeweils zwei Messvorgängen evaluiert werden, sowie im Anschluss mit Hilfe der dazugehörigen Software Volumenverluste, Defekttiefen und Rauheitsparameter berechnet werden. Die laterale Auflösung des eingesetzten Sensors betrug 1 bis 2 μm , wodurch auch feinste Strukturen auf den Messflächen erfasst wurden. Die mechanischen Geräte sind mit kegel- oder kugelförmigen Tastspitzen ausgestattet, die nicht in dem Maße in Risse oder feine Riefen eindringen können, wie es die optischen Systeme vermögen. Die Quantifizierung von Substanzverlusten auf Restaurations- und Zahnoberflächen mit Hilfe der Berechnung des Materialvolumens, welches durch die verschiedenen Bohrer abgetragen wird, ist ein etabliertes Verfahren (Brauchli et al., 2011; Eliades et al., 2004) und fand daher auch in der vorliegenden Arbeit Verwendung.

5.1.4 Qualitative Oberflächenevaluierung

Die Rasterelektronenmikroskopie ist das Verfahren der Wahl zur Analyse von Strukturen nach Berarbeitung von Oberflächen (Zarrinnia et al., 1995; Campbell, 1995; Alessandri Bonetti et al., 2011; Fischer-Brandies et al., 1993; Fjeld and Ogaard, 2006; Gracco et al., 2015; Iijima et al., 2008; Mhatre et al., 2015; Osorio et al., 1998, 1999; Schuler and van Waes, 2003; Su et al., 2012; Zanarini et al., 2013). Mit dieser Methode kann bei

einer sehr hohen Schärfentiefe ein deutlich besseres Auflösungsvermögen als beispielweise durch die Licht- bzw. Stereomikroskopie erzielt werden, deswegen fand sie in der vorliegenden Untersuchung Verwendung. Nachteilig bei diesem Verfahren ist, dass unter anderem die Goldbeschichtung der untersuchten Oberflächen irreversibel verändert wird (Field et al., 2010).

Zudem kann durch dieses Verfahren aufgrund der hohen Vergrößerung nur ein kleiner Teil der Messoberfläche visualisiert werden, die Darstellung der Gesamtläche ist nur bedingt möglich. Jedoch gilt dieser Nachteil auch für alle anderen mikroskopischen Verfahren. Diesem Umstand kann z. B. durch die Erstellung von Übersichtsaufnahmen in geringerer Vergrößerung und Detailaufnahmen in hoher Vergrößerung entgegengewirkt werden.

5.2 Diskussion der Ergebnisse

5.2.1 Bracketentfernung

Debonding von Brackets ist ein Verfahren mit dem Risiko einer Schädigung des Zahnschmelzes in Form von Rissen, Kratzern oder von Schmelzverlust. Der Schlüssel zum Erhalt dieses Gewebes kann in der Verwendung von Verfahren liegen, die die Entwicklung von Bruchstellen in der Schmelz-Adhäsiv-Grenzfläche vermeiden und somit so viel Kleber wie möglich auf die Zahnoberfläche belassen. (Knösel et al., 2010; Zachrisson et al., 1980) haben festgestellt, daß die Aufrechterhaltung der strukturellen Integrität des Schmelzes nach Debonding mit der Anwesenheit von größeren Mengen an verbliebenem Kleber zusammenhängt.

In der Literatur wurde mehrfach beschrieben, dass die Schwachstelle des Verbundes Schmelz, Adhäsiv und Bracket bei der Entfernung von Metallbrackets häufig am Übergang vom Bracket zum Adhäsiv liegt und deshalb die bevorzugte Bruchstelle bei der Bracketentfernung ist (Eberhard et al., 1994; Regan and van Noort, 1989; Diedrich, 1979; Bishara et al., 1999).

Die Ergebnisse der Untersuchungen haben auch gezeigt, dass es in allen Adhäsivgruppen eine Bruchstelle in dem Bracket-Adhäsiv-Verbund gab und es in keinem Schmelz-Adhäsiv-Bracket-Verbund zu Schmelzrissen kam. Ein wichtiges Kriterium für den Vergleich unterschiedlicher Bracketentfernungsmethoden ist, wie viel

Kleber nach der Bracketentfernung noch auf der Zahnoberfläche zurückbleibt und ob eventuell Schmelzausrisse zu beobachten sind. Die von (Artun and Bergland, 1984) entwickelte Skalierung, der sogenannte Adhäsiv-Remnant-Index (ARI) unterscheidet jedoch nur zwischen den Möglichkeiten, ob keiner, der gesamte oder mehr beziehungsweise weniger als die Hälfte des Klebers auf der Schmelzoberfläche zurückgeblieben ist. Daher ist diese Einteilung und Beurteilung des Adhäsivrestes zu subjektiv.

Für die ARI-Beurteilung war in der vorliegenden Studie am häufigsten der ARI-Grad 2 vertreten, d. h., dass mehr als 50 % Adhäsiv am Zahnschmelz bzw. weniger als 50 % an der Bracketbasis verblieben und so die bevorzugte Bruchstelle mit dem geringeren Risiko der Schmelzschädigung vorliegen kann.

Die Ergebnisse der Bracketentfernung mit der Frontbracketentfernungszange zeigen, dass bei den Gruppen Opal® Bond MV, Opal® Bond und ConTec SE 100 % der Proben einen ARI-Grad 2 haben. Das bedeutet, dass mehr als 50 % des Restadhäsives nach der Bracketentfernung an der Zahnoberfläche geblieben sind. Während beim Adhäsiv Transbond™XT 66 % der Proben einen ARI-Grad 3 und 33 % der Proben einen Grad 2 zeigten, wies das Adhäsiv Transbond™Plus bei 66 % der Proben einen ARI-Grad 2 und bei 33 % der Proben einen Grad 1 auf. Beim ConTec LC zeigten 100 % der Proben einen ARI-Grad 3, was bedeutet, dass 100 % des Adhäsives auf der Zahnoberfläche waren.

Bei den Untersuchungen mit dem Cutter zeigt sich, dass bei den Gruppen Opal® Bond Transbond™Plus und ConTec SE 100 % der Proben einen ARI-Grad 2 aufwiesen. Damit war mehr als 50 % des Restadhäsives nach der Bracketentfernung an der Zahnoberfläche verblieben. Beim Adhäsiv Opal® Bond zeigten 66 % der Proben einen ARI-Grad 2 und 33 % der Proben einen ARI-Grad 1. Während beim Adhäsiv Transbond™XT 66 % der Proben einen ARI-Grad 3 und 33 % der Proben einen Grad 2 hatten, wies das Adhäsiv ConTec LC eine deutliche Reduktion des Restadhäsives auf der Zahnoberfläche auf. Dabei hatten 66 % der Proben einen ARI-Grad 2 und 33 % der Proben einen Grad 3.

Um mehr Objektivität für das Studiendesign zu erreichen, wurden in der vorliegenden Studie die Zähne standardisiert unter dem Mikroskop betrachtet und mit Hilfe einer Java-Software der prozentuale Flächenanteil des Kleberrestes zur gesamten Klebefläche gemessen.

In der vorliegenden Studie wurde gezeigt, dass die Bracketentfernung mittels einer BEZ in den Adhäsivgruppen Opal® bond MV, ConTec LC und ConTec SE die höchsten ARI-Werte (Mittelwerte) und somit die größte Menge an Kleberrest auf der untersuchten Oberfläche erzeugt (mit Opal® bond MV 98,8mm², ConTec LC 100,0mm² und ConTec SE 99,6mm²). In den restlichen Adhäsivgruppen Opal® bond, Transbond™XT und Transbond™Plus hat die Methode Cutter die höchsten ARI-Werte (Mittelwerte) erreicht (mit Opal® bond 98,7mm², Trasbond™ XT 99,9mm² und Trasbond™ Plus 98,7mm²). Während bei den Kombinationen BEZ mit ConTec LC der höchste ARI-Wert (100,0mm²) erreicht wird, zeigt die gleiche Methode mit Transbond™Plus den niedrigsten ARI-Wert (64,8 mm²). Bei den Gruppen ConTec LC und ConTec SE weisen beide Bracketentfernungsmethoden einen fast identischen Restadhäsivverbleib auf.

Literaturvergleich

Ein direkter Vergleich der in dieser Untersuchung gemessenen Werte mit den Angaben in der Literatur ist nur begrenzt möglich.

Bislang gab es keine Studie, die Bracketentfernungsmethoden in Hinblick auf die verschiedenen Adhäsivmaterialien untersucht hatte. Zudem sind die Debondingversuche, bei denen Frontbracketentfernungszange und Cutter untersucht wurden, sehr gering und beziehen sich auf andere Bracketsysteme oder es werden andere Adhäsivsysteme angewandt. Ebenso sind Studien zu den hier benutzten Adhäsiven unter gleichzeitiger Verwendung von Bracketentfernungsmethoden fast nicht zu finden. Aus diesem Grund werden zum Vergleich nur Studien heran gezogen, bei denen unter ähnlichen Bedingungen gearbeitet wurde.

In der vorliegende Studie zeigt der Vergleich zwischen Frontbracketentfernungszange und Cutter in der Adhäsivgruppe Opal® Bond MV einen signifikanten Unterschied ($p = 0,05$). Daher hat der Faktor Entfernungsmethode nur in der Gruppe Opal Bond MV einen signifikanten Einfluss und in den anderen Adhäsivgruppen konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen beiden Methoden ($p > 0,05$) festgestellt werden.

Dieses Ergebnis stimmt mit den Untersuchungen von (Knösel et al., 2010) und (Leao Filho, Jorge Cesar Borges et al., 2015) überein. (Leao Filho et al., 2015) haben in ihrer Studie Transbond Plus Color Change adhesive system (3M Unitek, Monrovia, CA, USA) als Kleber verwendet und dabei herausgefunden, dass die Art der Debondingtechnik (Front-Bracketentfernungszange oder Cutter) keinen Einfluss auf die Menge an Klebstoff nach Debonding hat. (Knösel et al., 2010) verwendeten in ihrer Studie Fuji Ortho LC (GC Co-operation, Tokyo, Japan) und Mono-Lok2 (Rocky Mountain Orthodontics, Denver, Colo) als Kleber und haben ebenso festgestellt, dass zwischen beiden Methoden kein signifikanter Unterschied besteht. (Zarrinnia et al., 1995) untersuchten zwei Bracketentfernungsmethoden und kamen zu dem Ergebnis, dass die häufigste Bruchstelle bei der Bracketentfernung an der Bracket-Adhäsiv-Grenze lag.

5.2.2 Adhäsiventfernung

Die Adhäsiventfernung nach kieferorthopädischer Therapie sollte möglichst ohne Verletzung der Schmelzoberfläche erfolgen. Am häufigsten wird heute zur Adhäsiventfernung ein Karbidfinierer gefolgt von weiteren Politurschritten verwendet. Andere Finierer wurden zwar mehrfach als Verfahren zur Bearbeitung von Schmelzoberflächen untersucht (Zachrisson and Arthun, 1979; Retief and Denys, 1979; Campbell, 1995; Oliver and Griffiths, 1992; Hong and Lew, 1995), allerdings befassten sich nur wenige Studien mit dem Effekt der Bohrer auf die Adhäsiventfernung.

In mehreren Studien hat sich gezeigt, dass unabhängig von der verwendeten Adhäsiventfernungsmethode Schmelzschädigungen unvermeidlich sind (Zachrisson and Arthun, 1979; Retief and Denys, 1979; Campbell, 1995; Ozer et al., 2010; Pont et al., 2010). Die Suche nach einer effizienten und sicheren Methode zur Schmelzbearbeitung nach Bracketentfernung hat das Interesse vieler Forscher auf sich gezogen. Die meisten ursprünglichen Studien konzentrierten sich auf SEM, um Schmelzoberflächen vor und nach der Verwendung von verschiedenen Debondingbohrern zu vergleichen (Gwinnett and Gorelick, 1977; Zachrisson and Arthun, 1979; Retief and Denys, 1979; Zarrinnia et al., 1995; Ulusoy, 2009). Nur wenige Studien arbeiteten mit anderen Methoden wie Profilometrie (Eliades et al., 2004; Ozer et al., 2010) und CLSM (Brauchli et al., 2011).

Ziel des hier vorgestellten zweiten Teils der Studie war die Evaluation der Oberflächenrauheit nach Bearbeitung der Schmelzoberflächen mit vier unterschiedlichen Methoden der Adhäsiventfernung (12-fach geriffelter Karbidfinierer mit hoher Geschwindigkeit, sowie mit niedriger Geschwindigkeit, ultrafeine Diamantfinierer und Hartmetallfinierer) bei Verwendung von sechs verschiedenen Adhäsiven.

Bis heute gibt es keine Studie, die die Auswirkungen von verschiedenen Adhäsiventfernungsverfahren auf der Schmelzoberfläche in Bezug auf sechs verschiedene Adhäsive verglichen hat.

Generell wurden bei den Schmelzprüfkörpern im Rahmen der statistischen Auswertung nicht die Rauheitswerte miteinander verglichen, die nach Anwendung der verschiedenen Bohrer aufgetreten waren. Es fand vielmehr ein Vergleich der Differenzen statt, die aus den mittleren Rauheitswerten vor und nach Bearbeitung gebildet worden waren. Dieses Vorgehen wurde gewählt, um im Hinblick auf die in den sechs Adhäsivgruppen natürlicherweise voneinander abweichenden initialen Rauheitswerten einheitliche Bedingungen zu schaffen.

In der Gruppe Opal®bond MV hat das Verfahren mit Metallfinierern mit R_a 23,6 μm den höchsten Rauheitswert und sich damit als das schlechteste Verfahren herausgestellt. Niedrigtourige Karbidfinierer(30) mit 1,7 μm zeigten den geringsten Rauheitswert und stellten sich damit als die besten Verfahren heraus. Das zweitbeste Verfahren war der Karbidfinierer(100) mit 7,1 μm , gefolgt vom Finierdiamanten mit 5,6 μm . Ein signifikanter Unterschied ($p < 0,05$) konnte nur zwischen Karbidfinierer(30) und Metallfinierer festgestellt werden. Bei den obigen Verfahren wurde kein signifikanter Unterschied gezeigt.

In Bezug auf die Bearbeitungsdauer hat die Adhäsiventfernung mittels hochoutigem Karbidfinierer mit 25,8 s am kürzesten gedauert, gefolgt vom Metallfinierer.

Am längsten dauerte es mit dem ultrafeinen Diamantfinierer. Signifikante Unterschiede hat der Karbidfinierer(100) jeweils mit dem Karbidfinierer(30) und dem Finierdiamanten gezeigt. Bei dem Metallfinierer war der Unterschied in der Zeit nicht signifikant.

In der Gruppe Opal®bond hat der Carbidfinierer(100) mit $0,7 \mu\text{m}$ den geringsten Rauheitswert und der Metallfinierer mit $7,7 \mu\text{m}$ den höchsten Wert gezeigt. Carbidfinierer(30) und Finierdiamant liegen mit $4,6 \mu\text{m}$ und $7,0 \mu\text{m}$ dazwischen.

Der Vergleich zwischen Carbidfinierer(100) mit Metallfinierer zeigt mit $p = 0,05$ einen signifikanten Unterschied. Alle anderen getesteten Verfahren innerhalb dieser Gruppe weisen keine signifikanten Unterschiede untereinander auf ($p > ,05$). Daher hat der Faktor Verfahren für Opal®bond nur zwischen Carbidfinierer(100) und Metallfinierer einen signifikanten Einfluss.

In Bezug auf die Bearbeitungsdauer hat die Adhäsiventfernung mittels Metallfinierer mit $20,7 \text{ s}$ am kürzesten gedauert. Am längsten war die Bearbeitung mit dem ultrafeinen Diamantfinierer mit $39,7 \text{ s}$. Signifikant waren in dieser Gruppe nur der Unterschiede zwischen Carbidfinierer(100) jeweils mit dem Finierdiamanten und Metallfinierer sowie zwischen Metallfinierer und Finierdiamant.

In der Gruppe Transbond™XT lagen Carbidfinierer(100), Carbidfinierer(30) und Finierdiamant mit jeweils $1,4 \mu\text{m}$, $0,98 \mu\text{m}$ und $1,4 \mu\text{m}$ fast auf ähnlichem Niveau. Jedoch zeigt der Carbidfinierer (30) den geringsten Rauheitswert. Der Metallfinierer erreicht mit $12,2 \mu\text{m}$ den höchsten Rauheitswert und schneidet somit am schlechtesten ab. Hier zeigt der Metallfinierer zu dem Carbidfinierer(100), dem Carbidfinierer(30) und dem Finierdiamanten mit $p = 0,05$ einen signifikanten Unterschied. Alle anderen Kombinationsverfahren weisen keinen signifikanten Unterschied auf.

Am schnellsten war in dieser Gruppe die Oberflächenbearbeitung mit dem Carbidfinierer (100), gefolgt vom Carbidfinierer (30). Am längsten hat es mit $67,6 \text{ s}$ bei dem Metallfinierer gedauert. Alle getesteten Verfahren in dieser Gruppe zeigten signifikanten Unterschiede untereinander ($p < 0,05$), nur zwischen dem Carbidfinierer und dem Finierdiamanten war $p > 0,05$ nicht signifikant.

In der Gruppe Transbond Plus hat der Finierdiamant beim Adhäsiventfernen mit $3,1 \mu\text{m}$ den geringsten Rauheitswert erzeugt. Carbidfinierer(30) und Carbidfinierer(100) haben mit $3,7 \mu\text{m}$ und $9,5 \mu\text{m}$ noch höhere Rauheitswerte aufgewiesen. Den höchsten Rauheitswert für dieses Adhäsiv hat der Metallfinierer gezeigt. Nur die Kombination aus Carbidfinierer(100) und Finierdiamant hat einen signifikanten Unterschied gezeigt. Alle

anderen Kombinationen innerhalb dieser Gruppe zeigten keine signifikanten Unterschiede untereinander ($p > ,05$).

In der Bearbeitungsdauer hat der Carbidfinierer(100) mit 23,1 s gefolgt vom Carbidfinierer(30) mit 27 s am schnellsten Kleber entfernt. Am längsten hat der Metallfinierer mit 69 s gebraucht. Bezüglich der benötigten Zeit haben alle Verfahren signifikante Unterschiede gezeigt.

In der Gruppe ConTec LC hat der Finierdiamant mit 0,6 μm gefolgt vom Carbidfinierer (30) den geringsten Rauheitswert gezeigt. Der Metallfinierer erzeugte hier mit 14,2 μm deutlich die höchsten Rauheitswerte. Nur die Kombinationen Carbidfinierer(30) mit Finierdiamant und Finierdiamant mit Metallfinierer unterschieden sich dabei signifikant. In der Bearbeitungsdauer in dieser Gruppe war der Metallfinierer mit 22,0 s am schnellsten, gefolgt vom Carbidfinierer (100). Am längsten hat es beim Finierdiamanten mit 58,7 s gedauert. Hinsichtlich der Bearbeitungsdauer zeigten, mit Ausnahme der Kombinationen Carbidfinierer(100) mit Carbidfinierer(30) und Metallfinierer, alle signifikante Unterschiede.

In der Gruppe ConTec SE hat der Metallfinierer mit 0,002 μm den geringsten Rauheitswertunterschied erzeugt. Den höchsten Wert hat der Finierdiamant generiert. Der Carbidfinierer(30) hat in dieser Adhäsivgruppe erstaunlicherweise einen negativen Rauheitswert (-0,5 μm) gezeigt, da der gemessene Rauheitswert nach der Adhäsiventfernung geringer als vor dem Kleber bzw. der Ausgangssituation und somit die bearbeitete Oberfläche nachher noch glatter war. Das lässt sich dadurch erklären, dass mit dem Carbidfinierer(30) die bearbeitete Oberfläche glatter als in der Ausgangssituation war oder die Schmelzoberfläche rau war, sodass sie nach der Bearbeitung mit dem Carbidfinierer noch glatter poliert wurde. Auf jeden Fall war der Unterschied zur Ausgangsmessung hierbei deutlich höher als beim Metallfinierer.

Signifikante Unterschiede ($p = 0,05$) in dieser Gruppe wurden zwischen dem Carbidfinierer(100) und dem Finierdiamanten, dem Carbidfinierer(30) und dem Finierdiamanten, sowie dem Finierdiamanten und dem Metallfinierer dargestellt.

Bei der Bearbeitungsdauer war in dieser Gruppe der Metallfinierer mit 20,3 s am schnellsten, gefolgt vom Carbidfinierer(100). Am längsten hat es hier mit dem

Finierdiamanten mit 30,1 s gedauert. Nur die Kombinationen Finierdiamant mit Metallfinierer waren hier signifikant.

5.2.3 Politur

Nachdem die Schmelzoberflächen in Schritt zwei von den Kleberresten befreit wurden, folgte im dritten Schritt die Politur. Ziel des hier vorgestellten dritten Teiles der Studie war die Evaluation der Oberflächenrauheit nach Politur der bearbeiteten Oberflächen mit zwei unterschiedlichen Methoden: dem Universalpolierer sowie der Nylonbürste.

Da bislang keine Untersuchung die alleinige Auswirkung von verschiedenen Politurverfahren als separaten bzw. eigenständigen Schritt in Bezug auf den unterschiedlichen Adhäsiven verglichen hat ist in der Diskussion kein Vergleich im eigentlichen Sinn möglich.

Generell wurden bei den Prüfkörpern im Rahmen der statistischen Auswertung wie in Schritt zwei nicht die Rauheitswerte miteinander verglichen, die nach Anwendung der verschiedenen Polierinstrumente aufgetreten waren. Vielmehr fand ein Vergleich der Differenzen statt, die aus den mittleren Rauheitswerten vor und nach der Politur gebildet worden waren. Dieses Vorgehen wurde gewählt, um im Hinblick auf die in den sechs Adhäsivgruppen natürlicherweise voneinander abweichenden initialen Rauheitswerte einheitliche Bedingungen zu schaffen.

Der Universalpolierer hat beim Adhäsiv ConTec LC mit 32,1 μm den höchsten Rauheitswert und beim Transbond™XT mit 10,5 μm den geringsten Rauheitswert erzeugt. Die Nylonbürste hat den höchsten Rauheitswert mit 9,1 μm bei Transbond™Plus und die geringste Werte bei Transbond™XT erzeugt.

Durch die Ergebnisse lässt sich deutlich feststellen, dass in allen Adhäsivgruppen die gemessenen Rauheitswerte beim Polieren mit dem Universalpolierinstrument deutlich höher als beim Polieren mit der Nylonbürste waren. Daraus ist zu schließen, dass die Nylonbürste in allen Adhäsivgruppen die geringste Rauheit erzeugt hat und somit mit Abstand das beste Polierverfahren war. Jedoch war der Vergleich der zwei Verfahren untereinander nur bei der Gruppe Opal® Bond MV und der Gruppe ConTec LC signifikant unterschiedlich ($p > ,05$). In den anderen Adhäsivgruppen konnten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden.

Literaturvergleich

In der Literatur gibt es keine Auskünfte über die Rauheit der bearbeiteten Schmelzoberflächen durch verschiedene Bohrer im Hinblick auf unterschiedliche Adhäsive. Weiterhin existieren zwar Studien, bei denen Transbond XT als Kleber verwendet wurde und die Schmelzoberflächen verglichen wurden, jedoch aber nicht mit den anderen Adhäsivmaterialien. Infolgedessen beschränkt sich der Literaturvergleich auf Untersuchungen, in denen Schmelzprüfkörper mit durch Transbond XT geklebten Brackets verglichen wurden.

In der vorliegende Untersuchung lässt sich deutlich zeigen, dass die Bearbeitung der Schmelzoberflächen durch Carbidfinierer die geringsten Rauheitswerte in allen Adhäsivgruppen erzeugt, eine Ausnahme bilden Contec LC und SE, wo Finierdiamant und Metallfinierer am effektivsten waren.

In Übereinstimmung mit älteren Studien ist die Kleberrestentfernung mittels Carbidfinierer am sichersten und effektivsten (Zachrisson and Arthun, 1979; Retief and Denys, 1979; Campbell, 1995; Oliver and Griffiths, 1992; Hong and Lew, 1995; Ireland et al., 2005).

(Brauchli et al., 2011) haben in ihrer Studie Transbond XT als Adhäsiv verwendet. Sie haben den Unterschied zwischen Adhäsiventfernung jeweils mit Carbidfinierer und Air Abrasion durchgeführt und dabei herausgefunden, dass beide Bearbeitungsmethoden nicht zu signifikanten Unterschieden in der Oberflächenrauheiten führten. Sie empfehlen aufgrund der höheren Effizienz den Carbidfinierer als Methode zur Adhäsivrestentfernung. Zachrisson and Arthun, 1979 untersuchten verschiedene Methoden zur Adhäsiventfernung. Die Brackets wurden mit Concise oder Endure S geklebt. Sie berichteten, dass der höchste Schmelzschaden durch die Verwendung eines Finierdiamanten verursacht wurde. Die glatteste Schmelzoberfläche wurde bei dem Carbidfinierer beobachtet. (Ireland et al., 2005) verwendeten in einer Untersuchung Transbond XT und Fuji Ortho LC und fanden dabei dabei, dass der niedrigste Schmelzverlust nach der Verwendung eines langsam rotierenden Carbidfinierers auftrat und der größte Verlust beim Ultraschall-Scaler bzw. Carbidfinierer mit Hochgeschwindigkeit zu finden war. Eliades et al., 2004 haben in ihrer Studie chemisch härtendes Adhäsiv von Unite, 3m/Unitek verwendet. Die Zeit wurde ebenfalls

untersucht. Verglichen wurde ein Carbidfinierer mit einem ultrafeinen Diamantschleifer mit hoher Geschwindigkeit. In Übereinstimmung zu den vorliegenden Ergebnissen zeigt diese Studie, dass die Rauheit sich mit der Verwendung der beiden Finierer erhöht, dies umso mehr bei der Verwendung des ultrafeinen Diamantschleifers. Allerdings war der Diamantbohrer im Gegensatz zu den vorliegenden Ergebnissen zweimal schneller als der Carbidfinierer beim Entfernen des überschüssigen Klebstoffes. Campbell, 1995 hat in einer Studie Phase II Reliance Orthodontic Products als Kleber verwendet und herausgefunden, dass ein Carbidfinierer mit hoher Geschwindigkeit durch leichte Züge über die Oberfläche das effizienteste und sicherste Verfahren zur Entfernung des Adhäsivrestes darstellt. Zarrinnia et al., 1995 haben bei einer Untersuchung Concise (3M Co. St., Paul, Minn.) und Achieve (Johanson and Jphanson „A“ Company, San Diego, Calif.) als Adhäsive verwendet und dabei herausgefunden, dass Diamantfinierer tiefe Rillen auf der Zahnschmelzoberfläche erzeugen. Sie empfehlen einen 12-fach geriffelten Carbidfinierer als ersten Schritt, gefolgt von den SofLex-Scheiben und einer endgültigen Politur mit einem Gummikelch und Zircate Paste. Ulusoy, 2009 verwendete in seiner Studie Transbond XT Primer und Adhesive Paste (3M/Unitek, Monrovia, California, USA) als Adhäsiv und untersuchte die Auswirkungen von 8 verschiedenen Finier- bzw. Polierverfahren sowie die dazu benötigte Zeit. Die Ergebnisse der Studie zeigten, dass das PoGo-Mikropoliersystem die effektivste Adhäsiventfernungsmethode war. Es wurde jedoch deutlich gezeigt, dass die maximale Bearbeitungszeit mit dem PoGo-Poliersystem und die minimale Zeit mit dem 30-fach geriffelten Carbidfinierer auftraten.

Ozer et al., 2010 haben in ihrer Studie Carbidfinierer jeweils mit Hochgeschwindigkeit und niedriger Geschwindigkeit mit Sof-Lex Discs verglichen. Die Ergebnisse der Studie zeigten, dass SofLex Discs mehr Zeit als Carbidfinierer benötigen, um die verbliebenen Adhäsive zu entfernen. Ähnlich wie in früheren Studien konnte keines der Verfahren die Schmelzoberfläche in die ursprüngliche Rauheit zurückversetzen. Die SofLex Discs waren am erfolgreichsten bei der Wiederherstellung des Schmelzes in der Nähe des ursprünglichen Rauhwertes.

Visualisierung mit Rasterelektronenmikroskop (REM)

In der vorliegenden Studie wurden am Beispiel der Gruppe Transbond XT die Schmelzoberflächen nach der Bearbeitung mit den verschiedenen Bohrern mittels REM-visualisiert. Die visuelle Überprüfung der REM-Bilder ließ deutliche Unterschiede zwischen den verwendeten Methoden der Adhäsiventfernung erkennen: Der Metallfinierer hinterließ eine raue, aber homogene Oberfläche (Abbildung 45). Carbidfinierer zeigten hingegen glattere Oberflächen. Beide Carbidfinierer führten zu einem regelmäßigen Wellenmuster, wie von anderen Studien gezeigt worden war. Es wurde vermutet, dass diese durch ungleichmäßigen Druck und leicht exzentrische Rotation der Carbidfinierer zustande kamen (Zachrisson and Arthun, 1979; Zarrinnia et al., 1995; Hong and Lew, 1995; Diedrich, 1981; Radlanski et al., 1990) (Abbildung 42,43).

Fehlerquellen

Diese Untersuchung war eine *In-vitro*-Studie und kann daher nicht alle diesbezüglichen Einschränkungen aus der natürlichen Umgebung mit sich bringen. Daher werden alle *In-vitro*-Studien-Daten ohne Rücksicht auf intraorale Gegebenheiten wie Speichel, Kaukräfte, Temperatur und pH-Wert-Änderung evaluiert (Pont et al., 2010).

Zu einer potenziellen Fehlerquelle zählen auch die Rinderzähne, die von verschiedenen Rindern stammen und deshalb unterschiedliche Qualitäten zur Verfügung stellen. Auch die Lagerungszeit kann die Haftwerte beeinflussen. Die International Organisation for Standardization [2001] und die DIN 13990 [2009] berichten dass, ein Lagerzeitraum von bis zu sechs Monaten für die Haftbarkeit unbedenklich ist.

Die Menge des beim Kleben der Brackets an der Zahnoberfläche verwendeten Adhäsivs war nicht für alle Zähne genau gleich. Dies ist vergleichbar mit der klinischen Situation, stellt jedoch eine Beschränkung auf das experimentelle Design dar. Keine der bisherigen Studien hat diesen Schritt standardisiert. Daher wurde auch durch die Verwendung des ARI-Wertes das Problem der ungleichen Mengen an Adhäsiven zu einem gewissen Grad zu korrigiert.

Schlussfolgerungen

Die hier vorgestellte *In-vitro*-Untersuchung hatte zum Ziel, adhäsiv-spezifische Debondingprotokolle zu entwickeln. Zwar ist das hier vorgestellte *In-vitro*-Experiment auf den Versuchsaufbau optimiert und dadurch die Übertragbarkeit auf die *In-vivo*-Situation limitiert, jedoch ist ein großer Einfluss des untersuchten Materials und der Methode des Bracket- und Überschussentfernens auf das Endergebnis deutlich zu erkennen. Mit Blick auf den klinischen Einsatz wird es bei der Verwendung der verschiedenen Adhäsive meistens zu Schmelzschäden und in einigen Fällen auch zu einem Schmelzverlust kommen. In unserer Untersuchung führten jeweils folgende Debondingprotokolle zu den besten Ergebnissen:

Opal® bond MV: Entfernungszange → Carbidfinierer 30.000 r/min → Nylonbürste

Opal® bond: Cutter → Carbidfinierer 100.000 r/min → Nylonbürste

Transbond™XT: Cutter → Carbidfinierer 30.000 r/min → Nylonbürste

Transbond™Plus: Cutter → Finierdiamant → Nylonbürste

ConTec LC: Entfernungszange → Finierdiamant → Nylonbürste

ConTec SE Entfernungszange → Carbidfinierer 30.000 r/min → Nylonbürste

Aufgrund dieser unterschiedlichen Ergebnisse obliegt es dem Behandler, die richtige Wahl des Debonding- und Kleberentfernungsverfahrens für die bevorstehende Behandlung zu treffen.

6. Zusammenfassung

Das Ziel der vorliegenden *In-vitro*-Untersuchung war die Entwicklung von adhäsiv-spezifischen Debondingprotokollen. Das Endziel des Bracket-Debonding ist es, eine dem naturbelassenen Schmelz ähnliche Oberfläche zu hinterlassen. Verschiedene Faktoren wie z. B. verwendetes Adhäsiv, Debondingverfahren oder Polierinstrumente haben einen Einfluss auf den Schmelzverlust beim Debonding. In der Untersuchung wurden Frontzahnbrackets (Discovery Zahn 11, Fa. Dentaaurum, Deutschland) mit sechs verschiedenen Adhäsivsystemen auf extrahierten Rinderzähnen (Zahn 11, Fa. Rocholl, Deutschland) befestigt. Die weitere Untersuchung erfolgte in drei aufeinander aufbauenden Phasen in jeweils dreifachem Ansatz. Verglichen wurde in *Phase 1* die Bracketentfernung mittels eines Cutters (ETM Hard Wire Cutter Black, Fa. Oramco, USA) und einer Bracketentfernungszange (ETM Direct Bond Remover Narrow, Fa. Ormco, USA). Nach Entfernung des Brackets wurden die Proben mit einem Lichtmikroskop vergrößert und die zurückgebliebenen Kleberreste mittels eines Berechnungsprogramms (ImageJ, National Institutes of Health, USA) entsprechend dem Adhesiv-Remnant-Index (ARI) quantifiziert. Die konstantere Methode wurde für die nächste Stufe beibehalten. In *Phase 2* wurde die Kleberrestentfernung mittels Carbidfinierer 100.000 r/min vs. Carbidfinierer 30.000 r/min vs. Finiererdiamanten vs. Metallfinierer (alle Fa. Komet Dental, Deutschland) verglichen. Nach Entfernung des Restklebers wurden die Rauheiten des Arbeitsfeldes profilometrisch und rasterelektronenmikroskopisch dokumentiert und mit dem Ausgangszustand des Prüfkörpers verglichen. Die konstantere Methode wurde für die nächste Stufe beibehalten. In der 3. *Phase* wurden Nylonbürste vs. Universalpolierer (alle Fa. Komet Dental, Deutschland) verglichen. Dabei wurden die Rauheiten des Arbeitsfeldes profilometrisch und rasterelektronenmikroskopisch dokumentiert und mit dem Ausgangszustand des Prüfkörpers verglichen. Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigten, dass die Bracketentfernungszange bei Opal® bond MV, ConTec LC und ConTec SE die meisten Adhäsivreste gekennzeichnet durch erhöhte ARI-Werte hatte. In *Phase 2* wurde mit dem Hartmetallfinierer der höchste Rauheitswert bei allen

Adhäsivmaterialien außer Contec SE erzeugt. Bei Opal® bond MV, Transbond™XT und ConTec SE waren die Rauheitswerte mit dem Carbidfinierer bei 30.000 r/min, bei Opal®bond mit dem Carbidfinierer mit 100.000 r/min und bei Transbond™Plus und ConTec LC mit dem Finierdiamanten am niedrigsten. Nach der Politur, d. h. bei Abschluss der *Phase 3*, waren die Rauheitswerte mit dem Universalpolierer höher als mit der Nylonbürste.

Schlussfolgerung

Die hier vorgestellte *In-vitro*-Untersuchung hatte zum Ziel, adhäsiv-spezifische Debondingprotokolle zu entwickeln. Zwar ist das hier vorgestellte *In-vitro*-Experiment auf den Versuchsaufbau optimiert und dadurch die Übertragbarkeit auf die *In-vivo*-Situation limitiert, jedoch ist deutlich ein großer Einfluss des untersuchten Materials und der Methode des Bracket- und Überschussentfernens auf das Endergebnis zu erkennen. In der vorliegenden Untersuchung führten jeweils folgende Debondingprotokolle zu den besten Ergebnissen:

Opal® bond MV: Entfernungszange → Carbidfinierer 30.000 r/min → Nylonbürste

Opal® bond: Cutter → Carbidfinierer 100.000 r/min → Nylonbürste

Transbond™XT: Cutter → Carbidfinierer 30.000 r/min → Nylonbürste

Transbond™Plus: Cutter → Finierdiamant → Nylonbürste

ConTec LC: Entfernungszange → Finierdiamant → Nylonbürste

ConTec SE: Entfernungszange → Carbidfinierer 30.000 r/min → Nylonbürste

7. Anhang

7.1 Tabellen der Ergebnisse für Versuch eins

	Opal Bond MV		
Br.Entfernungsmethode	Restadhäsiv	Restadhäsiv in %	ARI-Score
BEZ 1	17,339	99,39238	2
BEZ 2	16,971	97,28289	2
BEZ 3	17,141	98,25738	2
Cutter 1	16,763	96,09057	2
Cutter 2	16,049	91,99771	2
Cutter 3	5,861	33,59702	1

	Opal Bond		
Br.Entfernungs-methode	Restadhäsiv	Restadhäsiv in %	ARI-Score
BEZ 1	17,285	99,08283	2
BEZ 2	17,332	99,35225	2
BEZ 3	15,188	87,0622	2
Cutter 1	17,351	99,46116	2
Cutter 2	17,087	97,94784	2
Cutter 3	17,222	98,7217	2

	Transbond XT		
Br.Entfernungsmethode	Restadhäsiv	Restadhäsiv in %	ARI-Score
BEZ 1	13,173	75,51161	2
BEZ 2	17,445	100	3
BEZ 3	17,445	100	3
Cutter 1	17,445	100	3
Cutter 2	17,405	99,77071	2
Cutter 3	17,445	100	3

	Transbond Plus		
Br.Entfernungsmethode	Restadhäsiv	Restadhäsiv in %	ARI-Score
BEZ 1	5,814	33,3276	1
BEZ 2	10,782	61,80567	2
BEZ 3	17,323	99,30066	2
Cutter 1	17,383	99,6446	2
Cutter 2	17,109	98,07395	2
Cutter 3	17,164	98,38922	2

	ConTec LC		
Br.Entfernungs-methode	Restadhäsiv	Restadhäsiv in %	ARI-Score
BEZ 1	17,445	100	3
BEZ 2	17,445	100	3
BEZ 3	17,445	100	3
Cutter 1	17,338	99,38664	2
Cutter 2	17,229	98,76182	2
Cutter 3	17,445	100	3

	ConTec SE		
Br.Entfernungs-methode	Restadhäsiv	Restadhäsiv in %	ARI-Score
BEZ 1	17,399	99,73631	2
BEZ 2	17,375	99,59874	2
BEZ 3	17,329	99,33505	2
Cutter 1	16,897	96,8587	2
Cutter 2	17,408	99,7879	2
Cutter 3	17,369	99,56435	2

7.2 Tabellen der Ergebnisse für Versuch zwei

Gruppe	Probe	Ra vor Bracket kleben	Ra nach Bracket Entf.	Differenz zw. vor und nach	Zeit
G1	ca	1,996	4,016	2,02	19,4
G1	ca	1,108	18,302	17,194	22,05
G1	ca	2,263	4,265	2,002	36,01
G1	cb	1,888	6,307	4,419	38,9
G1	cb	1,711	2,518	0,807	40,95
G1	cb	2,1	2,142	0,042	39,02
G1	f	3,717	15,977	12,26	60,56
G1	f	4,036	9,029	4,993	64,87
G1	f	4,506	4,03	-0,476	72,42
G1	m	2,54	39,484	36,944	30,64
G1	m	2,342	12,981	10,639	31,46
G1	m	2,498	25,736	23,238	36,03
G2	ca	3,721	4,942	1,221	31,06
G2	ca	2,073	2,258	0,185	29,17
G2	ca	1,868	2,5	0,632	26,36
G2	cb	2,423	9,281	6,858	44,12
G2	cb	1,756	8,552	6,796	28
G2	cb	2,677	2,902	0,225	23,3
G2	f	1,721	20,394	18,673	33,42
G2	f	1,817	3,998	2,181	36,89
G2	f	2,305	2,574	0,269	48,78
G2	m	1,699	11,227	9,528	19,78
G2	m	1,531	3,355	1,824	17,21
G2	m	1,353	13,135	11,782	25,2
G3	ca	2,388	4,595	2,207	23,67
G3	ca	2,848	5,045	2,197	21,05
G3	ca	3,123	2,989	-0,134	19,3
G3	cb	2,278	2,337	0,059	36,76
G3	cb	2,157	3,999	1,842	28,64
G3	cb	2,207	3,255	1,048	25,28
G3	f	1,734	3,068	1,334	28,89
G3	f	1,416	3,538	2,122	32,52
G3	f	1,68	2,493	0,813	47,63
G3	m	1,886	24,26	22,374	56,02
G3	m	1,6	7,583	5,983	61,76
G3	m	1,751	10,026	8,275	85
G4	ca	2,143	7,504	5,361	22,98

G4	ca	2,219	19,865	17,646	24,61
G4	ca	2,566	8,047	5,481	21,79
G4	cb	1,66	11,238	9,578	25,51
G4	cb	1,966	3,004	1,038	25,48
G4	cb	2,043	2,597	0,554	29,96
G4	f	2,461	5,606	3,145	33,97
G4	f	1,903	6,545	4,642	33,4
G4	f	2,34	3,94	1,6	34,68
G4	m	2,741	17,526	14,785	56,64
G4	m	2,264	21,953	19,689	70
G4	m	2,029	2,888	0,859	80,43
G5	ca	3,447	12,168	8,721	26,76
G5	ca	2,274	23,52	21,246	24,4
G5	ca	4,294	2,431	-1,863	31,3
G5	cb	1,737	17,958	16,221	31,04
G5	cb	1,71	22,794	21,084	28,09
G5	cb	1,726	6,332	4,606	33,65
G5	f	4,067	4,022	-0,045	65,46
G5	f	2,007	3,041	1,034	50,5
G5	f	2,347	3,234	0,887	60,28
G5	m	3,449	26,299	22,85	25,02
G5	m	2,478	14,24	11,762	19,02
G5	m	3,295	11,257	7,962	23,16
G6	ca	1,752	2,878	1,126	26,59
G6	ca	2,097	3,856	1,759	22,08
G6	ca	1,997	2,664	0,667	18,49
G6	cb	2,447	3,053	0,606	17,63
G6	cb	3,027	4,141	1,114	26,9
G6	cb	7,305	3,912	-3,393	25,5
G6	f	2,639	6,748	4,109	26,11
G6	f	2,086	3,863	1,777	22,21
G6	f	2,57	8,918	6,348	41,98
G6	m	5,878	6,851	0,973	19,93
G6	m	4,848	6,161	1,313	21,81
G6	m	9,486	7,206	-2,28	19,07

7.3 Tabellen der Ergebnisse für Versuch drei

Gruppe	Probe	Ra vor Bracket kleben	Ra nach Bracket Entf.	Differenz zw. vor und nach	Zeit
G1	up	3,034	34,198	31,164	15,16
G1	up	3,065	18,733	15,668	13,73
G1	up	3,401	19,628	16,227	14,06
G1	ny	2,165	9,089	6,924	15,58
G1	ny	5,068	5,02	-0,048	15,77
G1	ny	1,969	13,602	11,633	17,63
G2	up	2,243	16,914	14,671	14,36
G2	up	1,526	19,967	18,441	13,86
G2	up	3,201	39,485	36,284	14,61
G2	ny	3,19	24,793	21,603	13,68
G2	ny	3,353	2,122	-1,231	13,3
G2	ny	2,982	5,172	2,19	12
G3	up	2,802	4,164	1,362	12,3
G3	up	1,939	14,267	12,328	11,96
G3	up	4,041	21,785	17,744	12,66
G3	ny	3,207	5,707	2,5	13,52
G3	ny	2,115	3,314	1,199	13,4
G3	ny	2,525	3,515	0,99	14,06
G4	up	4,159	48,899	44,74	15,3
G4	up	4,525	16,468	11,943	14,2
G4	up	6,901	39,438	32,537	20,13
G4	ny	1,725	13,363	11,638	12,65
G4	ny	1,755	3,603	1,848	13,29
G4	ny	1,626	15,529	13,903	12,41
G5	up	15,667	45,048	29,381	15,08
G5	up	3,488	47,793	44,305	13,1
G5	up	6,192	28,688	22,496	16,51
G5	ny	2,512	7,584	5,072	16,03

G5	ny	2,738	6,87	4,132	14,3
G5	ny	2,538	1,889	-0,649	15,92
G6	up	3,294	7,182	3,888	11,28
G6	up	4,288	30,237	25,949	11,46
G6	up	3,075	18,562	15,487	12,03
G6	ny	2,165	5,935	3,77	10,22
g6	ny	2,877	2,803	-0,074	9,97
g6	ny	2,846	11,432	8,586	11,45

8. Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Debondingsverfahren: 1. mechanische Bracketentfernung, 2. Restkleberentfernung, 3. Schmelzpolitur	10
Abb. 2: Bracketentfernungstechniken; BM steht für die Basismethode und WM für die Flügelmethode (Brosh et al., 2005)	12
Abb. 3: Bilder der verwendeten Brackets in 25-facher Vergrößerung (Lichtmikroskop DSM 962 der Fa. Carl Zeiss, Oberkochen, Germany)	19
Abb. 4: Transbond XT	20
Abb. 5: Transbond Plus	20
Abb. 6: Opal bond	21
Abb. 7: Opal bond MV	22
Abb. 8: ConTec LC Set – Lichthärtendes Bracketadhäsiv	22
Abb. 9: ConTec SE	23
Abb. 10: Cutter (Modelbezeichnung: ODG-1000HWB, Densply, USA)	25
Abb. 11: Bracketentfernungszange (Modell ODG-345, Densply, USA)	26
Abb. 12: von links nach rechts: Carbidfinierer, Finierdiamant, Metallfinierer	27
Abb. 13: von links nach rechts Universalpolierer, Nylonbürste	27
Abb. 14: Lichtmikroskopie Einheit besteht aus Mikroskop, Rechner (Laptop) und Lichtquelle	28
Abb. 15: Optisches Oberflächenmesssystem bestehend aus Granitbasis, Messtisch, Lichtquelle, Steuersystem und Rechner	29
Abb. 16: Rasterelektronenmikroskop mit Steuereinheit und Rechner	29
Abb. 17: Vereinfachte Darstellung des Versuchsaufbaus der gesamten Studie. Stufen eins: Bracketentfernung mittel Cutter vs. Bracketentfernungszange, Stufe zwei: Kleberrestentfernung mittels Carbidfinierer 100.000 r/min vs. Carbidfinierer 30.000 r/min vs. Finiererdiamanten vs. Metallfinierer und Stufe drei: Politur mittels Nylonbürste vs. Universalpolierer	32
Abb. 18: Klebprozess	34
Abb. 19: Beschriftung und Bracketentfernung in Stufe 1	35
Abb. 20: Versuchsaufbau Stufe 1	36

Abb. 21: Oberflächenbeurteilung mit dem Lichtmikroskop und Berechnung des Restadhäsives mit Image J	38
Abb. 22: Oberflächenbeurteilung mit dem Profilometer.....	40
Abb. 23: Bracketkleben und Debondingprozess nach der ersten profilometrischen Untersuchung.....	41
Abb. 24: Darstellung des Adhäsivrestes auf der Zahnoberfläche nach Bracketentfernung mit BEZ, Probe 1; Transbond XT; Licht \times 16.....	49
Abb. 25: Darstellung des Adhäsivrestes auf der Zahnoberfläche nach Bracketentfernung mit BEZ, Probe 2; Transbond XT; Licht \times 16.....	49
Abb. 26: Darstellung des Adhäsivrestes auf der Zahnoberfläche nach Bracketentfernung mit Cutter, Probe 1; Transbond XT; Licht \times 16.....	49
Abb. 27: Darstellung des Adhäsivrestes auf der Zahnoberfläche nach Bracketentfernung mit Cutter; Probe 2; Transbond XT; Licht \times 16.....	49
Abb. 28: Darstellung des Adhäsivrestes auf der Zahnoberfläche nach Bracketentfernung mit BEZ; Probe 3; Transbond XT; Licht \times 16.....	50
Abb. 29: Darstellung des Adhäsivrestes auf der Zahnoberfläche nach Bracketentfernung mit Cutter; Probe 3; Transbond XT; Licht \times 16.....	50
Abb. 30: ARI-Grade des Restadhäsives für alle Kleber nach Bracketabnahme mittels Bracketentfernungszange	51
Abb. 31: ARI-Grade des Restadhäsives für alle Kleber nach Bracketabnahme mittels Cutter.	52
Abb. 32: Gegenüberstellung des Mittelwertes und der Standardabweichung der ARI-Werte (in Prozent) für die zwei geprüften Bracketentfernungsmethoden innerhalb der sechs verwendeten Adhäsive.....	55
Abb. 33: Interaktionsdiagramm zeigt die Interaktion zwischen BEZ und Cutter.	56
Abb. 34: Gegenüberstellung des Mittelwertes und der Standardabweichung der Rauheitswerte für die vier Adhäsiventfernungsverfahren innerhalb der sechs verwendeten Adhäsive.....	64
Abb. 35: Interaktionsdiagramm zeigt den Verlauf der verschiedenen Verfahrenskurven in Bezug auf die Oberflächenrauheit bei den Adhäsivgruppen eins bis sechs.....	65

Abb.36: Gegenüberstellung des Mittelwertes und der Standardabweichung der Bearbeitungszeiten für die vier Adhäsiventfernungsverfahren innerhalb der sechs verwendeten Adhäsive.....	69
Abb.37: Interaktionsdiagramm zeigt den Verlauf der verschiedenen Verfahrenskurven in Bezug auf die Bearbeitungszeit bei den Adhäsivgruppen 1 bis 6.	70
Abb. 38: Gegenüberstellung des Mittelwertes und der Standardabweichung der Rauheitswerte für die zwei Polierverfahren innerhalb der sechs verwendeten Adhäsive.	74
Abb. 39: Das Interaktionsdiagramm zeigt die Interaktion zwischen Universalpolierer (Up) und Nylonbürste (Ny) bei den Adhäsiven eins bis sechs.	74
Abb. 40: Gegenüberstellung des Mittelwertes und Standardabweichung der benötigten Zeit beim Polieren mit Universalpolierer (Up) und Nylonbürste (Ny).	78
Abb. 41: Interaktionsdiagramm zeigt die Interaktion zwischen den zwei untersuchten Polierverfahren Universalpolierer (Up) und Nylonbürste (Ny) bei den Adhäsiven eins bis sechs.....	78
Abb. 42: REM-Aufnahmen von unbehandelten Schmelzoberflächen in den Vergrößerungen x100	81
Abb. 43: REM-Aufnahmen von Schmelzoberflächen nach Anwendung der Carbidfinierer(100).	82
Abb. 44: REM-Aufnahmen von Schmelzoberflächen nach Anwendung der Carbidfinierer(30).	82
Abb.45: REM-Aufnahmen von Schmelzoberflächen nach Anwendung der Finierdiamanten.	83
Abb. 46: REM-Aufnahmen von Schmelzoberflächen nach Anwendung der Metallfinierer.	83
Abb. 47: REM-Aufnahmen von Schmelzoberflächen nach Anwendung der Nylonbürste.	84
Abb.48: REM-Aufnahmen von Schmelzoberflächen nach Anwendung der Universalpolierer.	84

9. Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Übersicht über verwendete Brackets mit den Herstellerangaben	18
Tab. 2: Übersicht über die Zusammensetzung der verwendeten Materialien. Angaben laut Hersteller	24
Tab. 3: Gruppenbildung nach der untersuchten Adhäsivmaterialien.....	33
Tab. 4: Probenbeschriftung in Stufe 1	35
Tab. 5: Probenbeschriftung in Stufe 2.....	39
Tabelle 6: Probenbeschriftung in Stufe drei	42
Tab. 7: Adhesive Remnant Index (ARI) nach (Artun und Bergland 1984).....	44
Tab. 8: Die ermittelten Werte für Restadhäsiv in mm ² und Prozentsatz unter Berücksichtigung der Basisfläche des Brackets (17,4 mm ²), sowie der dazugehörige ARI-Wert.	45
Tab. 9: Die ermittelten ARI-Grade des Adhäsivrestes unter Berücksichtigung der Basisfläche des Brackets (17,4 mm ²).....	50
Tab. 10: Die ermittelten Werte des Restadhäsives für das Material Transbond™XT in mm ² , der Prozentsatz unter Berücksichtigung der Basisfläche des Brackets (17,4 m ²) und die dazugehörigen ARI-Werte	53
Tab. 11: Deskriptive Statistik zu den ARI-Werten des Adhäsivrestes; dabei wurden Mittelwert, Standardabweichung, Median sowie minimale und maximale Werte ermittelt.	54
Tab. 12: Resultat einer multifaktoriellen Varianzanalyse zur Bestimmung des Restadhäsives bei der Bracketentfernung mittels BEZ bzw. Cutter bei den sechs verschiedenen Adhäsiven.	57
Tab.13: Ergebnisse des Mann-Whitney-Tests zwischen den Bracketentfernungsmethoden. Es zeigt sich ein signifikanter Unterschied nur bei dem Vergleich BEZ und Cutter in Gruppe eins	57
Tab. 14: Die ermittelten Rauheitswerte Ra für die Proben der Gruppen eins bis sechs vor dem Bracketkleben	59
Tab. 15: Die ermittelten Rauheitswerte Ra für die Proben der Gruppen eins bis sechs nach Adhäsiventfernung	60
Tab. 16: Differenz der Oberflächenrauheit Ra für die Proben der Gruppen eins bis sechs vor Bracketkleben und nach Adhäsiventfernung.....	61

Tab. 17: Deskriptive Statistik zu der Rauheitsdifferenz vor und nach der Bearbeitung mit den verschiedenen Adhäsiventfernungsverfahren.	63
Tab. 18: Resultat einer multifaktoriellen Varianzanalyse zur Bestimmung des Rauheitswertes für die vier Adhäsiventfernungsverfahren bei den sechs verschiedenen Adhäsiven.	66
Tab.19: Ergebnisse des Mann-Whitney-Tests zwischen den untersuchten Adhäsiventfernungsverfahren.	67
Tab.20: Deskriptive Statistik zu der Bearbeitungsdauer der untersuchten Adhäsiventfernungsverfahren.	68
Tab.21: Resultat einer multifaktoriellen Varianzanalyse zur Bestimmung der Bearbeitungszeit für die vier Adhäsiventfernungsverfahren bei den sechs verschiedenen Adhäsiven.	71
Tab.22: Ergebnisse des Mann-Whitney-Tests zwischen den untersuchten Adhäsiventfernungsverfahren in Bezug auf die Bearbeitungsdauer.....	72
Tab. 23: Deskriptive Statistik zu der Rauheitsdifferenz (Rauheitswert vor und nach der Politur) für die verschiedenen Polierverfahren innerhalb der Adhäsivgruppen eins bis sechs.....	73
Tab. 24: Resultat einer zweifaktoriellen Varianzanalyse zur Bestimmung des Rauheitswertes bei der Politur mittels Universalpolierer und Nylonbürste.	75
Tab. 25: Ergebnisse des Mann-Whitney-Tests zwischen den Polierverfahren innerhalb der Adhäsivgruppen eins bis sechs.....	76
Tab. 26: Deskriptive Statistik für die zwei Polierverfahren bezüglich der benötigten Zeit innerhalb der Adhäsive eins bis sechs.	77
Tab. 27: Resultat einer zweifaktoriellen Varianzanalyse zur Bestimmung der Bearbeitungsdauer bei Politur jeweils mit Universalpolierer und Nylonbürste.....	79
Tab. 28: Ergebnisse des Mann-Whitney-Tests zwischen den Polierverfahren in Bezug auf die Bearbeitungsdauer innerhalb der Adhäsivgruppen eins bis sechs.	80

10. Literaturverzeichnis

Ahrari F, Heravi F, Fekrazad R, Farzanegan F, Nakhaei S. Does ultra-pulse CO(2) laser reduce the risk of enamel damage during debonding of ceramic brackets? *Lasers Med Sci.* 2012;27:567–574

Al Shamsi A, Cunningham JL, Lamey PJ, Lynch E. Shear bond strength and residual adhesive after orthodontic bracket debonding. *Angle Orthod.* 2006;76:694–699

Alessandri Bonetti G, Zanarini M, Incerti Parenti S, Lattuca M, Marchionni S, Gatto MR. Evaluation of enamel surfaces after bracket debonding: an in-vivo study with scanning electron microscopy. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2011;140:696–702

Alessandri Bonetti G, Incerti Parenti S, Ippolito DR, Gatto MR, Luigi C. Effects of ultrasonic instrumentation with different scaler-tip angulations on the shear bond strength and bond failure mode of metallic orthodontic brackets. *Korean J Orthod.* 2014;44–49

Arici S, Minors C. The force levels required to mechanically debond ceramic brackets: an in vitro comparative study. *Eur J Orthod.* 2000;22:327–334

Artun J, Bergland S. Clinical trials with crystal growth conditioning as an alternative to acid-etch enamel pretreatment. *Am J Orthod.* 1984;85:333–340

Bishara SE, Fehr DE. Ceramic brackets: something old, something new, a review. *Semin Orthod.* 1997;3:178–188

Bishara SE, Trulove TS. Comparisons of different debonding techniques for ceramic brackets: an in vitro study. Part I. Background and methods. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 1990a;98:145–153

Bishara SE, Trulove TS. Comparisons of different debonding techniques for ceramic brackets: an in vitro study. Part II. Findings and clinical implications. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 1990b;98:263–273

Bishara SE, Fonseca JM, Boyer DB. The use of debonding pliers in the removal of ceramic brackets: force levels and enamel cracks. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 1995;108:242–248

Bishara SE, Gordan VV, VonWald L, Jakobsen JR. Shear bond strength of composite, mglass ionomer, and acidic primer adhesive systems. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 1999;115:24–28

Bordeaux JM, Moore RN, Bagby MD. Comparative evaluation of ceramic bracket base designs. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 1994;105:552–560

Brauchli LM, Baumgartner E-M, Ball J, Wichelhaus A. Roughness of enamel surfaces after different bonding and debonding procedures. *J Orofac Orthop.* 2011;72:61–67

Brosh T, Kaufman A, Balabanovsky A, Vardimon AD. In vivo debonding strength and enamel damage in two orthodontic debonding methods. *Journal of Biomechanics.* 2005;38:1107–1113

Brouns EM, Schopf PM, Kocjancic B. Electrothermal debonding of ceramic brackets. An in vitro study. *Eur J Orthod.* 1993;15:115–123

Brown C, Way DC. Enamel loss during orthodontic bonding and subsequent loss during removal of filled and unfilled adhesives. *Am J Orthod.* 1978;74:663–671

Campbell PM. Enamel surfaces after orthodontic bracket debonding. *Angle Orthod.* 1995;65:103–110

Cardoso LAM, Valdrighi HC, Vedovello Filho M, Correr AB. Effect of adhesive remnant removal on enamel topography after bracket debonding. *Dental Press J Orthod.* 2014;19:105–112

Cate JM ten. In vitro studies on the effects of fluoride on de- and remineralization. *J Dent Res.* 1990;69:614-619

Chen Y-L, Chen H-Y, Chiang Y-C, Chang H-H, Lin C-P. Effect of the precrack preparation with an ultrasonic instrument on the ceramic bracket removal. *J. Formos. Med. Assoc.* 2015;114:704-709

Cummings M, Biagioni P, Lamey PJ, Burden DJ. Thermal image analysis of electrothermal debonding of ceramic brackets: an in vitro study. *Eur J Orthod.* 1999;21:111–118

Dickinson PT, Powers JM. Evaluation of fourteen direct-bonding orthodontic bases. *Am J Orthod.* 1980;78:630–639

Diedrich P. The bracket-adhesive technic. Basis, clinical experiences and problems. *Zahnärztl Mitt.* 1979;69:1404–1410

Diedrich P. Die Bracketentfernung und anschließende Schmelzpolitur — eine rasterelektronenmikroskopische Studie. *Fortschritte der Kieferorthopädie.* 1980;41:491–502

Diedrich P. Enamel alterations from bracket bonding and debonding: a study with the scanning electron microscope. *Am J Orthod.* 1981;79:500–522

Diedrich P, Berg R, Haunfelder D, editors. *Therapie.* 4th ed. München: Elsevier Urban & Fischer; 2000

Eberhard H, Hirschfelder U, Nkenke E, Boulouchou O, Martus P. An in-vitro study of the bonding and fracture pattern of light-hardening, fluoride-releasing bonding materials in metal brackets. *Fortschr Kieferorthop.* 1994;55:304–310

Eliades T, Gioka C, Eliades G, Makou M. Enamel surface roughness following debonding using two resin grinding methods. *Eur J Orthod.* 2004;26:333–338

Field J, Waterhouse P, German M. Quantifying and qualifying surface changes on dental hard tissues in vitro. *J Dent.* 2010;38:182–190

Fischer-Brandies H, Kremers L, Reicheneder C, Kluge G, Häusler K. Über die Schmelzschädigung in Abhängigkeit von der Methode der Bracketentfernung. *Fortschritte der Kieferorthopädie.* 1993;54:64–70

Fjeld M, Ogaard B. Scanning electron microscopic evaluation of enamel surfaces exposed to 3 orthodontic bonding systems. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2006;130:575–581

Gracco A, Lattuca M, Marchionni S, Siciliani G, Alessandri Bonetti G. SEM-Evaluation of enamel surfaces after orthodontic debonding: a 6 and 12-month follow-up in vivo study. *Scanning*. 2015;37:322–326

Grunheid T, Sudit GN, Larson BE. Debonding and adhesive remnant cleanup: an in vitro comparison of bond quality, adhesive remnant cleanup, and orthodontic acceptance of a flash-free product. *Eur J Orthod*. 2015;37:497–502

Gwinnett AJ, Gorelick L. Microscopic evaluation of enamel after debonding: clinical application. *Am J Orthod*. 1977;71:651–665

Hannemann M, Diedrich P. Der Einsatz des Prophy-Jet®-Gerätes zur Schmelzpolitur nach der Bracketentfernung. *Fortschritte der Kieferorthopädie*. 1986;47:317–326

Hobson RS, McCabe JF, Hogg SD. Bond strength to surface enamel for different tooth types. *Dent Mater*. 2001;17:184–189

Holberg C, Winterhalder P, Holberg N, Wichelhaus A, Rudzki-Janson I. Orthodontic bracket debonding: risk of enamel fracture. *Clin Oral Investig*. 2014;18:327–334

Hong YH, Lew KK. Quantitative and qualitative assessment of enamel surface following five composite removal methods after bracket debonding. *Eur J Orthod*. 1995;17:121–128

Iijima M, Ito S, Yuasa T, Muguruma T, Saito T, Mizoguchi I. Bond strength comparison and scanning electron microscopic evaluation of three orthodontic bonding systems. *Dent Mater J*. 2008;27:392–399

Ireland AJ, Hosein I, Sherriff M. Enamel loss at bond-up, debond and clean-up following the use of a conventional light-cured composite and a resin-modified glass polyalkenoate cement. *Eur J Orthod*. 2005;27:413–419

Janiszewska-Olszowska J, Szatkiewicz T, Tomkowski R, Tandecka K, Grocholewicz K. Effect of orthodontic debonding and adhesive removal on the enamel - current knowledge and future perspectives - a systematic review. *Med. Sci. Monit*. 2014;20:1991–2001

Jonke E, Weiland F, Freudenthaler JW, Bantleon HP. Heat generated by residual adhesive removal after debonding of brackets. *World J Orthod.* 2006;7(4):357–60

Katona TR. A comparison of the stresses developed in tension, shear peel, and torsion strength testing of direct bonded orthodontic brackets. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 1997;112:244–251

Knösel M, Mattysek S, Jung K, Sadat-Khonsari R, Kubein-Meesenburg D, Bauss O, Ziebolz D. Impulse debracketing compared to conventional debonding. *Angle Orthod.* 2010;80:1036–1044

Knox J, Hubsch P, Jones ML, Middleton J. The influence of bracket base design on the strength of the bracket-cement interface. *J Orthod.* 2000;27:249–254

Korkhaus G. Zur Frage der Indikation der festsitzenden und herausnehmbaren Apparate in der Kieferorthopädie. *Fortschritte der Kieferorthopädie.* 1963;24:377–381

Kraut J, Radin S, Trowbridge HI, Emling RC, Yankell SL. Clinical evaluations on thermal versus mechanical debonding of ceramic brackets. *J Clin Dent.* 1991;2:92–96

Krell KV, Courey JM, Bishara SE. Orthodontic bracket removal using conventional and ultrasonic debonding techniques, enamel loss, and time requirements. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 1993;103:258–266

Kumar M, Maheshwari A, Lall R, Navit P, Singh R, Navit S. Comparative Evaluation of Shear Bond Strength of Recycled Brackets using Different Methods: An In vitro Study. *J Int Oral Health.* 2014;6:5–11

Leao Filho, Jorge Cesar Borges, Braz AKS, Araujo RE de, Tanaka OM, Pithon MM. Enamel Quality after Debonding: Evaluation by Optical Coherence Tomography. *Braz Dent J.* 2015;26:384–389

Liu X-l, Wang L-h, Wang M-f, Liu L, Wang Q, Zhai J-h. [Histomorphological effects of Nd:YAG laser for debonding ceramic brackets on rabbit pulp]. *Hua Xi Kou Qiang Yi Xue Za Zhi.* 2009;27:413–416

Lussi A, Hellwig E, Klimek J. Fluorides - mode of action and recommendations for use. *Schweiz Monatsschr Zahnmed.* 2012;122:1030–1042

Mhatre AC, Tandur AP, Reddy SS, Karunakara BC, Baswaraj H. Enamel Surface Evaluation after Removal of Orthodontic Composite Remnants by Intraoral Sandblasting Technique and Carbide Bur Technique: A Three-Dimensional Surface Profilometry and Scanning Electron Microscopic Study. *J Int Oral Health.* 2015;7:34–39

Mimura H, Deguchi T, Obata A, Yamagishi T, Ito M. Comparison of different bonding materials for laser debonding. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 1995;108:267–273

Nakamichi I, Iwaku M, Fusayama T. Bovine teeth as possible substitutes in the adhesion test. *J Dent Res.* 1983;62:1076–1081

Oesterle LJ, Shellhart WC, Belanger GK. The use of bovine enamel in bonding studies. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 1998;114:514–519

Oliver RG, Griffiths J. Different techniques of residual composite removal following debonding--time taken and surface enamel appearance. *Br J Orthod.* 1992;19:131–137

Osorio R, Toledano M, Garcia-Godoy F. Enamel surface morphology after bracket debonding. *ASDC J Dent Child.* 1998;65:313-317

Osorio R, Toledano M, Garcia-Godoy F. Bracket bonding with 15- or 60-second etching and adhesive remaining on enamel after debonding. *Angle Orthod.* 1999;69:45–48

Ozer T, Başaran G, Kama JD. Surface roughness of the restored enamel after orthodontic treatment. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2010;137:368–374

Pelka M, Trautmann S, Petschelt A, Lohbauer U. Influence of air-polishing devices and abrasives on root dentin-an in vitro confocal laser scanning microscope study. *Quintessence Int.* 2010;41:141-148

Pithon MM, Santos Fonseca Figueiredo D, Oliveira DD, Coqueiro RdS. What is the best method for debonding metallic brackets from the patient's perspective? *Prog Orthod.* 2015;16:17

Pont HB, Ozcan M, Bagis B, Ren Y. Loss of surface enamel after bracket debonding: an in-vivo and ex-vivo evaluation. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2010;138:387-389

Pus MD, Way DC. Enamel loss due to orthodontic bonding with filled and unfilled resins using various clean-up techniques. *Am J Orthod.* 1980;77:269-283

Radlanski RJ, Jager A, Zimmer B, Bertzbach F. Scanning electron microscopic research on the clinical use of interdental stripping. *Fortschr Kieferorthop.* 1990;51:117-122

Regan D, van Noort R. Bond strengths of two integral bracket-base combinations: an in vitro comparison with foil-mesh. *Eur J Orthod.* 1989;11:144-153

Retief DH, Denys FR. Finishing of enamel surfaces after debonding of orthodontic attachments. *Angle Orthod.* 1979;49:1-10

- Rouleau BD, Marshall GW, Cooley RO. Enamel surface evaluations after clinical treatment and removal of orthodontic brackets. *Am J Orthod.* 1982;81:423-426

Saito A, Namura Y, Isokawa K, Shimizu N. CO₂ laser debonding of a ceramic bracket bonded with orthodontic adhesive containing thermal expansion microcapsules. *Lasers Med Sci* 2015;30:869-874

Saleh F, Taymour N. Validity of using bovine teeth as a substitute for human counterparts in adhesive tests. *East Mediterr Health J.* 2003;9:201-207

Schopf P. *Curriculum Kieferorthopädie.* 2nd ed. Berlin: Quintessenz-Verl.; 1994.

Schuler FS, van Waes H. SEM-evaluation of enamel surfaces after removal of fixed orthodontic appliances. *Am J Dent.* 2003;16:390-394

Stratmann U, Schaarschmidt K, Wegener H, Ehmer U. The extent of enamel surface fractures. A quantitative comparison of thermally debonded ceramic and mechanically debonded metal brackets by energy dispersive micro- and image-analysis. *Eur J Orthod.* 1996;18:655-662

Strobl K, Bahns TL, Willham L, Bishara SE, Stwalley WC. Laser-aided debonding of orthodontic ceramic brackets. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 1992;101:152-158

- Su M-Z, Lai EH-H, Chang JZ-C, Chen H-J, Chang FH-F, Chiang Y-C, Lin C-P. Effect of simulated debracketing on enamel damage. *J. Formos. Med. Assoc.* 2012;111:560–566
- Tsuruoka T, Namura Y, Shimizu N. Development of an easy-debonding orthodontic adhesive using thermal heating. *Dent Mater J.* 2007;26:78–83
- Ulusoy C. Comparison of finishing and polishing systems for residual resin removal after debonding. *J Appl Oral Sci.* 2009;17:209–215
- Viazis AD, Cavanaugh G, Bevis RR. Bond strength of ceramic brackets under shear stress: an in vitro report. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 1990;98:214–221
- Vidor MM, Felix RP, Marchioro EM, Hahn L. Enamel surface evaluation after bracket debonding and different resin removal methods. *Dental Press J Orthod.* 2015;20:61–67
- Webb BJ, Koch J, Hagan JL, Ballard RW, Armbruster PC. Enamel surface roughness of preferred debonding and polishing protocols. *J Orthod.* 2016;43:39–46
- Yamada R, Hayakawa T, Kasai K. Effect of using self-etching primer for bonding orthodontic brackets. *Angle Orthod.* 2002;72:558–564
- Yassaei S, Soleimanian A, Nik ZE. Effects of Diode Laser Debonding of Ceramic Brackets on Enamel Surface and Pulpal Temperature. *J Contemp Dent Pract.* 2015;16:270–274
- Yassen GH, Platt JA, Hara AT. Bovine teeth as substitute for human teeth in dental research: a review of literature. *J Oral Sci.* 2011;53:273–282
- Zachrisson BU, Arthun J. Enamel surface appearance after various debonding techniques. *Am J Orthod.* 1979;75:121–127
- Zachrisson BU, Skogan O, Hoymyhr S. Enamel cracks in debonded, debanded, and orthodontically untreated teeth. *Am J Orthod.* 1980;77:307–319
- Zanarini M, Gracco A, Lattuca M, Marchionni S, Gatto MR, Bonetti GA. Bracket base remnants after orthodontic debonding. *Angle Orthod.* 2013;83:885–891

Zarrinnia K, Eid NM, Kehoe MJ. The effect of different debonding techniques on the enamel surface: an in vitro qualitative study. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 1995;108:284–293

Zielinski V, Reimann S, Jager A, Bourauel C. Comparison of shear bond strength of plastic and ceramic brackets. *J Orofac Orthop.* 2014;75:345–357

11. Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei Prof. Dr. Andreas Jäger, Direktor der Klinik und Poliklinik für Kieferorthopädie der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn sowie Priv.-Doz. Dr. Christoph Reichert für die freundliche Überlassung des Dissertationsthemas herzlich bedanken.

Ganz herzlichen Dank nochmals an Priv.-Doz. Dr. Christoph Reichert, der durch sein außerordentliches Engagement und seine Kompetenz in allen Fragen die herausragende Stütze dieser Arbeit war und mich bei der Durchführung der Arbeit mit wissenschaftlichem wie menschlichem Interesse betreut und jederzeit wohlwollend unterstützt hat.

Außerdem möchte ich meinen Eltern, meiner Frau und meinen Kindern, die mir meinen bisherigen Ausbildungs- und Lebensweg ermöglicht haben, für die ständige Motivation danken.

Herrn Prof. Dr. Christoph Bourauel danke ich für die Einführung in die Rasterelektronenmikroskopie und die wertvolle Hilfe bei der Erstellung der REM-Aufnahmen.

Frau Dr. Susanne Reimann danke ich für viele labortechnische Ratschläge.

Mein Dank gilt weiter Frau Anna Weber für die hilfreiche Unterstützung bei der Entwicklung der quantitativen Methodik.

Nicht zuletzt möchte ich all den Ungenannten vielmals danken, die als Korrektoren und als moralische Unterstützung in vielfältiger Weise zur Fertigstellung dieser Arbeit beigetragen haben.