

Aus der  
Poliklinik für Zahnerhaltung und Parodontologie  
der Klinik und Polikliniken für Zahn-, Mund- und Kieferkrankheiten der  
Universität Würzburg  
Direktor: Professor Dr. med. dent. B. Klaiber

**Fragmentbefestigung bei Kronenfrakturen -  
Eine In-vitro-Untersuchung zum Bruchverhalten  
verschiedener Dentinadhäsivsysteme**

Inaugural - Dissertation  
zur Erlangung der Doktorwürde der  
Medizinischen Fakultät  
der  
Bayerischen Julius-Maximilians-Universität  
zu Würzburg

vorgelegt von  
**Nicola Gründel**  
aus Overath

Würzburg, November 2007

Referent: Prof. Dr. med. dent. B. Klaiber

Korreferent: Prof. Dr. med. dent. Th. Holste

Dekan: Prof. Dr. med. M. Frosch

Tag der mündlichen Prüfung: 28.03.2008

Die Promovendin ist Zahnärztin.

Meinen Eltern



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Kronenfrakturen	1
1.1.1	Ätiologie, Häufigkeit und Klassifizierung von Kronenfrakturen	1
1.1.2	Therapiemöglichkeiten	2
1.2	Wiederbefestigung von Kronenfragmenten mit Dentinadhäsiven	7
1.2.1	Verschiedene Methoden der adhäsiven Fragmentbefestigung	7
1.2.2	Historische Entwicklung der Adhäsivtechnologie	9
1.2.3	Zusammensetzung, Wirkmechanismus und Verarbeitungsweise moderner Dentinadhäsivsysteme	13
1.3	Bruchverhalten nach Versagen der adhäsiven Fragmentbefestigung	16
1.3.1	Überlebensrate adhäsiv befestigter Fragmente	16
1.3.2	Verschiedene Möglichkeiten des Bruchverlaufs	18
<b>2</b>	<b>Fragestellung</b>	<b>19</b>

<b>3</b>	<b>Material und Methode</b>	<b>20</b>
3.1	Herkunft und Aufbewahrung der Versuchszähne	20
3.2	Vorangegangene In-vitro-Untersuchung zur Verbundfestigkeit verschiedener Dentinadhäsivsysteme nach Wiederbefestigung von Kronenfragmenten	20
3.3	Markieren und Einfärben der Versuchszähne	24
3.4	Fotografieren der Bruchflächen	26
3.5	Analysen der Bruchflächen	27
3.5.1	Nachbearbeitung der Fotos	27
3.5.2	Flächenberechnungen	28
3.5.3	Fallbeispiel	32
3.6	Statistische Auswertung	37
3.6.1	Normalverteilung	37
3.6.2	Nichtparametrische Tests	38
<b>4</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>39</b>
4.1	Bruchverhalten der getesteten Dentinadhäsivsysteme	39
4.1.1	Frakturmodi der einzelnen Versuchszähne	39

<b>4.1.2</b>	<b>Mittelwerte der Frakturmodi aller Versuchszähne innerhalb einer Gruppe</b>	<b>43</b>
<b>4.2</b>	<b>Statistische Auswertung</b>	<b>48</b>
<b>4.2.1</b>	<b>Normalverteilung</b>	<b>48</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Nichtparametrische Tests</b>	<b>49</b>
<b>5</b>	<b>Diskussion</b>	<b>55</b>
<b>5.1</b>	<b>Beurteilung von Material und Methode</b>	<b>55</b>
<b>5.1.1</b>	<b>Auswahl und Lagerung der Versuchszähne</b>	<b>56</b>
<b>5.1.2</b>	<b>Bruchmethodik und Wiederbefestigung des Fragments</b>	<b>58</b>
<b>5.1.3</b>	<b>Einfärben der Versuchszähne</b>	<b>60</b>
<b>5.1.4</b>	<b>Fotografieren der Bruchflächen und Nachbearbeitung der Bilder</b>	<b>60</b>
<b>5.1.5</b>	<b>Bruchflächenbestimmungen</b>	<b>61</b>
<b>5.2</b>	<b>Beurteilung der Ergebnisse</b>	<b>63</b>
<b>5.2.1</b>	<b>Interpretation der möglichen Frakturmodi</b>	<b>63</b>
<b>5.2.2</b>	<b>Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Dentinadhäsivsystemen und den auftretenden Frakturverläufen</b>	<b>65</b>
<b>5.2.3</b>	<b>Deutung des unterschiedlichen Bruchverhaltens im Schmelz- und Dentinbereich</b>	<b>69</b>

<b>6</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>72</b>
<b>7</b>	<b>Literatur</b>	<b>74</b>
<b>8</b>	<b>Anhang</b>	<b>91</b>
<b>8.1</b>	<b>Abkürzungen</b>	<b>91</b>
<b>8.2</b>	<b>Abbildungen</b>	<b>92</b>
<b>8.3</b>	<b>Herstellerverzeichnis</b>	<b>93</b>

**Danksagung**

**Lebenslauf**

# 1 Einleitung

## 1.1 Kronenfrakturen

### 1.1.1 Ätiologie, Häufigkeit und Klassifizierung von Kronenfrakturen

Traumatisch bedingte Zahnverletzungen nehmen im Vergleich zu Karies- oder Parodontalerkrankungen einen immer größeren Stellenwert in der zahnmedizinischen Behandlung von Kindern und Jugendlichen ein <sup>2</sup>. Statistisch betrachtet erleidet jeder vierte Jugendliche ein dentales Trauma <sup>13</sup>. Bedingt durch das veränderte Freizeitverhalten unserer Gesellschaft ist auch zukünftig mit einer weiteren Zunahme dieser Verletzungen zu rechnen <sup>10, 49</sup>. Dabei ist die unkomplizierte Kronenfraktur (ohne Pulpa-beteiligung) mit ca. 90% die häufigste traumatische Verletzung der Zahnhartsubstanz im bleibenden Gebiss <sup>72</sup>. Als Hauptursache für Kronenfrakturen gelten Sturzverletzungen. Aber auch Spiel- und Sportverletzungen, Autounfälle, Fremdkörper-einwirkung sowie epileptische Anfälle oder Rohheitsdelikte können zu traumatischen Zahnverletzungen führen <sup>8, 49, 65, 99</sup>.

Während in den ersten Lebensjahren Zahnverletzungen nur selten auftreten, nimmt die Verletzungsgefahr im Krabbelalter zu und steigt mit Erlernen des Laufens weiter an. Die Höhepunkte an Zahntraumata liegen zwischen zwei und vier Jahren sowie zwischen acht und zehn Jahren. Dabei sind bis zum siebten Lebensjahr Zahnverletzungen bei Jungen und Mädchen ungefähr gleich häufig. Erst danach nimmt der Anteil an dentalen Traumata bei Jungen deutlich zu. Sie erleiden doppelt so häufig Verletzungen im bleibenden Gebiss wie Mädchen <sup>8, 74</sup>. Dabei sind die mittleren Oberkiefer-Inzisivi am häufigsten betroffen, speziell deren mesiale Ecken <sup>8, 134, 163</sup>. Der Frakturverlauf ist sehr variabel. Oft dehnt sich eine mesiale oder distale Querfraktur auf der palatinalen Seite nach zervikal aus. In seltenen Fällen kann der Schmelz in seiner ganzen Dicke von der Dentinunterlage abgeplatzt sein <sup>158</sup>. Ein prädisponierender Faktor für traumatische Zahnverletzungen ist vor allem eine starke Labialstellung der Frontzähne mit ungenügendem Lippenschluss <sup>8, 25, 49</sup>. Untersuchungen haben gezeigt, dass bei Kindern

mit vorstehenden Schneidezähnen die Inzidenz von Frontzahntraumata nahezu doppelt so hoch ist wie bei Kindern mit normgerechter Okklusion <sup>8</sup>.

Kronenfrakturen kann man sowohl in der ersten als auch in der zweiten Dentition, anhand der beteiligten Zahnstrukturen folgendermaßen einteilen: Handelt es sich lediglich um einen Sprung im Zahnschmelz ohne Verlust von Zahnhartsubstanz, spricht man von einer Kroneninfraktion. Eine Fraktur, die nur im Schmelz oder auch im Dentin verläuft, aber ohne Eröffnung der Pulpa einhergeht, bezeichnet man als unkomplizierte Kronenfraktur. In ca. 15% aller Kronenfrakturen kommt es allerdings zur Pulpaeröffnung. In diesem Fall spricht man von einer komplizierten Kronenfraktur. Weitere Einteilungen können vorgenommen werden, wenn die Wurzel von der Fraktur betroffen ist. Man spricht dann von unkomplizierten und komplizierten Kronen-Wurzel-Frakturen bzw. isolierten Wurzelfrakturen, wenn ausschließlich die Wurzel beteiligt ist. Statistisch gesehen liegt eine Frakturbeteiligung der Wurzel allerdings nur in 5% der Fälle vor. Neben isolierten Zahnverletzungen sind auch begleitende Verletzungen des umliegenden Parodonts, wie Konkussion, Subluxation, Intrusion, Extrusion, laterale Luxation, bis hin zur Avulsion möglich <sup>8, 141, 158</sup>.

### 1.1.2 Therapiemöglichkeiten

Die zunehmende Anzahl an traumatischen Verletzungen im Kindes- und Jugendalter stellt eine große therapeutische Herausforderung dar, insbesondere die Versorgung der komplizierten und unkomplizierten Frontzahnfrakturen. Häufig existieren mehrere Ansätze zur Behandlung einer Kronenfraktur. Vorab ist mittels klinischer und radiologischer Untersuchung das Ausmaß der Läsion festzustellen. Eine sorgfältige Suche nach kleineren Pulpaeröffnungen sowie die Beurteilung der Dentinfreilegung sollten neben der Vitalitätskontrolle und Feststellung der Zahnbeweglichkeit nicht fehlen <sup>8</sup>. Ebenfalls abzuwägen ist, ob es sich zusätzlich um eine horizontale oder vertikale Fraktur innerhalb der Wurzel handelt, die die Prognose des betroffenen Zahns beeinträchtigen oder einen langfristigen Zahnerhalt ausschließen könnte <sup>163</sup>. Handelt es sich lediglich um eine kleine Schmelzfraktur, so muss diese nicht zwingend restauriert werden. In manchen Fällen reicht die Glättung der Schneidekanten aus. Kombinierte

Verletzungen von Schmelz und Dentin oder sogar der Pulpa verlangen dagegen immer nach einer baldigen Abdeckung, um eine Infektion der Pulpa durch Invasion von Bakterien und Toxinen über die Dentinwunde oder die offene Pulpa zu verhindern<sup>11, 38</sup>. Das Röntgenbild bietet wichtige Informationen über die Ausdehnung der Pulpa und den Entwicklungsgrad der Wurzel, was für die Wahl der Therapie von entscheidender Bedeutung sein kann<sup>141</sup>. Wichtig ist die rasche Wiederherstellung der Kronenanatomie, um eine labiale Protrusion des frakturierten Zahns, ein Wandern oder Kippen zur Frakturseite bzw. ein Elongieren der Antagonisten zu verhindern<sup>8</sup>. Zudem können sich unbehandelte Frontzahnfrakturen negativ auf Sprache, Kaufunktion und Psyche auswirken<sup>18, 82, 123</sup>. Der Erhalt tief zerstörter Zähne bei unvollendetem Kieferwachstum, kann zur Ermöglichung einer späteren Implantation ebenfalls von Bedeutung sein<sup>1</sup>.

Die Rekonstruktion der Zahnkrone kann sowohl konservierend als auch prothetisch erfolgen und muss im Falle einer Kronen-Wurzelfraktur gegebenenfalls durch chirurgische oder kieferorthopädische Behandlungsmaßnahmen ergänzt werden<sup>1</sup>. Dank der Etablierung von Dentinadhäsiven in der Zahnheilkunde haben sich in den letzten Jahrzehnten die konservierenden Behandlungsmöglichkeiten von Kronenfrakturen deutlich verbessert. Die schnellste und günstigste Therapie ist die direkte Restauration<sup>5, 18, 26, 91, 94, 118</sup>. Sie kann meist in einer Behandlungssitzung und ohne anfallende Laborkosten realisiert werden<sup>68</sup>. Bei Erhaltung und Reponierbarkeit des Fragments stellt heutzutage, vor allem bei Kindern und Jugendlichen, die adhäsive Wiederbefestigung die Methode der Wahl dar<sup>119</sup>. Das „Reattachement“ frakturierter Zahnstücke ist äußerst zahnhartsubstanzschonend. Die Gefahr der Pulpenschädigung durch ein Präparationstrauma wird hierdurch ausgeschlossen<sup>131</sup>. Das Abrasionsverhalten des wiederbefestigten Fragments entspricht dem der Restbezaahnung<sup>5, 26, 43, 91, 94</sup>. Die ursprüngliche Zahnform und damit auch die Kontaktpunkte zu den Nachbarzähnen können exakt wiederhergestellt werden<sup>12, 18, 26, 91</sup>. Zudem wird der Patient finanziell nicht belastet und die Behandlung kann innerhalb einer Sitzung abgeschlossen werden. Die emotionale Reaktion der Patienten auf diese Prozedur ist meist sehr positiv<sup>18, 26, 81, 91</sup>. Eine Wiederbefestigung des eigenen Zahnfragments ist oft psychologisch akzeptabler als eine Kronenrestauration. Der ästhetische Aspekt wird als gut bezeichnet<sup>94</sup>. Der frakturierte Anteil passt farblich hervorragend zum Rest-

zahnstumpf und die Transluzens des inzisalen Anteils kann ebenfalls erhalten werden<sup>18, 26, 91, 94</sup>. Ästhetische Beeinträchtigungen im Bereich der Gingiva scheinen bei einer adhäsiven Fragmentbefestigung geringer auszufallen als bei prothetischen Kronenrestauration, da keine Kronenränder oder Stufen entstehen<sup>84</sup>.

Die Wiederbefestigung von Kronenfragmenten birgt aber auch einige Schwierigkeiten. So ist der ästhetische Erfolg nicht in allen Fällen gewährleistet. Wurde das Fragment vor der Befestigung über einen längeren Zeitraum trocken gelagert, verliert es durch Dehydration die originale Farbe und Transluzens<sup>166</sup>. Auch die Sichtbarkeit der Verbindungslinie zwischen Fragment und Zahn ist möglich<sup>94</sup>. Als größter Nachteil wird allerdings die ungewisse Prognose aufgrund der Frakturwahrscheinlichkeit durch ein erneutes Trauma genannt<sup>92</sup>.

Ist das Fragment jedoch nicht erhalten oder aufgrund einer Trümmerfraktur nicht erhaltungswürdig, kann die verloren gegangene Zahnhartsubstanz mit Hilfe eines Kompositaufbaus im Sinne einer Klasse-IV-Füllung ersetzt werden. Dank der „Ästhetik-Komposite“ und speziellen Matrizentechniken lassen sich selbst komplexe Frontzahntraumata mit dieser Behandlungsmethode ästhetisch ansprechend versorgen<sup>1, 69</sup>.

Eine wesentlich aufwendigere und kostspieligere Therapiemöglichkeit bei Kronenfrakturen ist die indirekte Restauration mit laborgefertigten Versorgung, im klassischen Sinne mit einer Krone<sup>94</sup>. Die Belastbarkeit des mit einer Krone restaurierten Zahns ist vergleichbar mit der gesunder Zähne<sup>3, 26</sup>. Trotzdem sollte bei Jugendlichen mindestens bis zum 18.-20. Lebensjahr mit der Anfertigung einer Krone gewartet werden. Vorher ist eine Kronenpräparation aufgrund der ausgedehnten Pulpa, des noch nicht abgeschlossenen Wurzelwachstums, der kurzen klinischen Krone und der parodontalen Verhältnisse kontraindiziert. Außerdem besteht das Risiko einer ästhetischen Beeinträchtigung durch einen altersbedingten Attachmentverlust. Auch Gingivarezessionen infolge überkonturierter Kronen sind möglich<sup>141</sup>. Daher ist gerade für Jugendliche die Erweiterung der direkten Therapiemöglichkeiten durch die Einführung der Adhäsivtechnik ein deutlicher Fortschritt. Früher, vor Einzug der

Dentinadhäsive, wurde der Zeitraum bis zur definitiven Versorgung mit einer Verblendkrone mittels ästhetisch unbefriedigender Stahlkronen überbrückt<sup>9, 11, 139</sup>.

Eine elegante und ästhetisch ansprechende Alternative für die Versorgung einer Kronenfraktur bietet mit seiner minimal-invasiven Präparationsform das Veneer<sup>94</sup>. Adhäsiv wiederbefestigte Fragmente, versorgt mit Veneers, zeigten sich oft belastbarer als wiederbefestigte Fragmente allein und sogar als gesunde Zähne. ANDREASEN et al. (1992) und CHU et al. (2000) schlagen daher Veneers als verstärkendes Element nach direkter Restauration vor<sup>4, 29</sup>. Eine neuartige Variante des Veneers ist das keramische Edge up, auch „Mini-Veneer“ oder „frontale Keramikteilkrone“ genannt. Es handelt sich um eine ästhetisch anspruchsvolle laborgefertigte Restauration ohne großen Zahnhartsubstanzverlust und ohne die Gefahr iatrogenen Pulpenschädigungen. Große Frontzahnfüllungen, Schmelzaplasien oder Parafunktionen wie Bruxismus sind allerdings Kontraindikationen für diese Behandlungsmethode<sup>77</sup>.

Im Falle einer Wurzelkanalbehandlung kann eine Stiftverankerung zur Stabilisierung einer konservierenden oder prothetischen Restauration nach Kronenfraktur beitragen<sup>1</sup>.

Bei Kronen-Wurzel-Frakturen mit subgingivalem Frakturverlauf kann eine chirurgische Darstellung derselben erforderlich werden<sup>10</sup>. Nach sulkärer Inzision und Aufklappung des gebildeten Mukoperiostlappens kann die Fragmentbefestigung oder der Kompositaufbau erfolgen. Bei iso- oder subossärem Frakturverlauf kann im nicht sichtbaren Bereich durch Ostektomie im Sinne einer chirurgischen Kronenverlängerung der Frakturverlauf freigelegt werden<sup>1</sup>. Bei ungünstigen Frakturverläufen im sichtbaren Bereich kann der Frakturverlauf durch eine chirurgische Extrusion dargestellt werden, indem man den Zahn mit einer Zange vorsichtig nach koronal luxiert, falls notwendig auch rotiert, und in der neuen Lage für sechs Wochen schient. Diese Behandlung setzt allerdings eine lange Wurzel und die Restaurierbarkeit des Zahns mit einem Kronen-Wurzel-Verhältnis von mindestens eins zu eins voraus. Eine chirurgische Extrusion ist zwar sehr kostengünstig und schnell zu realisieren, verursacht jedoch einen Vitalitätsverlust der Pulpa sowie eine starke Schädigung des Parodontiums. Eine Ersatzresorption

(Ankylose) durch die forcierte Luxation der Wurzel ist dabei ebenfalls nicht auszuschließen<sup>1, 8</sup>.

Eine ästhetisch ansprechendere und atraumatischere Methode zur Darstellung des Frakturverlaufs im sichtbaren Bereich bietet die kieferorthopädische Extrusion. Auch hier sind eine lange Wurzel und die anschließende Restaurierbarkeit des Zahns mit einem Kronen-Wurzel-Verhältnis von mindestens eins zu eins Voraussetzung. Im Gegensatz zur chirurgischen Extrusion kann die Pulpa aber vital erhalten werden. Nachteilig bei dieser Behandlung sind höhere Kosten und eine längere Behandlungsdauer. Des Weiteren kann durch das Folgen von parodontalem Gewebe bei der kieferorthopädischen Extrusion eine ungünstige Rot-Weiß-Ästhetik die Folge sein. Dies kann eine parodontalchirurgische Korrektur des Gingivaverlaufs vor Restauration des Zahns erforderlich machen<sup>1, 8</sup>.

Schlussendlich hängt die Wahl der Behandlungsmethode von der Komplexität der Fraktur sowie vom Alter und der Compliance des Patienten ab. Wichtig ist in allen Fällen die regelmäßige Nachuntersuchung, um Komplikationen seitens der Pulpa rechtzeitig zu erkennen. Empfohlen werden Intervalle von ein, zwei und zwölf Monaten nach dem Unfall<sup>11</sup>.

## 1.2 Wiederbefestigung von Kronenfragmenten mit Dentinadhäsiven

### 1.2.1 Verschiedene Methoden der adhäsiven Fragmentbefestigung

Die adhäsive Wiederbefestigung von Kronenfragmenten stellt heutzutage nicht nur die einfachste und kostengünstigste, sondern auch gleichzeitig die ästhetisch und funktionell beste Therapiemöglichkeit dar<sup>5, 26, 43, 91, 119</sup>. Voraussetzung für diese Behandlung ist der Erhalt des Zahnstücks, was dank der verbesserten Patientenaufklärung immer häufiger der Fall ist<sup>1</sup>. Vor der Wiederbefestigung muss die Art und die Dauer der Lagerung des Fragments geklärt werden. Optimalerweise wurde es sofort nach dem Sturz feucht aufbewahrt. In diesem Fall und im Falle einer Trockenlagerung von weniger als einer Stunde kann bezüglich der adhäsiven Befestigung von einer guten Verbundfestigkeit ausgegangen werden. Zahnstücke, die länger als 24 Stunden ausgetrocknet sind, sollten vor der Wiederbefestigung mindestens 24 Stunden durch Lagerung in Wasser oder physiologischer Kochsalzlösung „wiederbefeuchtet“ werden. Es ist empfehlenswert, alle mitgebrachten Fragmente während den klinischen und röntgenologischen Untersuchungen in physiologischer Kochsalzlösung aufzubewahren. Verschmutzungen, z.B. durch Sturzverletzungen im Freien, können mit Hilfe eines natriumbicarbonathaltigen Pulverstrahlgeräts (z.B. Prophyflex<sup>®</sup> Kavo) entfernt werden<sup>1, 44</sup>.

Für die Befestigung des Fragments mit Hilfe von Dentinadhäsiven und Kompositen gibt es verschiedene Techniken. Hier verlangt das Vorliegen einer komplizierten oder unkomplizierten Kronenfraktur nach einer differenzierten Behandlung. Liegt keine Beteiligung der Pulpa vor, sollte zunächst der Frakturverlauf vollständig dargestellt werden. Falls sich der Frakturverlauf nach subgingival ausgedehnt hat, muss der Versorgung eine elektrochirurgische Gingivektomie oder ggf. ein parodontalchirurgischer oder kieferorthopädischer Eingriff vorausgehen<sup>8, 10</sup>. Aufgrund der Techniksensitivität der Adhäsivsysteme folgt eine Trockenlegung mit Hilfe von Retraktionsfäden und Watterollen (relative Trockenlegung) oder, optimalerweise, mit Hilfe von Kofferdam (absolute Trockenlegung)<sup>1</sup>, um während der Konditionierung eine Kontamination der Frakturfläche mit Speichel, Blut o.ä. zu vermeiden<sup>163</sup>. Die

Entscheidung über die Wahl des Befestigungsmaterials wird anhand der Passgenauigkeit des Fragments gefällt. Während ein passgenaues Fragment nur mit einem gefüllten Dentinadhäsiv restauriert werden sollte <sup>7, 17, 91, 95, 129</sup>, empfiehlt sich für unvollständige Fragmente die kombinierte Wiederbefestigung mit Dentinadhäsiven und stopfbaren oder fließfähigen Kompositen. Für die Wahl des Dentinadhäsivs stehen mehrere Produkte zur Auswahl, von denen einige im Zuge der vorliegenden Arbeit getestet werden. Die weiteren Schritte zur Vorbereitung der Wiederbefestigung folgen den Herstellerangaben des Adhäsivs und werden immer jeweils am Zahn und am Fragment durchgeführt. Zur besseren Handhabung kann die Schneidekante des Fragments mit Bonding (z.B. Heliobond<sup>®</sup> Ivoclar Vivadent AG) an einem Kugelstopfer befestigt werden. Wenn Fragment und Zahn passgenau aufeinander reponiert sind, kann die Lichthärtung mit Hilfe einer Polymerisationslampe erfolgen. Nach der Befestigung können die Überschüsse mit einem sichelförmigen Skalpell entfernt und der Frakturspalt poliert werden <sup>1</sup>.

Handelt es sich um eine sehr tiefe unkomplizierte oder komplizierte Kronenfraktur, so wird empfohlen zunächst eine temporäre Versorgung, abhängig vom Alter des Betroffenen, vorzunehmen <sup>11</sup>. Falls eine Pulpaeröffnung von weniger als 48 Stunden vorliegt, sollte bei nicht abgeschlossenem Wurzelwachstum die Pulpa mit einem Diamanten angefrischt werden und eine direkte Überkappung mit einem Calciumhydroxidzement oder eine partielle Pulpotomie vorgenommen werden. Ist die Pulpa allerdings länger als 48 Stunden eröffnet, wird bei nicht abgeschlossenem Wurzelwachstum lediglich eine Pulpotomie mit Entfernung der Kronenpulpa empfohlen <sup>8</sup>. Erst bei einer irreversiblen Pulpitis sollte man von einer Pulpektomie Gebrauch machen und mit Hilfe von wiederholten Calciumhydroxideinlagen eine Apexifikation induzieren, um eine Wurzelkanalfüllung zu ermöglichen <sup>38, 141</sup>. Bei Zähnen mit abgeschlossenem Wurzelwachstum kann bei einer Exposition der Pulpa von mehr als 48 Stunden abgewogen werden, ob eine Vitalerhaltung der Pulpa realisierbar und gewünscht ist. Ansonsten kann in diesem Fall eine Wurzelkanalbehandlung durchgeführt werden <sup>11</sup>. Vor der Wiederbefestigung muss das Fragment im Bereich des Überkappungsmaterials ausgeschliffen bzw., im Falle einer Wurzelkanalfüllung, zwei bis drei Millimeter

zapfenförmig präpariert werden. Die weitere Vorgehensweise zur adhäsiven Fragmentbefestigung erfolgt nach dem oben beschriebenen Prinzip <sup>1</sup>.

Während einige Autoren bei der Wiederbefestigung von Kronenfragmenten auf die alleinige Anwendung von Adhäsivsystemen vertrauen <sup>7, 17, 73, 90, 100</sup>, empfehlen andere die zusätzliche Verwendung eines Komposits <sup>6, 43, 81</sup>. Die Verwendung parapulpärer Stifte zur Erhöhung der Stabilität zwischen Zahn und Fragment ist als nicht mehr zeitgemäß einzuschätzen <sup>137</sup>.

Manche Autoren empfehlen auch eine Präparation vor oder/ und nach der Wiederbefestigung, um die Bruchfestigkeit, die Ästhetik und die Lebensdauer der Versorgung zu verbessern <sup>119</sup>. Hierzu werden unterschiedliche Präparationstechniken eingesetzt, um die Klebefläche zu vergrößern. Die durch die Präparation entstandenen Kavitäten, meist im Schmelz, aber auch im Dentin, werden mit Komposit gefüllt. Einige Untersuchungen zeigen, dass bei zusätzlicher Präparation vor der Wiederbefestigung bessere Haftwerte ermittelt werden <sup>33, 117, 118</sup>. Allerdings wirkt sich die Präparation negativ auf eine genaue Reponierung des Fragments und unter Umständen auch auf die Ästhetik aus <sup>116, 117, 166</sup>. Auch die erhöhte Stabilität wird von einigen Autoren in Frage gestellt <sup>31, 166</sup>.

### **1.2.2 Historische Entwicklung der Adhäsivtechnologie**

Eine chemische oder mikromechanische Bindung zwischen Füllungsmaterial und Zahn aufzubauen, war lange Zeit ein große Herausforderung für die Wissenschaft <sup>128</sup>. Den Grundstein der adhäsiven Restauration legte BUONOCORE (1955) mit der Beschreibung der Schmelz-Ätz-Technik. Die Behandlung des Zahnschmelzes mit Säuren sollte über ein retentives Ätzmuster die Verbundfläche und damit die Haftung zwischen Zahn und Füllungsmaterial vergrößern <sup>143</sup>. Kompositrestaurationen konnten nun zwar adhäsiv befestigt werden, allerdings bezog sich diese mikroretentive Verankerung ausschließlich auf den Schmelz. Wünschenswert war es allerdings, durch eine äquivalente Dentinhaftung die gesamte Fläche der präparierten Kavität zur Retention nutzen zu können <sup>52</sup>.

Die chemische und strukturelle Zusammensetzung des Dentins lässt eine direkte mikromechanische Haftung eines Kompositmaterials allerdings nicht zu<sup>64</sup>. Im Gegensatz zum Schmelz ist das Dentin weitaus komplexer aufgebaut. Es besteht neben 70% Hydroxylapatit zu 30% aus organischen Bestandteilen, vor allem Kollagen<sup>128</sup>. Es besitzt Dentinkanälchen mit Dentinliquor und Odontoblastenfortsätzen, zudem sind die Hydroxylapatitkristalle nicht regulär angeordnet<sup>143</sup>. Durch den Dentinliquor entsteht ein hydrophiler Charakter der den Verbund zu hydrophoben Kompositmaterialien erschwert<sup>20</sup>. Bei der Kavitätenpräparation bildet sich eine 1-5µm dicke Schmierschicht, die durch den Verschluss der Dentintubuli zwar den Austritt von Liquor verhindert, aber andererseits keine feste Verbindung zwischen adhäsivem Restaurationsmaterial und Dentin zulässt<sup>128</sup>. Entfernt man diese Schmierschicht, kommt es zu einer Eröffnung der Dentinkanälchen und somit zu einem Austritt von Dentinliquor und einer Verbindung zur Pulpa<sup>143</sup>. Es galt also einen Dentinhaftvermittler zu finden, der einen Verbund zwischen hydrophilem Dentin und hydrophoben Restaurationsmaterial herstellt und nebenbei eine gute Pulpaverträglichkeit aufweist<sup>64</sup>.

Die Entwicklung dieser Dentinadhäsivsysteme begann 1965 und hält bis zum heutigen Tag an. Inzwischen kann man sechs Generationen unterscheiden, die vor allem in der Komplexität ihrer Verarbeitung variieren<sup>52, 128</sup>.

Dentinhaftvermittler der **ersten Generation** beruhten auf einer primär chemischen Bindung zwischen Adhäsiv und Dentin. Bifunktionelle Moleküle sollten an organischen bzw. anorganischen Bestandteilen des Dentins binden. Doch die Ergebnisse waren nicht zufrieden stellend, da sich die Schmierschicht in feuchtem Milieu auflöste und dadurch die Haftfestigkeit reduziert wurde<sup>60</sup>.

Anfang der 80er Jahre kamen die Adhäsivsysteme der **zweiten Generation** auf den Markt<sup>143</sup>. Hier sollte die Schmierschicht als isolierende Barriere belassen und durch Infiltration von hydrophilen Monomeren in die Haftung einbezogen werden<sup>20</sup>. Auch dieser Verbund zwischen hydrophilem Dentin und hydrophobem Material war entweder nur relativ schwach oder unterlag durch hydrolytische Zersetzungsprozesse der nicht

eliminierten Schmierschicht einer schnellen Alterung<sup>20, 64</sup>. Die ersten beiden Generationen haben nie das Potential für eine breite klinische Anwendung erreicht<sup>52</sup>.

Dentinhaftvermittler der **dritten Generation** können wie auch die folgenden Generationen zu den modernen Adhäsivsystemen gezählt werden, da sie demineralisierende Bestandteile enthalten und somit eine mikromechanische Verankerung zwischen hydrophilem Dentin und hydrophobem Kompositmaterial herstellen<sup>64</sup>. Da man Mitte bis Ende der 80er Jahre noch davon ausging, dass es bei der Anwendung von Phosphorsäure auf Dentin zur Pulpaschädigung kommt<sup>143</sup>, werden bei den Adhäsivsystemen der dritten Generation Schmelz und Dentin separat konditioniert. Der Schmelz wird hierbei selektiv mit Phosphorsäure, das Dentin mit einem selbstkonditionierenden Primer, der eine milde Säure enthält (z.B. Maleinsäure, Glutarsäure, Dicarbonsäuren oder anorganische Säuren), vorbehandelt. Anschließend wird separat ein Dentinadhäsiv sowie teilweise ein zusätzlicher Schmelzbonder aufgetragen. Durch die vielen Arbeitsschritte kommt es zwar in vitro zu sehr guten Hafteigenschaften zwischen Zahn und Komposit, aber diese klassischen Mehr-Flaschen-Systeme sind in ihrer Anwendung sehr kompliziert, insbesondere die selektive Vorbehandlung dünner Schmelzränder lässt sich schwer realisieren<sup>64</sup>. Vor allem in minimal-invasiven Kavitäten erscheint ein simultanes Konditionieren beider Zahnhartsubstanzen wünschenswert<sup>52</sup>.

Diesem Wunsch wurde mit der Einführung der **vierten Generation** Dentinadhäsive Rechnung getragen<sup>52</sup>. Grundlage war die Erkenntnis von FUSAYAMA (1980), dass die Säurebehandlung des Dentins keine Pulpaschädigung zur Folge hatte, sondern bei der sogenannten „Total-Ätz-Technik“ die Dentinwunde durch Primer und Adhäsiv versiegelt wird und damit Pulpairritationen reduziert werden<sup>128</sup>. Bei der totalen Ätz-Technik werden Schmelz und Dentin simultan mit einer Säure vorbehandelt. Bei den gängigen Systemen wird dazu 20- bis 37%ige Phosphorsäure verwendet, wobei die Säure erst 30 Sekunden nur auf dem Schmelz, dann weitere 15-20 Sekunden auf Schmelz und Dentin einwirken soll, um ein Überätzen des Dentins zu vermeiden. Im Anschluss an die Schmelz- und Dentinkonditionierung wird auch hier ein Primer und danach ein Adhäsiv aufgebracht<sup>64</sup>. Durch die simultane Konditionierung wird die

Verarbeitung deutlich erleichtert, zudem verbesserten sich die Haftwerte um ein Vielfaches<sup>128</sup>. Allerdings ist dieses System durch die vielen Anwendungsschritte sehr fehleranfällig, man verlangte nach „Ein-Flaschen-Systemen“<sup>64, 111, 143</sup>.

Bei den Dentinhaftvermittlern der **fünften Generation** handelt es sich um Primer-Adhäsiv-Gemische. Diese „selbstprimenden Adhäsive“ werden nach dem Konditionieren zweimal appliziert. Die erste Schicht wirkt dabei eher als Primer, der zweiten Schicht kann man die Aufgabe des Bondings zuschreiben<sup>64</sup>.

Noch einen Schritt weiter gehen die „Ein-Flaschen-Systeme“ der **sechsten Generation**, bei denen so genannte selbstkonditionierende, selbstprimende Adhäsive Verwendung finden. Dentinvermittler dieser Generation gehören zu den neuesten auf dem Markt, sie vereinen alle Schritte in einem Material. Dabei soll eine erste Applikation sowohl Schmelz als auch Dentin konditionieren und eine zweite Schicht die Hybridschicht stabilisieren sowie eine Verbindung zwischen Zahnschmelz und Komposit ermöglichen<sup>64</sup>. Da diese Systeme relativ neu auf dem Markt sind, liegen hinsichtlich der Langzeitprognose noch keine ausreichenden klinischen Erfahrungen vor<sup>143</sup>. Vorteilhaft ist sicherlich die vereinfachte Handhabung dieser Systeme<sup>64</sup>. Ein weiterer Vorzug aller selbstkonditionierenden Primer („Condiprimer“) liegt darin, dass ein Kollagenkollaps und die damit verbundene unvollständige Monomerinfiltration in das Kollagengeflecht ausbleiben. Die Monomere können also genau in die Tiefe des Dentins diffundieren, welche durch die sauren Bestandteile demineralisiert wurde<sup>20</sup>. Auch die verminderte postoperative Hypersensibilität lässt die „Ein-Flaschen-Systeme“ sehr in ihrer Popularität steigen<sup>143</sup>. Es wird allerdings vermutet, dass es zu Einbußen von Dentin- oder Schmelzhaftung kommen kann. Daher steht zurzeit vor allem die Degradation der Verbundschicht bei diesen Dentinadhäsiven im Fokus der Forschung<sup>61</sup>.

In der Zahntraumatologie kamen Adhäsivsysteme Anfang der siebziger Jahre zur Anwendung. Hierbei wurde die Schmelz-Ätz-Technik eingesetzt, um Kompositaufbauten auf frakturierten Zähnen zu befestigen<sup>24</sup>. Damals beruhte die Haftung des Komposits nur auf geätztem Schmelz, an der Einbeziehung des Dentins in den adhäsiven Verbund wurde noch geforscht<sup>36, 37</sup>. Auch nach Möglichkeiten der Wieder-

befestigung von Kronenfragmenten nach Zahntraumata wurde gesucht. Diesbezüglich erschienen Ende der siebziger Jahre erste Publikationen<sup>80, 133, 140, 151</sup>. Hierbei kamen sowohl chemisch härtende als auch lichthärtende Komposite zum Einsatz. Aber erst Mitte der achtziger Jahre konnten mit Einführung der Dentinadhäsive durch Einbeziehung des Dentins in die Verbundfläche größere Erfolge in der Wiederbefestigung von Kronenfragmenten erzielt werden<sup>7</sup>.

### **1.2.3 Zusammensetzung, Wirkmechanismus und Verarbeitungsweise moderner Dentinadhäsivsysteme**

Alle Dentinhaftvermittler beruhen auf dem Prinzip der „Adhäsion“. Darunter versteht man einen Verbund zweier Körper durch mechanische Kräfte. REM-Untersuchungen haben gezeigt, dass die Haftung moderner Adhäsivsysteme (3.-6. Generation) ausschließlich über einen mikroretentiven Verbund zustande kommt. Voraussetzungen für die mechanische Retention sind möglichst große, retentive und benetzbare Haftflächen<sup>20, 60</sup>.

Alle modernen Adhäsivsysteme bestehen aus den gleichen Bestandteilen und wirken nach dem gleichen Prinzip, auch wenn die klinische Vorgehensweise innerhalb der vier Generationstypen variiert. Ein modernes Adhäsivsystem enthält einen Konditionierer, einen Primer und einen Adhäsiv<sup>64</sup>.

**Konditionierer** bestehen meist aus Säuren, z.B. Zitronensäure, Phosphorsäure, Salpetersäure oder Maleinsäure, oder aus Komplexbildnern wie EDTA. Im Falle von selbstkonditionierenden Primern übernehmen saure Monomere (mit Phosphat- oder Maleinatgruppen) die Funktion der Säure. Sie bewirken die Auflösung der Schmier-schicht, die Eröffnung von Dentintubuli und eine Demineralisation des oberflächlichen Dentins mit Freilegung des Kollagengeflechts. Dadurch wird die Oberfläche vergrößert und die Grundlage für eine retentive Verankerung geschaffen. Da Konditionierer im Schmelz ein deutliches Ätzmuster ergeben sollen aber gleichzeitig nicht aggressiv auf das Dentin wirken dürfen, müssen sie zuerst auf den Schmelz und anschließend für

maximal 20 Sekunden auf das Dentin aufgetragen werden. Nach der Einwirkzeit werden die Ätzmittel entweder mit Wasserspray entfernt oder im Fall von selbstkonditionierenden Primern auf dem Zahn belassen<sup>20, 64</sup>.

**Primer** sind in Wasser, Ethanol oder Aceton gelöste Monomere bzw. Monomergemische, die nach dem Verdunsten des Lösungsmittels auf dem Dentin zurückbleiben. Bestandteile können die hydrophilen Mono- und Dimethacrylate HEMA, HPMA, BPDM, PEGDMA sowie phosphonierte Mono-, Di- und Polymethacrylate, z.B. PENTA, und Säuremonomere sein. Diese Substanzen können dank ihrer Hydrophilie in die durch den Konditioner freigelegten Strukturen eindringen und die Benetzbarkeit für das Adhäsiv erhöhen. Während Aceton und Alkohol als Lösungsmittel besser verdunsten als Wasser, kann letzteres ein durch Austrocknung kollabiertes Kollagenetzwerk wieder aufrichten<sup>20, 52, 60, 64</sup>.

**Dentinadhäsive** bestehen aus amphiphilen Monomeren in einem Lösungsmittel. Als Monomere dienen Mono- und Dimethacrylate, z.B. 4-META, NPGGMA oder PMMA, und phosphonierte Mono- Di- und Polymethacrylate. Zusätzlich können Bis-GMA, TEGDMA und UDMA enthalten sein. Als Lösungsmittel fungieren ebenfalls Wasser, Aceton oder Alkohol. Auch Dentinadhäsive können wasserlösliche Mono- und Dimethacrylate wie HEMA und PEGDMA enthalten. Möglich ist Glutaraldehyd als Fixierungsmittel. Das amphiphile Adhäsiv, auch Bonding genannt, dient als Vermittler zwischen dem hydrophilen Dentin und hydrophoben Komposit. Es sickert in das Kollagengeflecht ein und stabilisiert dieses nach Polymerisation, indem eine Hybridschicht aus hydrophilen Monomeren und Kollagen entsteht. Außerdem fließt es in die offenen Dentintubuli hinein und bildet dort nach der Aushärtung Zapfen („tags“), welche die mikromechanische Verankerung unterstützen sollen<sup>64, 155</sup>.

Da es sich bei den Kavitäten im Kronenbereich meist um Dentin- und Schmelzoberflächen handelt, sei an dieser Stelle auf den speziellen Wirkmechanismus von Adhäsivsystemen im Schmelz eingegangen. Während im Dentinbereich die Ausbildung der Hybridschicht für den adhäsiven Verbund die größte Rolle spielt, basiert die Haftung zwischen Adhäsiv und Schmelz im Wesentlichen auf einer mikromechanischen

Verzahnung. Die Applikation von Säuren (meist 20-40%ige Phosphorsäure) führt zu einer Veränderung der Schmelzoberfläche in Form eines retentiven Ätzmusters durch die unterschiedliche Säurelöslichkeit der Hydroxylapatitkristalle in den Schmelzprismen. Zudem wird die Oberflächenenergie des Schmelzes erhöht, was zu einer verbesserten Benetzbarkeit führt. Niedrigvisköse Versiegler dringen in die aufgeraute Oberfläche ein und sorgen für eine mikromechanische Verankerung zwischen Schmelz und Adhäsiv, den sogenannten „tags“. Als Schmelzadhäsiv wird ein Dimethacrylat verwendet. Das Erzielen eines retentiven Verbunds ist im Schmelz auf Grund des hohen anorganischen Anteils wesentlich unkomplizierter als im Dentin<sup>20, 64</sup>.

Bei gesunder Pulpa und richtiger Anwendung der Materialien besteht eine gute Pulpa-verträglichkeit, weder die Phosphorsäure noch die Restaurationsmaterialien sind direkt pulpatoxisch. Das Aufbringen der Adhäsive nach Kavitätenpräparation verringert sogar die postoperative Hypersensibilität, da die Dentinkanälchen versiegelt und die Dentinliquorbewegung blockiert werden. Systemische Auswirkungen sind meist allergischer Art und nur in wenigen Fällen beschrieben<sup>64</sup>.

Die Einführung plastischer zahnfarbener Restaurationsmaterialien wie Komposite und Kompomere und inzwischen auch die Verwendung zur Eingliederung laborgefertigter keramischer Restaurationen haben die Anwendung von Adhäsivsystemen steigen lassen. Als vorteilhaft erwiesen sich die verbesserte Randschlussqualität, die Versiegelung zum Pulpa-Dentinschutz und die Möglichkeiten zur Behandlung überempfindlicher Zahnhälse sowie zur Stabilisierung von Restaurationen und Restzahnschubstanz. Auch in der Traumatologie haben Adhäsive bei der Wiederbefestigung von Kronen- und Wurzelfragmenten einen hohen Stellenwert erlangt. In neueren Entwicklungen versucht man Adhäsivsysteme als Vehikel für therapeutisch wirksame Substanzen (z.B. antiinflammatorisch) zu nutzen<sup>52, 60, 61</sup>.

## **1.3 Bruchverhalten nach Versagen der adhäsiven Fragmentbefestigung**

### **1.3.1 Überlebensrate adhäsiv befestigter Fragmente**

Bei Kronenfrakturen im Kindes- und Jugendalter ist die adhäsive Wiederbefestigung des Fragments mittlerweile die Methode der Wahl <sup>119</sup>. Diese ökonomische und minimal-invasive Therapieform bietet vor allem jungen Patienten viele Vorteile. Während einige Autoren die adhäsive Wiederbefestigung als lebenslange Versorgung betrachten, sehen andere diese Therapieform lediglich als Langzeitprovisorium. In einigen Studien wurde der Frage nach der Überlebensrate adhäsiv wiederbefestigter Kronefragmenten nachgegangen. ANDREASEN beschrieb im Jahr 1993 erstmalig einen Versuchsaufbau, in dem die alleinige Verwendung von Adhäsivsystemen mit der zusätzlichen Verwendung von Komposit zur Fragmentbefestigung verglichen wurde <sup>7</sup>. PAGLIARINI (2000) testete in einer In-vitro-Studie Adhäsivsysteme unterschiedlicher Generationen bezüglich ihrer Frakturresistenz nach Fragmentbefestigung <sup>100</sup>. Auch die beiden direkten Restaurationsmöglichkeiten, Kompositaufbau und Fragmentbefestigung, wurden bezüglich ihrer Frakturresistenz verglichen <sup>131</sup>. Einige Ergebnisse der zahlreichen Studien seien hier beschrieben:

ANDREASEN et al. veröffentlichten im Jahre 1995 eine multizentrische Langzeitstudie, die die klinische Überlebensrate wiederbefestigter Schneidekanten beschreibt. Es wurden in drei verschiedenen zahnmedizinischen Einrichtungen Daten von mehr als 300 Patientenfällen gesammelt und ausgewertet. Die Analyse bezog sich auf die Überlebensrate, die Gründe des Versagens und die Erfolgsquote verschiedener Befestigungstechniken. Sie fanden heraus, dass von den allein mit Hilfe der Schmelz-Ätz-Technik restaurierten Zähnen nach 6,5 Jahren nur noch 25% intakt waren. Bei Restaurationen, in denen die Schmelzätzung mit Dentinadhäsiven kombiniert wurde, befanden sich 7,5 Jahren nach Restauration noch 25% der Fragmente in situ. Ursache für den Verlust der wiederbefestigten Fragmente war meist ein erneutes Trauma, in einigen Fällen führten auch Parafunktionen zum Versagen der Restauration. Der ästhetische Erfolg war in allen Gruppen gleich und wurde am Ende der Untersuchung

als „akzeptabel“ bezeichnet. Sofern es sich bei den restaurierten Zähnen zuvor nur um reine Kronenfrakturen ohne Beteiligung der Wurzel handelte, blieben in 98% der Fälle die Vitalität erhalten <sup>5</sup>.

Eine skandinavische Studie wies nach, dass 50% der wiederbefestigten Zahnfragmente bereits nach 2,5 Jahren wieder verloren gingen, vor allem bedingt durch erneutes Trauma oder andere nicht physiologische Belastungen <sup>90</sup>.

Auf Grund der ungewissen Lebensdauer der Versorgung bezeichnete FARIK (1998) die Methode des adhäsiven Wiederbefestigens nur als semipermanente Lösung. Er empfahl die Form der Restauration als Langzeitprovisorium, welches eine Überbrückung der Zeit ermöglicht bis die Zahn- und Pulpaentwicklung der zumeist jungen Patienten permanente Restaurationen zulässt <sup>43</sup>.

ANDREASEN et al. (1995) analysierten verschiedene Parameter, die den Erfolg der Restauration beeinflussen können. Es zeigte sich, dass das zeitliche Intervall zwischen Trauma und Wiederbefestigung des Fragments keine Auswirkungen auf den klinischen Erfolg hatte. Auch die Ausdehnung der Fraktur sowie die Verstärkung des Frakturspaltes mit Komposit hatten in dieser Studie keinen Einfluss auf die Überlebensrate wiederbefestigter Fragmente. SPINAS (2004) stellte dagegen fest, dass kleinere Schmelz- Dentin- Frakturen eine bessere Prognose bei der adhäsiven Wiederbefestigung hatten als Zähne, bei denen mehr als ein Drittel der klinischen Krone frakturiert war <sup>138</sup>. Auch die Wahl der verwendeten Haftvermittler kann eine Rolle für die Frakturresistenz spielen, ebenso wie die Präparationstechnik der Frakturflächen. Die häufigste Ursache für den erneuten Verlust von wiederbefestigten Fragmenten stellt ein erneutes Trauma dar <sup>5</sup>. Prädisponierte Faktoren sind hierfür, analog der Primärfraktur, ein vergrößerter Overjet sowie ein inkompletter Lippenschluss <sup>163</sup>.

### 1.3.2 Verschiedene Möglichkeiten des Bruchverlaufs

Kommt es nach adhäsiver Wiederbefestigung zum Versagen der Restauration, existieren verschiedene Frakturmöglichkeiten. Entsprechend der beiden Zahnstrukturen Schmelz und Dentin an Fragment und Zahn sowie der sich zwischen Fragment und Zahn befindlichen Adhäsivschicht, ergeben sich acht verschiedene Möglichkeiten des Bruchverlaufs, jeweils vier im Schmelz- und vier im Dentinbereich. Anhand einer licht- oder rasterelektronenmikroskopischen Betrachtung der Bruchfläche lassen sich folgende Frakturmodi erkennen <sup>114</sup>:

Sind die komplementären Bruchflächen von Fragment und Zahnstumpf mit einer Adhäsivschicht bedeckt, so fand die erneute Fraktur innerhalb des Restaurationsmaterials statt und man spricht sowohl im Schmelz- als auch im Dentinbereich von einer **Kohäsivfraktur innerhalb des Restaurationsmaterials**. Kann man weder auf der Bruchfläche des Fragments noch auf der Bruchfläche des Zahnstumpfs Bestandteile des zur Restauration verwendeten Adhäsivs erkennen, so kann man davon ausgehen, dass der zweite Frakturverlauf, anders als der erste, oberhalb oder unterhalb des ursprünglichen Bruchspaltes verläuft. Es handelt sich in dem Fall um eine **Kohäsivfraktur innerhalb des Schmelzes oder Dentins**, wobei man lichtmikroskopisch nicht zwischen dem Zahnmaterial des Fragments und dem der Basis unterscheiden kann. Befinden sich auf der Seite der Zahnbasis Bestandteile des Adhäsivs aber nicht auf der gegenüberliegenden Bruchfläche des Fragments, so handelt es sich jeweils im Schmelz- oder Dentinbereich um eine **Adhäsivfraktur zwischen Zahnfragment und Restaurationsmaterials**. Im umgekehrten Fall handelt es sich um eine **Adhäsivfraktur zwischen Restaurationsmaterial und Zahnbasis**.

## 2 Fragestellung

Im Rahmen von Frontzahntraumata auftretende Kronenfrakturen erlangten in den letzten Jahren einen zunehmenden Stellenwert bei der Behandlung von Kindern und Jugendlichen. Gleichzeitig sind die Möglichkeiten einer konservierenden Versorgung im Sinne einer Wiederbefestigung der Kronenfragmente mit der Verbreitung von adhäsiven Verbundsystemen gestiegen. Derzeit sind verschiedene Adhäsivsysteme auf dem Markt, die zur Fragmentbefestigung verwendet werden können.

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, vier Adhäsivsysteme verschiedener Generationen hinsichtlich ihrer Eignung zur Fragmentbefestigung zu untersuchen. Es handelte sich um OptiBond FL<sup>®</sup> (Kerr), Syntac<sup>®</sup> (Ivoclar Vivadent), AdheSE<sup>®</sup> (Ivoclar Vivadent) und Adper<sup>®</sup> Prompt<sup>®</sup> L-Pop<sup>®</sup> (3M ESPE). Zudem sollte die kombinierte Anwendung von OptiBond FL<sup>®</sup> (Kerr) mit dem fließfähigem Komposit Tetric<sup>®</sup> Flow (Ivoclar Vivadent) sowie die Auswirkung von Substanzdefekten im Bruchspalt, welche ebenfalls mit OptiBond FL<sup>®</sup> (Kerr) und Tetric<sup>®</sup> Flow (Ivoclar Vivadent) versorgt wurden, evaluiert werden.

Für die Untersuchungen dienten künstlich frakturierte und adhäsiv wiederbefestigte menschliche Zähne als In-vitro-Testsystem. Durch eine lichtmikroskopische Analyse der Bruchflächen sollte das Frakturverhalten der verschiedenen Adhäsivsysteme untersucht und anhand der Bruchverläufe Rückschlüsse auf den adhäsiven Verbund der zur Fragmentbefestigung verwendeten Restaurationsmaterialien gezogen werden. Weiterhin wurde der Frage nachgegangen, ob es zwischen Dentin und Schmelz Unterschiede im Bruchverhalten gibt.

## **3 Material und Methode**

### **3.1 Herkunft und Aufbewahrung der Versuchszähne**

Die für die Untersuchung verwendeten Zähne stammen aus einer vorangegangenen In-vitro-Studie zur Verbundfestigkeit adhäsiv wiederbefestigter Kronenfragmente <sup>129</sup>. Es handelt sich vorwiegend um extrahierte, parodontal nicht erhaltungswürdige menschliche Unterkiefer-Frontzähne mit möglichst geringen kariösen oder traumatischen Substanzdefekten. Das klinische Alter der Zähne ist unbekannt. Die Lagerung der Proben bis zur Weiterverwendung erfolgte in 1%iger Chloramin-T-Lösung.

### **3.2 Vorangegangene In-vitro-Untersuchung zur Verbundfestigkeit verschiedener Dentinadhäsivsysteme nach Wiederbefestigung von Kronenfragmenten**

In der vorangegangenen Studie innerhalb dieser Arbeitsgruppe wurden die Versuchszähne zunächst von supra- und subgingivalem Zahnstein gereinigt und anschließend zur besseren Handhabung bis 1 mm koronal des Äquators des lingualen Tuberkulums in Kunststoff (Technovit®4071) eingebettet. Durch Aufbewahrung in 0,9%iger physiologischer Kochsalzlösung bei Raumtemperatur wurde ein Austrocknen der Zähne verhindert.

Nach Abschluss dieser vorbereitenden Maßnahmen folgte der eigentliche Scherkraftversuch, beginnend mit der Bruchkraftmessung am intakten Zahn. Hierfür wurde die Bruchlinie am Übergang vom ersten zum zweiten koronalen Viertel der Zahnkrone festgelegt. Nach gezieltem Abbrechen des Zahnfragments mit einem Stempel in der Zwickmaschine wurden die Zähne nach Art des Bruchverlaufs und nach Güte der Fragmentpassung bei Reponierung beurteilt. Zähne mit geringer Passgenauigkeit, Brüche innerhalb der Einbettmasse sowie Trümmerbrüche wurden von weiteren Untersuchungen ausgeschlossen. Handelte es sich um Brüche mit

Substanzdefekten, wurden die beteiligten Zähne einer gesonderten Versuchsgruppe zugeordnet, um den Einfluss traumatogener Substanzdefekte auf die Bruchfestigkeit des restaurierten Zahns zu untersuchen. Mit Hilfe eines an einen PC angeschlossenen Lichtmikroskops und einer entsprechenden Software wurden die Bruchflächen digital festgehalten und ihre Gesamtgröße ausgemessen.

Die Zuordnung der Zähne zu den Versuchsgruppen erfolgte entsprechend der Verwendung von vier Adhäsivsystemen verschiedener Generationen zur Wiederbefestigung der Fragmente. Dabei wurden immer je 14 der zuvor entstandenen Proben wahllos auf fünf Versuchsgruppen aufgeteilt, sechs Proben mit größeren Substanzdefekten wurden der Versuchsgruppe 6 zugeordnet. Folgende Auswahl zu testender Adhäsivsysteme wurde getroffen:

- Versuchsgruppe 1: **OptiBond FL<sup>®</sup>** (Kerr)
- Versuchsgruppe 2: **Syntac<sup>®</sup>** (Ivoclar Vivadent)
- Versuchsgruppe 3: **AdheSE<sup>®</sup>** (Ivoclar Vivadent)
- Versuchsgruppe 4: **Adper<sup>®</sup> Prompt<sup>®</sup> L-Pop<sup>®</sup>** (3M ESPE)
- Versuchsgruppe 5: kombinierte Anwendung von **OptiBond FL<sup>®</sup>** (Kerr) und dem fließfähigem Komposit **Tetric<sup>®</sup> Flow** (Ivoclar Vivadent)
- Versuchsgruppe 6: Frakturen mit Substanzdefekten wurden ebenfalls mit **OptiBond FL<sup>®</sup>** (Kerr) und **Tetric<sup>®</sup> Flow** (Ivoclar Vivadent) versorgt

Die zur Untersuchung stehenden Adhäsivsysteme unterschieden sich hinsichtlich ihrer Generation und Anwendung.

Die Anwendung des Dentinadhäsivs **OptiBond FL<sup>®</sup>**, zur 4. Generation gehörend, umfasst drei Arbeitsschritte. Hierbei wurden im Sinne der „Total-Ätz-Technik“ Schmelz und Dentin mit 37%iger Phosphorsäure (Ultraetch<sup>®</sup>) konditioniert. Die geätzten Schmelz- und Dentinflächen wurden nach dem Absprayen der Phosphorsäure mit einem hydrophilen selbstkonditionierenden Primer und einem gefüllten Bondingmaterial behandelt.

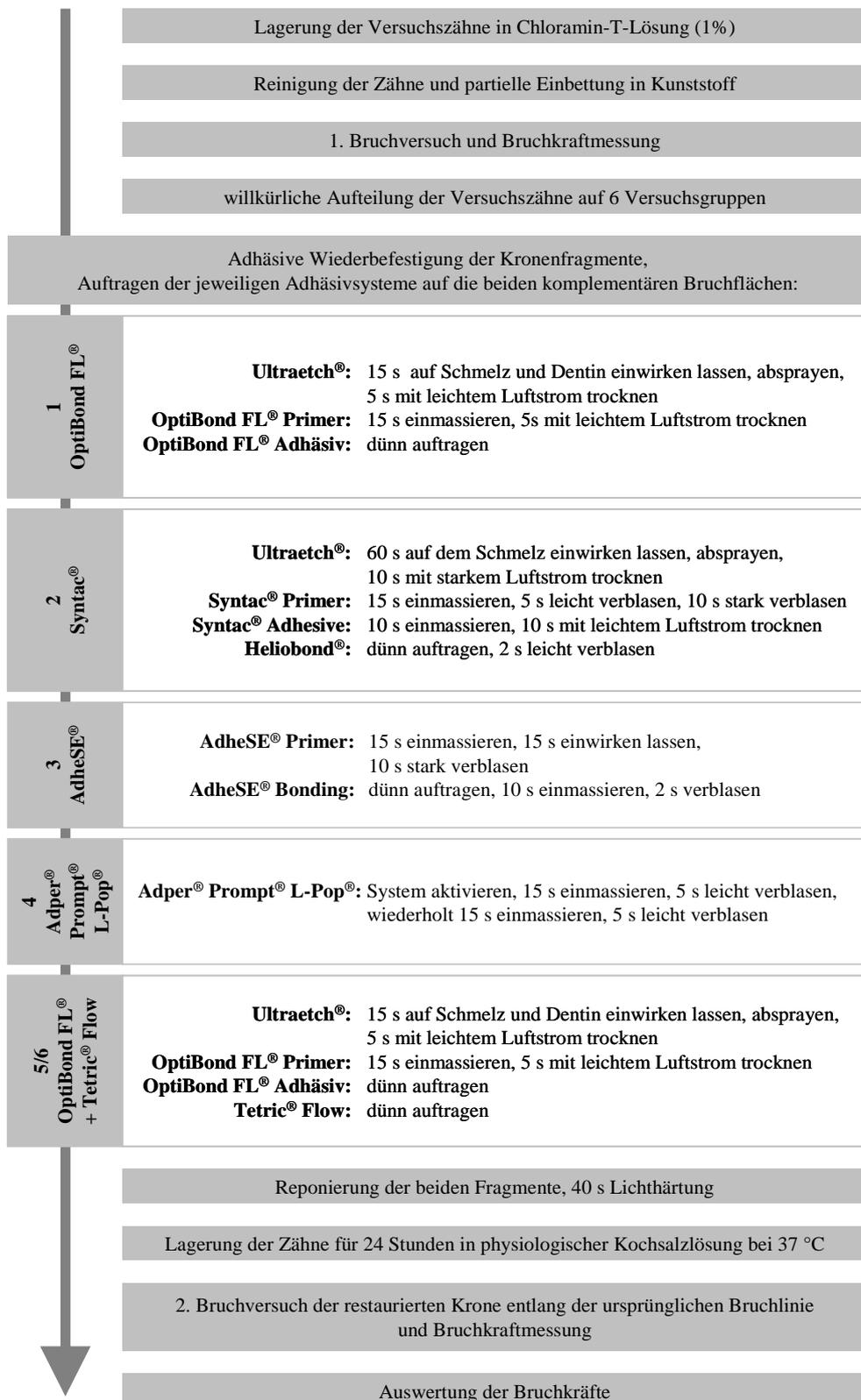
**Syntac**<sup>®</sup> aus der 3. Generation, befindet sich von allen verwendeten Adhäsivsystemen am längsten auf dem Markt. Die Anwendung umfasst vier Arbeitsschritte. Die für diese Generation typische „selektive Schmelz- und Dentinkonditionierung“ wurde zunächst mit 37%iger Phosphorsäure (Ultraetch<sup>®</sup>) am Schmelz und daraufhin mit einem selbstkonditionierenden Primer am Dentin vollzogen. Anschließend wurden ein Adhäsiv und ein ungefülltes Bondingmaterial (Heliobond<sup>®</sup>) auf die gesamte vorbehandelte Fläche aufgetragen.

Das Dentinadhäsivsystem **AdheSE**<sup>®</sup>, 5. Generation, erfordert nur noch zwei Arbeitsschritte. Mit einem selbstkonditionierenden Primer für Schmelz und Dentin wurde die gesamte Fläche vorbehandelt, auf die dann nur noch ein Bondingmaterial aufgetragen werden musste.

**Adper**<sup>®</sup> **Prompt**<sup>®</sup> **L-Pop**<sup>®</sup> ist ein Adhäsivsystem der 6. Generation und vereint alle Behandlungsschritte in der Applikation einer Substanz. Die Funktion des Ätzens, des Primers und des Bondings werden von einer Lösung übernommen, die mehrmals appliziert wurde.

Die Wiederbefestigung der Fragmente erfolgte nun innerhalb der einzelnen Versuchsgruppen mit den jeweiligen Dentinadhäsivsystemen bzw. Kombinationen mit fließfähigem Komposit. Dabei erfolgten alle Arbeitsschritte exakt nach Herstellerangaben.

Die restaurierten Zähne wurden für 24 Stunden in physiologischer Kochsalzlösung bei 37°C bis zum nächsten Bruchversuch gelagert. Hierbei erfolgte die Bruchkraftmessung zur Untersuchung der Verbundfestigkeit der adhäsiven Befestigung. Die aufgewendeten Bruchkräfte am intakten und am restaurierten Zahn wurden mit Hilfe einer statistischen Auswertung analysiert.



**Abb. 1:** Schematischer Versuchsaufbau der vorangegangenen In-vitro-Untersuchung

### 3.3 Markieren und Einfärben der Versuchszähne

Nach Beendigung der vorangegangenen In-vitro-Studie zur Verbundfestigkeit sollten nun die Bruchverläufe anhand der entstandenen Bruchflächen analysiert werden.

Um eine größengetreue Vermessung der Frakturflächen zu ermöglichen, wurden Zahnbasis und Fragment zunächst vorsichtig reponiert. An zwei gegenüberliegenden Schmelzarealen erfolgte mittels wasserfester Faserschreiber die Markierung mit jeweils einem grünen und einem roten Punkt. Die Strecke zwischen beiden Punkten wurde dann mit einem Tasterzirkel vermessen. Dies ermöglichte das Heranziehen des Streckenverhältnisses zwischen Original (Zahnbasis bzw. Fragment) und Bild (digitales Foto) zur metrischen Bestimmung der Größe der Bruchflächen. Weiterhin gestatteten die farbigen Punktmarkierungen eine genaue Überlagerung der Bilder beider korrespondierenden Bruchflächen, einer exakten Reposition der Fragmente entsprechend.

Zur besseren Darstellung und Unterscheidung von Dentin, Schmelz und Adhäsiv innerhalb der Bruchflächen wurden nun die Versuchszähne und Fragmente dem Lagerungsmedium entnommen, vorsichtig mit Hilfe eines Luftbläses getrocknet und anschließend zehn Minuten mit der Färbelösung MIRA-2-Ton<sup>®</sup> behandelt (Abb. 2). Es folgte ein Spülvorgang in Aqua dest. und anschließendes Trocknen mit dem Luftbläser.

Die jeweiligen Bruchflächen von Zahnbasis und Fragment stellten sich jetzt in verschiedenen Violetttönen dar, wobei sich die nicht von Adhäsiv bedeckten Dentin- und Schmelzflächen aufgrund einer besseren Anfärbbarkeit gut von den adhäsivbedeckten Flächen unterscheiden ließen. Darüber hinaus zeigte Dentin eine deutlich intensivere Färbung als Schmelz (Abb. 3).



**Abb. 2:** Einfärben von Zahn und Fragment mit MIRA-2-Ton®



**Abb. 3:** Bruchfläche vor und nach der Färbung, farbige Überlagerungsmarken links und rechts im Schmelzbereich

### 3.4 Fotografieren der Bruchflächen

Zur genauen Analyse der Bruchflächen wurden Zahnbasis und Fragment mit Hilfe einer Digitalkamera (Canon EOS 300D<sup>®</sup>), ausgestattet mit einem Makroobjektiv (Canon Macro Photo Lens, MP-E 65mm F2.8 1-5x<sup>®</sup>), fotografiert. Zur lagestabilen Ausrichtung der Kamera wurde diese auf einem Stativ (Nordmende S 200<sup>®</sup>) fixiert (Abb. 4). Folgende Belichtungseinstellungen der Kamera wurden gewählt: AV, ISO 400, Blende 16, Belichtungszeit 0,25 Sekunden. Über ein Datenkabel wurde eine Verbindung zum Rechner (Dell Inspiron 5100) hergestellt. Ein Computerprogramm (Canon Utilities Remote Capture 2.6) ermöglichte die verwackelungsfreie Betätigung des Verschlusses sowie den Transfer der Bilddaten zum Rechner. Um die Bruchflächen möglichst orthograd abbilden zu können, wurden Zahnbasis bzw. Fragment mit Knetmasse (Nakiplast<sup>®</sup>) fixiert. Dies gestattete eine lagestabile parallele Ausrichtung der Bruchfläche zum Objektiv. Eine oberhalb des Objektes positionierte Lichtquelle (20 Watt Halogenleuchte) diente der gleichmäßigen, schattenfreien Ausleuchtung der Bruchfläche.



**Abb. 4:** Fotografieren der Bruchflächen mit Digitalkamera, Zahn mit Einbettkunststoff (grün), Knetmasse (blau)

### **3.5 Analysen der Bruchflächen**

Anhand der digitalen Fotografien sollten nun die jeweiligen komplementären Bruchflächen hinsichtlich ihrer Frakturmodi untersucht werden. Es galt zu analysieren, wie groß der jeweilige Flächenanteil an Kohäsivbrüchen innerhalb des Befestigungsmaterials, Kohäsivbrüchen innerhalb von Schmelz oder Dentin, Adhäsivbrüchen zur Basis und Adhäsivbrüchen zum Fragment ist. Hierfür wurden zunächst die einzelnen Flächen von Dentin und Schmelz sowie die adhäsivbedeckten Flächen von Zahnbasis und Fragment vermessen. Durch exakte Überlagerung der Bruchflächen von Zahnbasis und Fragment und den dabei entstehenden Überschneidungen konnte so die Art des Bruchverlaufs (kohäsiv oder adhäsiv) mit entsprechender Lokalisation (in der Zahnhartsubstanz, im Adhäsiv oder an der Grenzfläche) festgestellt werden.

Folgende Schritte waren hierfür erforderlich: zunächst mussten die Fotos in einem Grafikprogramm nachbearbeitet werden. Anschließend konnte mit Hilfe eines CAD-Programms, welches die Berechnung unregelmäßiger Flächen ermöglicht, eine Unterscheidung zwischen den verschiedenen Frakturmöglichkeiten vorgenommen werden und deren quantitative Bestimmung erfolgen.

#### **3.5.1 Nachbearbeitung der Fotos**

Die zuvor im JPEG-Format abgelegten Fotos wurden mit Hilfe eines Grafikprogramms (Adobe Photoshop 7.0) nachbearbeitet. Hierzu wurden die jeweils korrespondierenden Bilder von Zahnbasis und Fragment gemeinsam geöffnet und das Bild des Fragments um seine vertikale Achse gespiegelt, um ein späteres Übereinanderprojizieren beider Bruchflächen zu ermöglichen. Aufnahmebedingt waren die Bilder von Zahnbasis und Fragment häufig nicht exakt parallel ausgerichtet, sondern um wenige Grad gegeneinander gedreht. Diese Fehler in der Ausrichtung wurden folgendermaßen ausgeglichen: die vor der Färbung angebrachten grünen und roten Markierungspunkte wurden virtuell durch eine Strecke verbunden. Das Grafikprogramm berechnete nun den Winkel zwischen dieser Strecke und der Horizontalen. Durch Rotation des Bildes um die berechnete Gradzahl konnten nun die korrespondierenden Bilder von Zahnstumpf

und Fragment zur Deckung gebracht werden. Um den bei jedem Foto individuell entstandenen Objektstand und die dadurch bedingten verschiedenen Bildgrößen der Frakturflächen von Zahnstumpf und Fragment auszugleichen, wurde im Grafikprogramm eine manuelle Anpassung der Bildgrößen vorgenommen. Die Übereinanderprojektion der farbigen Markierungspunkte diente hierbei als zuverlässige Kontrolle. Die gespiegelten, gedrehten und zugeschnittenen Fotos wurden nun individuell dahingehend nachbearbeitet, dass im Bedarfsfall sowohl Kontrast und Helligkeit optimiert als auch Konturen geschärft wurden. Dies ermöglichte eine bessere Abgrenzbarkeit der einzelnen Frakturverläufe gegeneinander.

#### **3.5.2 Flächenberechnungen**

Zur Bestimmung der einzelnen Frakturmodi innerhalb der Bruchflächen wurde das CAD-Programm „Nemetschek Allplan FT 17“ verwendet. Hierbei wurden die zuvor bearbeiteten digitalen Fotos mit vektorbasierten Polygonen überlagert und so die einzelnen Frakturverläufe quantitativ erfasst.

Es galt zunächst alle verschiedenen Komponenten der jeweils zusammengehörigen Bruchflächen einzeln zu ermitteln, um dann in einem weiteren Schritt die verschiedenen Frakturmodi durch Überlagerung der Einzelflächen zu bestimmen. Dazu mussten die pixelbasierten Fotos der Bruchflächen in so genannte „Teilbilder“ des CAD-Programms importiert werden. Zur Analyse des Frakturverlaufs innerhalb eines Versuchszahns wurden daraufhin immer die beiden komplementären Fotos in „Nemetschek Allplan FT 17“ visualisiert (Abb.8). Die verschiedenen Komponenten innerhalb der beiden Bruchflächen konnten nun mit Hilfe von verschiedenfarbigen Polygonen dargestellt und größenmäßig erfasst werden.

Begonnen wurde hier mit den Gesamtflächen von Basis und Fragment sowie den jeweils zugehörigen Flächen von Dentin und Schmelz. Dazu wurden die Umrisslinien der einzelnen Komponenten auf den Fotos nachgezeichnet (Abb.9). Bei Vervollständigung der Umrisslinien, also mit Entstehung der vektorbasierten Polygone, wurde die Größe der umrandeten Flächen automatisch vom CAD-Programm errechnet. Bei den ersten

Daten handelte es sich also um die Flächen „Basis<sub>gesamt</sub>“, „Fragment<sub>gesamt</sub>“, „Dentin<sub>Basis</sub>“ und „Dentin<sub>Fragment</sub>“. Der Schmelzbereich konnte anhand der übrigen Werte errechnet werden, dies ersparte eine gesonderte Vermessung. Da es sich um komplementäre Bruchflächen handelt, müssten die Flächen von Basis und Fragment bzw. die von Dentin und Schmelz identisch sein. Durch die zweidimensionale Darstellung der dreidimensionalen Bruchflächen und durch frakturbedingte Substanzverluste gab es jedoch kleine Abweichungen, die eine getrennte Vermessung dieser Flächen erforderlich machte.

Die vor der Färbung angebrachten roten und grünen Punkte wurden an den Polygonen der Gesamtflächen durch kurze Linien markiert. Somit konnten sie nach späterem Ausblenden der Fotos Anhaltspunkte für die Zusammengehörigkeit der beiden gegenüberliegenden Bruchflächen geben. Die Strecke zwischen den beiden Markierungen wurde vermessen, um später ein Verhältnis zur Originalgröße der Zähne herstellen zu können.

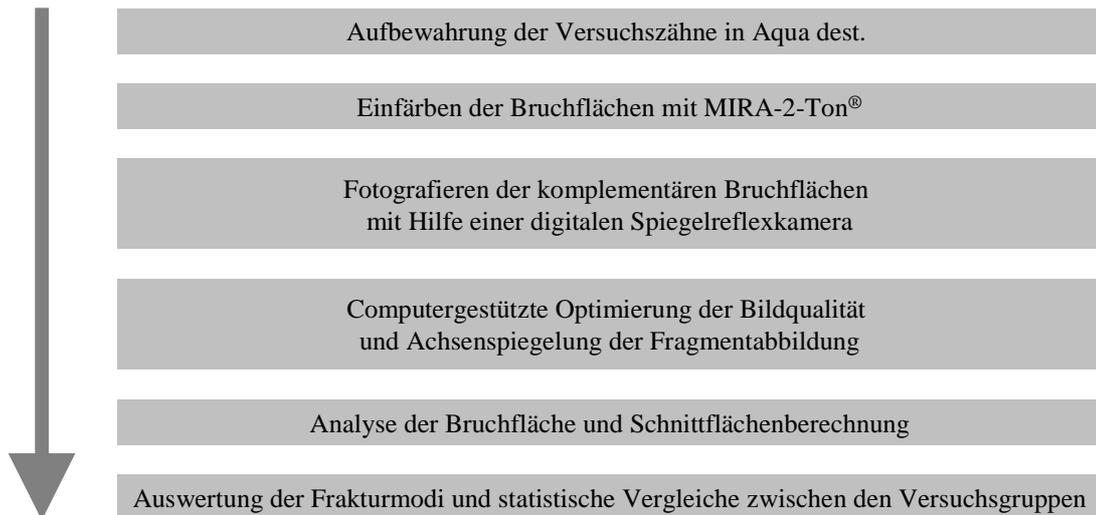
Nachdem die Umrise der vom Zahn vorgegebenen Strukturen eingezeichnet waren, konnten alle adhäsivbedeckten Flächen von Basis und Fragment umrandet und quantitativ erfasst werden (Abb.10). Auch das ließ sich nach dem gleichen Prinzip durchführen, allerdings wurde hier zur präziseren Erkennung der Flächen ein Lichtmikroskop (Eschenbach Optik) mit einer zweifachen Vergrößerung zur Hilfe gezogen, unter dem man die originale Bruchfläche des Versuchszahns zusätzlich betrachten konnte (Abb.5). Hier wurde zwischen „Adhäsiv<sub>Dentin Basis</sub>“, „Adhäsiv<sub>Schmelz Basis</sub>“, „Adhäsiv<sub>Dentin Fragment</sub>“ und „Adhäsiv<sub>Schmelz Fragment</sub>“ unterschieden.



**Abb. 5:** Mikroskop und Computer

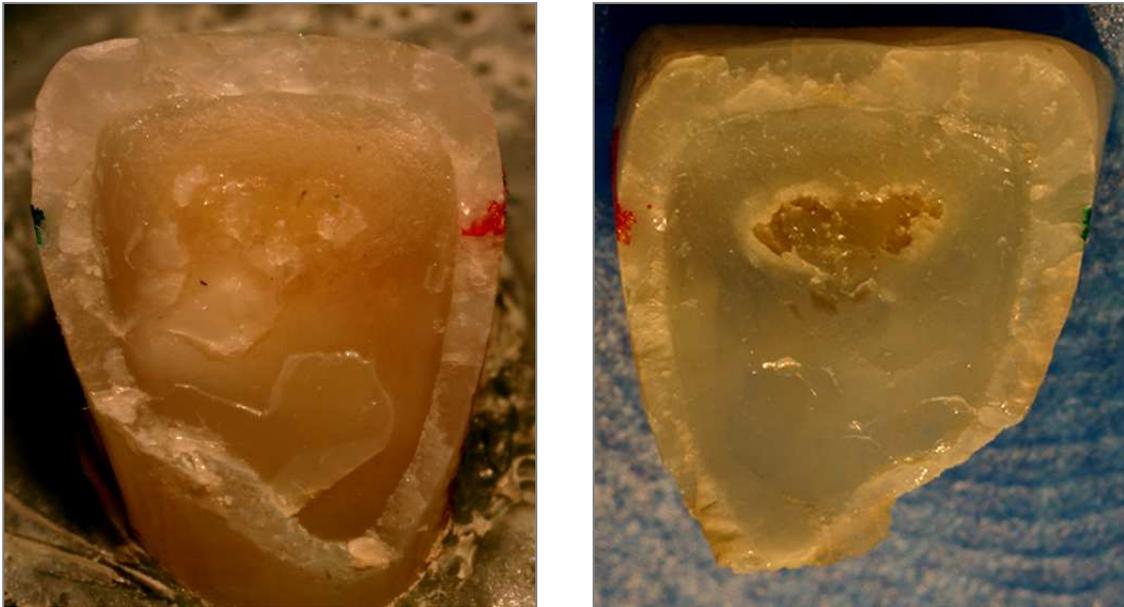
Zur Bestimmung des Frakturmodus mussten nun die vektorisierten Flächen der komplementären Bruchhälften übereinander projiziert werden. Dazu wurden die Fotos im Hintergrund ausgeblendet (Abb.11) und die eingezeichneten Flächen des Fragments übereinander gelagert. Dabei wurden jeweils die Markierungen der roten Punkte als Anhaltspunkt verwendet. Durch die individuelle Position des Zahns während des Fotografierens mussten nun noch die Umrissse von Basis und Fragment aufeinander abgestimmt werden, das heißt gegebenenfalls vergrößert oder verkleinert werden oder sogar um die Markierung des roten Punktes gedreht werden. Die Größen der einzelnen Teilflächen wurden dabei von dem Programm automatisch auf die neue Größe umgerechnet. Sobald die beiden zusammengehörigen Bruchflächen genau übereinander projiziert waren, konnte man die dabei entstandenen Schnittflächen einzeichnen (Abb.12). Alle Bereiche, die sowohl auf der Basis als auch auf dem Fragment mit Adhäsiv bedeckt waren, also kohäsiv im Restaurationsmaterial gebrochen sind, wurden nach dem oben erläuterten Schema umrandet und vom Programm automatisch berechnet (Abb.13). Mit diesen und den zuvor ermittelten Werte konnten nun die

übrigen Frakturmodi, Kohäsivbrüche innerhalb des Zahns und Adhäsivbrüche zur Basis und zum Fragment errechnet werden und bedurften daher keiner gesonderten Vermessung.

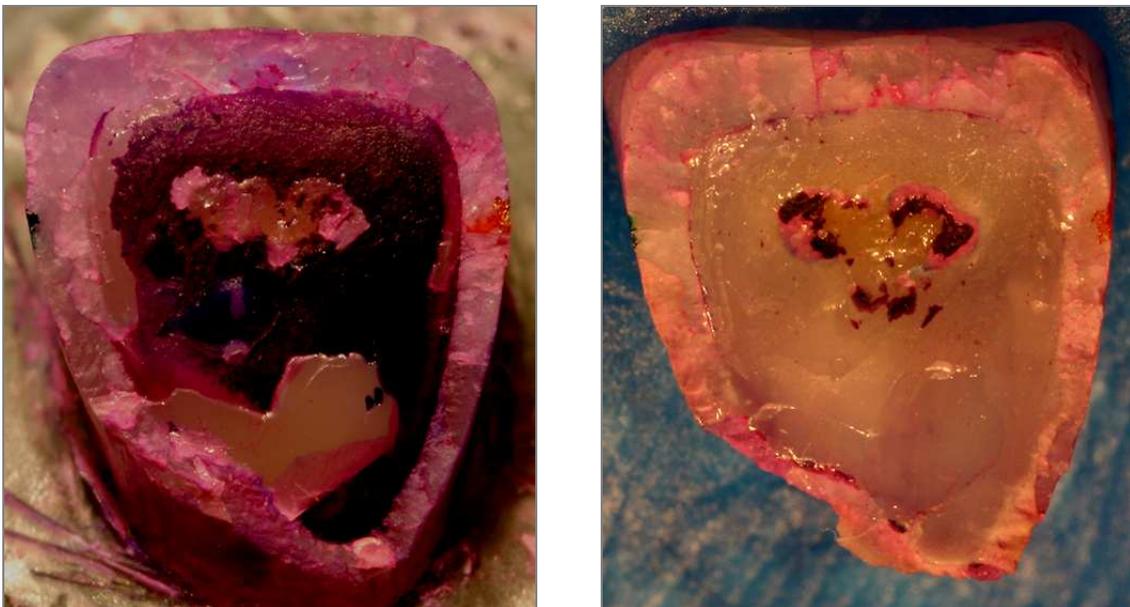


**Abb. 6:** Schematischer Versuchsaufbau der vorliegenden Dissertation

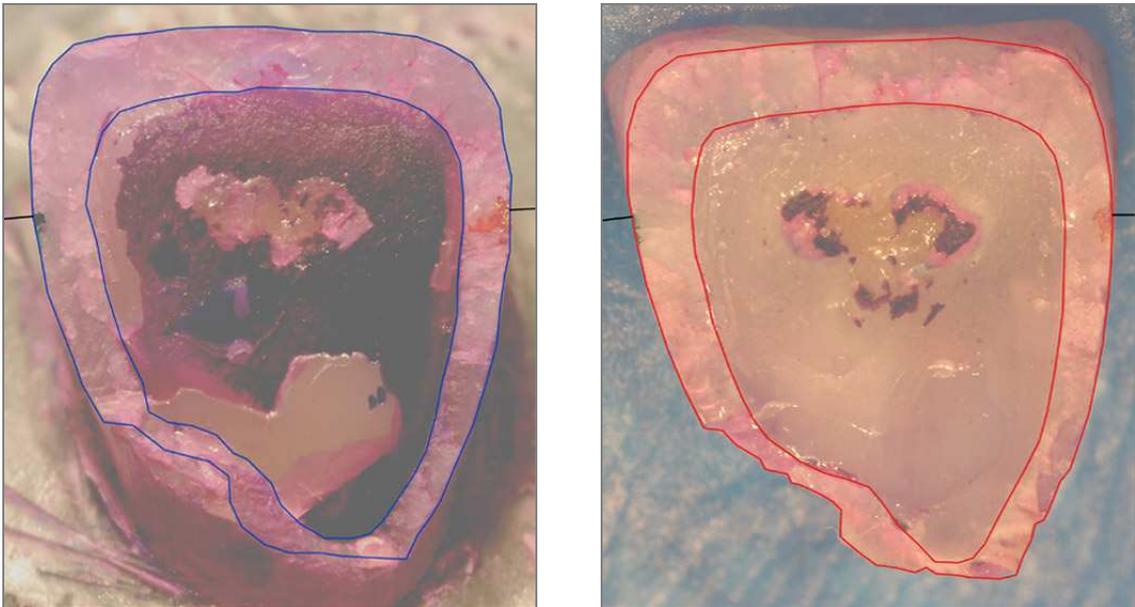
### 3.5.3 Fallbeispiel



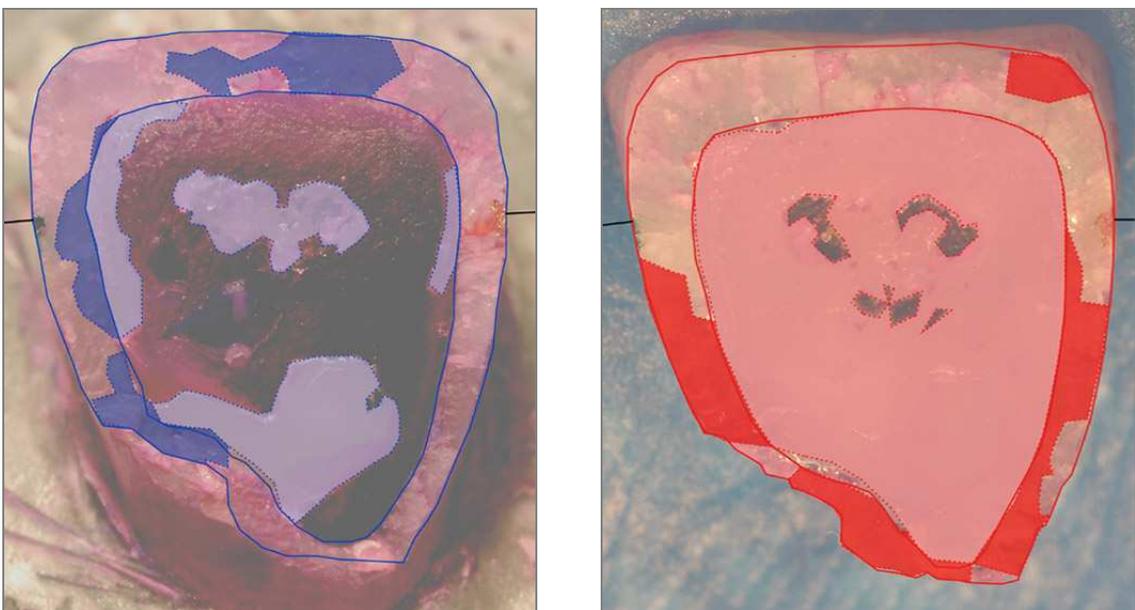
**Abb. 7:** Bruchfläche der Basis (links) und des Fragments (rechts), ungefärbt



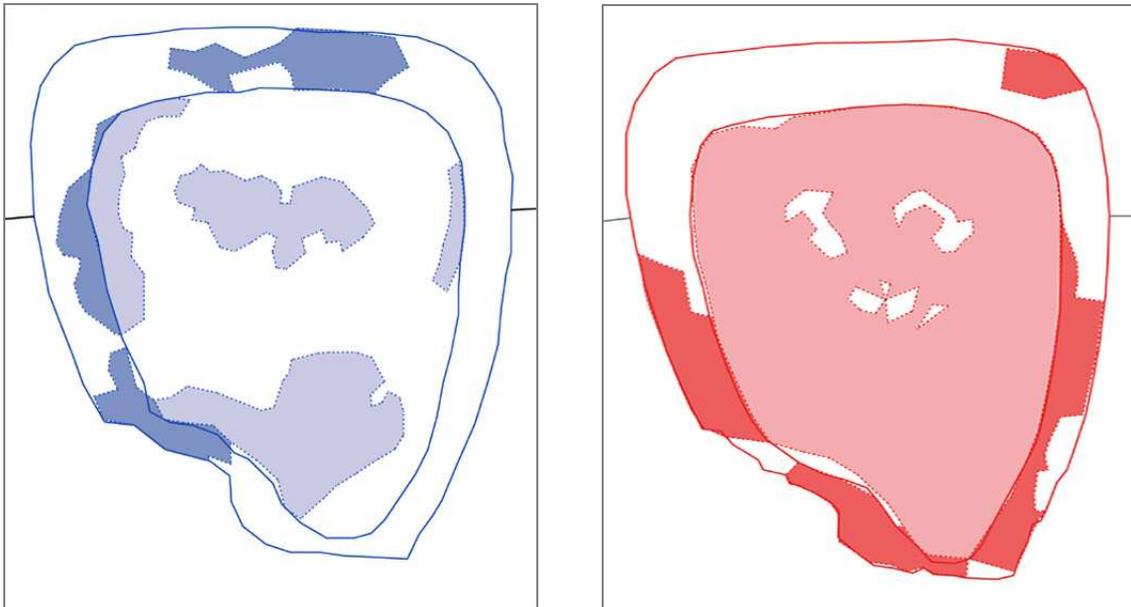
**Abb. 8:** Bruchfläche der Basis (links) und des Fragments (rechts), gefärbt, Bruchfläche des Fragments gespiegelt



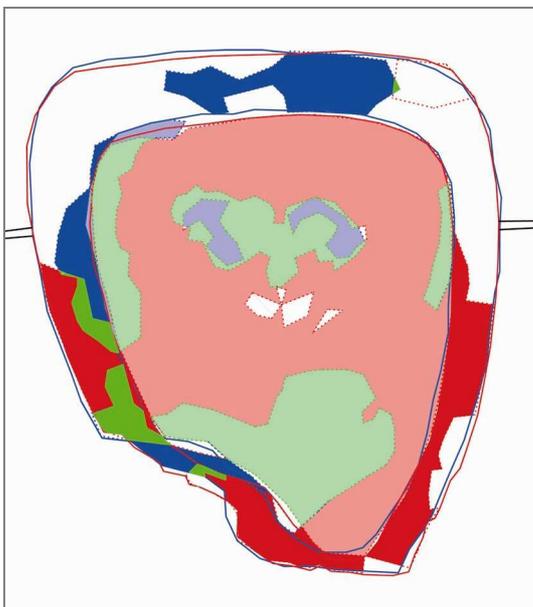
**Abb. 9:** Vermessung der Gesamtbruchfläche und Dentinfläche der Basis (links) und des Fragments (rechts), Markierung der Überlagerungsmarken



**Abb. 10:** Vermessung der adhäsivbedeckten Flächen im Schmelz- und Dentinbereich der Basis (links) und des Fragments (rechts)



**Abb. 11:** Alle eingezeichneten Flächen von Basis (links) und Fragment (rechts)



**Abb. 12:** Überlagerung der beiden Bruchflächen zur Bestimmung der gemeinsamen adhäsivbedeckten Schnittflächen

**Legende zu Abb. 9-13:**



Umriss Gesamt + Dentin <sub>Basis</sub>



Umriss Gesamt + Dentin <sub>Fragment</sub>



Umriss Adhäsivflächen <sub>Basis</sub>



Umriss Adhäsivflächen <sub>Fragment</sub>



Umriss adhäsivbedeckter Schnittflächen <sub>Basis + Fragment</sub>



Adhäsivflächen im Schmelz <sub>Basis</sub>



Adhäsivflächen im Dentin <sub>Basis</sub>



Adhäsivflächen im Schmelz <sub>Fragment</sub>



Adhäsivflächen im Dentin <sub>Fragment</sub>



Adh. Schnittflächen im Schmelz



Adh. Schnittflächen im Dentin



Nicht adhäsivbedeckte Flächen im Schmelz- bzw. Dentinbereich

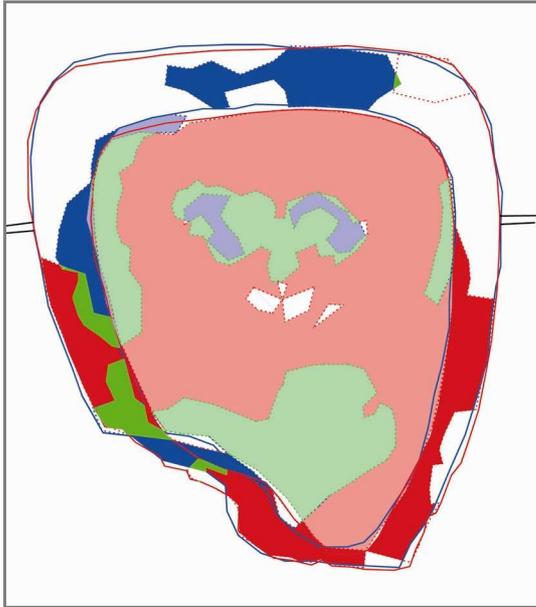


Abb. 13: Bestimmung der Frakturmodi



Adhäsivfraktur zw. Schmelz <sub>Fragment</sub>  
und Adhäsiv <sub>Basis</sub>



Adhäsivfraktur zw. Dentin <sub>Fragment</sub>  
und Adhäsiv <sub>Basis</sub>



Adhäsivfraktur zw. Schmelz <sub>Basis</sub>  
und Adhäsiv <sub>Fragment</sub>



Adhäsivfraktur zw. Dentin <sub>Basis</sub>  
und Adhäsiv <sub>Fragment</sub>



Kohäsivfraktur im Schmelz



Kohäsivfraktur im Dentin



Kohäsivfraktur im Verbundmaterial  
des Schmelzes



Kohäsivfraktur im Verbundmaterial  
des Dentins

### 3.6 Statistische Auswertung

Alle Ergebnisse der Flächenvermessung konnten nun in Tabellen des Computerprogramms Microsoft® Excel 2002 übertragen werden. Da sich die Werte auf die Fotos bezogen und nicht auf die originalen Größen der Bruchflächen, wurden alle ermittelten Flächen anhand des Streckenverhältnisses zwischen den farbigen Punktmarkierungen auf die reellen Größen umgerechnet. Anhand dieser Werte konnten nun die übrigen Schnittflächen errechnet und somit die gewünschten Prozentanteile der übrigen Bruchflächen bestimmt werden. Zum Vergleich der Frakturmodi zwischen den verschiedenen Dentinadhäsivsystemen wurden nun die Werte der einzelnen Zähne innerhalb der sechs Versuchsgruppen zusammengefasst. Ebenfalls mit Hilfe der Software Microsoft® Excel 2002 konnten somit die Prozentanteile der vier möglichen Bruchverläufe jeweils für Dentin und Schmelz errechnet und anhand von Säulendiagrammen grafisch dargestellt werden.

#### 3.6.1 Normalverteilung

Um herauszufinden, ob es zwischen den Ergebnissen der Versuchsgruppen signifikante Unterschiede gab, wurden statistische Tests eingesetzt. Die statistische Auswertung der Bruchkräfte wurde unter Verwendung des Computerprogramms SPSS (Version 11, Fa. SPSS Inc.) durchgeführt. Eine Ermittlung der Medianwerte erlaubte den Vergleich mit den zuvor berechneten Mittelwerten. Läge eine Normalverteilung der Werte der einzelnen Versuchszähne innerhalb einer Versuchsgruppe vor, so wären die beiden statistischen Kennwerte identisch. Kann man nicht von einer Normalverteilung ausgehen, ergibt der Medianwert eine exaktere Auskunft über das Ergebnis, da dieser stark abweichende Werte weniger berücksichtigt, weil er grafisch betrachtet genau in der Mitte aller gewonnenen Werte liegt. Um herauszufinden, welchen statistischen Test man zur Überprüfung der Ergebnisse am besten einsetzt, musste festgestellt werden, ob innerhalb der verschiedenen Versuchsgruppen Normalverteilungen der Werte vorliegen. Da man davon ausgehen konnte, dass es sich weder im Schmelz- noch im Dentinbereich der sechs Versuchsgruppen um eine Normalverteilung handelte, wurden nicht-parametrische Tests zur Überprüfung der Werte herangezogen.

### 3.6.2 Nichtparametrische Tests

Zum Vergleich der Versuchsgruppen untereinander wurden mit Hilfe des **Kruskal-Wallis-Tests** die prozentualen Flächenanteile der möglichen Frakturmodi jeweils für Dentin und Schmelz untersucht. Der statistische Test hat alle sechs Versuchsgruppen miteinander verglichen und anhand der p-Werte das Testergebnis geliefert. Dabei lagen die Wahrscheinlichkeitswerte immer zwischen 0 und 1 und wurden mit 0,05, also 5%, verglichen. Die 5% stellten die private Irrtumswahrscheinlichkeit dar, das heißt ein Fehler von 5% wurde gewährt. Lag ein p-Wert also über dem Wert 0,05, so war er nicht signifikant. In Bezug auf die Versuchsgruppen bedeutete dies, dass es keine Unterschiede zwischen den Versuchsgruppen hinsichtlich der prozentualen Flächenanteile gab. Für den Fall, dass ein p-Wert zwischen 0 und 0,05 lag, also unter 5%, war das Ergebnis signifikant und man konnte von Unterschieden zwischen den Versuchsgruppen ausgehen. Da der Kruskal-Wallis-Test alle Versuchsgruppen parallel miteinander vergleichen hat, konnte er nur herausfinden, ob es Signifikanzen gab, aber nicht, wo diese sich befanden. Um festzustellen, welche Versuchsgruppen sich unterschieden, musste ein weiterer nichtparametrischer Test herangezogen werden.

Der **Mann-Whitney-Test** war ein Folgetest, der die Variablen, die beim Kruskal-Wallis-Test signifikant waren, gesondert überprüft hat. Dabei wurden jeweils nur 2 Gruppen miteinander verglichen um herauszufinden, wo die Unterschiede lagen. Die Ergebnisse präsentierten sich hier ebenfalls als asymptotische Signifikanz, das heißt als p-Wert zwischen 0 und 1. Da es sich durch die Einzelvergleiche um mehrere Testdurchgänge handelte, bedurfte der privaten Irrtumswahrscheinlichkeit von 5% eine Korrektur, der **Alpha-Korrektur nach Bonferroni**. Dabei wurden die 5% durch die Anzahl der Tests geteilt, damit man insgesamt wieder auf einen Wert von 5% gelangte. Die Testergebnisse in Form von p-Werten wurden nun also mit der errechneten Irrtumswahrscheinlichkeit (z.B. bei 15 Tests mit 0,0033) verglichen und nach dem gleichen Prinzip wie es beim Kruskal-Wallis-Test der Fall war, bei  $p < \text{Irrtumswahrscheinlichkeit}$  als signifikant und bei darüber liegenden Werten als nicht signifikant eingeschätzt.

## 4 Ergebnisse

### 4.1 Bruchverhalten der getesteten Dentinadhäsivsysteme

Die Ergebnisse der Bruchflächenanalyse beziehen sich auf sechs Versuchsgruppen, die bedingt durch Trümmerfrakturen während des zweiten Bruchversuchs im Zuge der vorangegangenen In-vitro-Studie zur Verbundfestigkeit unterschiedliche Gruppenstärken aufweisen (Tab. 1). Insgesamt wurden 74 Zähne ausgewertet.

Versuchsgruppe	Dentinadhäsivsystem	Anzahl der Versuchszähne
1	<b>OptiBond FL<sup>®</sup></b> (Kerr)	13
2	<b>Syntac<sup>®</sup></b> (Ivoclar Vivadent)	14
3	<b>AdheSE<sup>®</sup></b> (Ivoclar Vivadent)	14
4	<b>Adper<sup>®</sup> Prompt<sup>®</sup> L-Pop<sup>®</sup></b> (3M ESPE)	14
5	<b>OptiBond FL<sup>®</sup></b> (Kerr) kombiniert mit <b>Tetric<sup>®</sup> Flow</b> (Ivoclar Vivadent)	13
6	Bruchspalt mit Substanzdefekt, <b>OptiBond FL<sup>®</sup></b> (Kerr) kombiniert mit <b>Tetric<sup>®</sup> Flow</b> (Ivoclar Vivadent)	6

**Tab. 1:** Versuchsgruppen mit Anzahl der Versuchszähne

#### 4.1.1 Frakturmodi der einzelnen Versuchszähne

Jeder einzelne Versuchszahn einer Gruppe wurde auf sein Bruchverhalten hin analysiert, dabei erfolgte die Auswertung für Schmelz und Dentin separat. Durch Überlagerungen und Vermessungen der verschiedenen Anteile einer Bruchfläche ergaben sich, bedingt durch vier mögliche Frakturmodi (Kohäsivbruch im Restaurationsmaterial, Kohäsivbruch im Zahn, Adhäsivbruch zwischen Zahnfragment und Restaurationsmaterial bzw. Adhäsivbruch zwischen Zahnbasis und Restaurationsmaterial), insgesamt acht Werte pro Zahn, jeweils vier für Schmelz bzw. Dentin (Tab. 2 und 3). Bei den

Werten handelt es sich um die prozentualen Anteile der vier verschiedenen Bruchverläufe in Bezug zur Gesamtbruchfläche eines Zahns. Durch leicht differierende Winkel beim Fotografieren der Zähne kamen geringe Überlagerungsunterschiede und daher geringe Abweichungen zustande, auch in den negativen Bereich. Zudem handelt es sich um gerundete Prozentwerte, so dass die Addition der vier Einzelbruchflächen zur Gesamtbruchfläche eines Zahns (100%) abweichen kann.

So ergab sich zum Beispiel für den 4. Versuchszahn der zweiten Gruppe (Syntac<sup>®</sup>) folgendes Bruchverhalten im Schmelz: 0% Kohäsivbrüche im Restaurationsmaterial, 80% Kohäsivbrüche im Schmelz, 14% Adhäsivbrüche zum Fragment und 6% Adhäsivbrüche zur Basis. Dies bedeutet, dass es auf der gesamten Bruchfläche (100%) keine Brüche innerhalb des Restaurationsmaterials Syntac<sup>®</sup> gab, dafür lagen 80% der Frakturfläche innerhalb des Schmelzes. In 14% hat sich bei der Fraktur die adhäsive Verbindung vom Restaurationsmaterial Syntac<sup>®</sup> zum Zahnfragment gelöst und bei 6% zur Zahnbasis.

## Schmelz

Gr.	Fraktur Modus (%)	Versuchs- zahn													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	Ko im Material	0	10	24	24	24	47	54	32	12	0	17	49	31	-
	Ko im Schmelz	58	20	31	11	8	10	-1	16	41	59	31	11	19	-
	Ad zum Fragm	42	7	18	13	19	30	13	13	24	0	6	25	4	-
	Ad zur Basis	0	63	27	52	49	13	35	39	23	41	47	15	47	-
2	Ko im Material	11	10	22	0	10	11	1	19	0	0	19	1	0	0
	Ko im Schmelz	67	59	62	80	26	32	86	31	52	13	30	49	47	79
	Ad zum Fragm	14	21	8	14	41	44	4	22	11	87	27	34	49	11
	Ad zur Basis	9	10	8	6	23	14	9	28	37	0	24	16	4	10
3	Ko im Material	14	29	40	17	29	11	24	15	23	13	34	6	1	0
	Ko im Schmelz	62	8	2	28	6	25	10	15	21	16	13	40	22	73
	Ad zum Fragm	11	49	36	41	13	53	15	61	28	22	13	23	69	2
	Ad zur Basis	13	15	22	14	52	11	51	8	27	48	40	32	8	25
4	Ko im Material	7	17	2	7	0	7	21	2	9	24	27	1	5	25
	Ko im Schmelz	57	59	66	54	88	9	36	26	53	22	17	35	13	-1
	Ad zum Fragm	18	15	15	29	0	19	27	54	18	43	39	27	37	5
	Ad zur Basis	18	9	17	10	12	65	16	18	20	11	17	37	45	71
5	Ko im Material	55	24	14	37	40	25	22	18	1	80	28	18	13	-
	Ko im Schmelz	-3	11	36	7	2	15	16	25	56	-1	-1	3	18	-
	Ad zum Fragm	12	14	6	27	12	38	42	29	35	4	23	12	39	-
	Ad zur Basis	35	51	43	29	46	22	20	28	8	17	50	68	30	-
6	Ko im Material	29	26	11	54	21	16	-	-	-	-	-	-	-	-
	Ko im Schmelz	31	41	32	4	29	46	-	-	-	-	-	-	-	-
	Ad zum Fragm	9	4	13	27	19	15	-	-	-	-	-	-	-	-
	Ad zur Basis	31	28	44	15	31	22	-	-	-	-	-	-	-	-

**Tab. 2:** Frakturmodi der einzelnen Versuchszähne im Schmelz (in Prozent)

## Dentin

Gr.	Fraktur Modus (%)	Versuchs- zahn													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	Ko im Material	46	89	56	63	88	51	81	59	19	44	34	63	54	-
	Ko im Dentin	10	-3	3	27	0	16	4	7	9	0	3	6	3	-
	Ad zum Fragm	32	9	31	5	5	29	10	31	2	1	24	3	11	-
	Ad zur Basis	12	5	9	5	7	4	5	3	70	55	38	28	31	-
2	Ko im Material	53	47	62	48	31	14	7	26	11	1	63	1	44	6
	Ko im Dentin	3	44	20	11	3	70	14	20	11	12	19	13	30	60
	Ad zum Fragm	26	7	15	4	20	7	54	23	4	72	14	75	11	20
	Ad zur Basis	19	3	3	37	46	9	25	31	73	15	4	11	15	13
3	Ko im Material	97	69	40	96	43	71	30	61	57	40	39	27	0	0
	Ko im Dentin	-1	10	4	-3	12	-2	13	6	-1	10	1	2	7	99
	Ad zum Fragm	1	14	36	3	17	10	4	17	31	30	5	5	46	1
	Ad zur Basis	3	6	20	5	27	22	54	16	12	21	55	66	47	0
4	Ko im Material	8	90	89	85	0	79	54	79	51	44	97	33	61	35
	Ko im Dentin	53	0	-3	0	81	-1	12	3	4	-3	0	7	-2	0
	Ad zum Fragm	6	5	12	6	0	15	10	11	13	6	2	38	5	0
	Ad zur Basis	33	5	3	9	19	7	24	7	32	53	1	23	36	65
5	Ko im Material	85	13	87	70	70	44	83	63	20	53	51	56	55	-
	Ko im Dentin	3	14	1	21	1	46	7	17	2	1	1	0	7	-
	Ad zum Fragm	8	1	8	5	9	6	7	10	64	6	9	6	10	-
	Ad zur Basis	4	72	3	4	20	4	3	10	13	39	39	38	27	-
6	Ko im Material	29	44	15	92	75	50	-	-	-	-	-	-	-	-
	Ko im Dentin	39	11	1	1	8	36	-	-	-	-	-	-	-	-
	Ad zum Fragm	24	24	13	3	7	13	-	-	-	-	-	-	-	-
	Ad zur Basis	8	21	71	4	9	2	-	-	-	-	-	-	-	-

Tab. 3: Frakturmodi der einzelnen Versuchszähne im Dentin (in Prozent)

#### 4.1.2 Mittelwerte der Frakturmodi aller Versuchszähne innerhalb einer Gruppe

Zur Beurteilung des Bruchverhaltens innerhalb der Versuchsgruppen wurden die Werte der Einzelzähne einer Gruppe zusammengefasst. Die Mittelwerte der verschiedenen Frakturflächen ergaben dann die Ergebnisse für das Bruchverhalten der verschiedenen Dentinadhäsivsysteme (Tab. 4 und 5, Abb. 14 und 15), ebenfalls differenzierend zwischen den Zahnmaterialien Schmelz und Dentin.

##### Schmelz

Demnach ergab sich für die erste Versuchsgruppe (**OptiBond FL**<sup>®</sup>) im Schmelz ein Bruchverhalten von 28% Kohäsivbrüchen innerhalb des Restaurationsmaterials, 22% Kohäsivbrüchen innerhalb des Schmelzes, 16% Adhäsivbrüchen zwischen Restaurationsmaterial der Basis und des Schmelzes des Fragments, sowie 34% Adhäsivbrüchen zwischen Schmelz der Basis und Restaurationsmaterial des Fragments.

In der zweiten Versuchsgruppe (**Syntac**<sup>®</sup>) ergaben die Mittelwerte der Frakturflächen folgendes Bruchverhalten: 11% Kohäsivbrüche innerhalb des Restaurationsmaterials, 33% Kohäsivbrüche innerhalb des Schmelzes, 38% Adhäsivbrüche zum Fragment und 18% Adhäsivbrüche zur Basis.

Die dritte Versuchsgruppe (**AdheSE**<sup>®</sup>) zeigte zu 19% Kohäsivbrüche innerhalb des Restaurationsmaterials, ebenfalls zu 19% Kohäsivbrüche innerhalb des Schmelzes, zu 33% Adhäsivbrüche zum Fragment sowie zu 29% Adhäsivbrüche zur Basis.

Die Mittelwerte aller Bruchverläufe der Versuchszähne aus der vierten Gruppe (**Adper**<sup>®</sup> **Prompt**<sup>®</sup> **L-Pop**<sup>®</sup>) ergaben: 14% Kohäsivbrüche innerhalb des Restaurationsmaterials, zu 18% Kohäsivbrüche innerhalb des Schmelzes, zu 37% Adhäsivbrüche zum Fragment sowie zu 32% Adhäsivbrüche zur Basis.

Bei der kombinierten Anwendung von **OptiBond FL**<sup>®</sup> mit **Tetric**<sup>®</sup> **Flow** in der Versuchsgruppe 5 lagen durchschnittlich 28% der Bruchflächenanteile innerhalb des

Restaurationsmaterials, 15% innerhalb des Schmelzes, 21% zwischen Restaurationsmaterial und Zahnfragment und 35% der Bruchflächenanteile zwischen Restaurationsmaterial und Basis.

Die Mittelwerte der sechs Versuchszähne mit **Substanzdefekten**, ebenfalls restauriert mit **OptiBond FL<sup>®</sup>** und **Tetric<sup>®</sup> Flow**, ergaben für die letzte Versuchsgruppe folgendes Bruchverhalten: 28% Kohäsivbrüche innerhalb des Restaurationsmaterials, 30% Kohäsivbrüche innerhalb des Schmelzes, 15% Adhäsivbrüche zum Fragment und 28% Adhäsivbrüche zur Basis.

### **Dentin**

Die Auswertungen der ersten Versuchsgruppe (**OptiBond FL<sup>®</sup>**) im Dentin ergaben folgende Bruchverläufe: 62% Kohäsivbrüche innerhalb des Restaurationsmaterials, 22% Kohäsivbrüche innerhalb des Dentins, 16% Adhäsivbrüche zwischen dem Restaurationsmaterial der Basis und dem Dentin des Fragments sowie 34% Adhäsivbrüche zur Basis.

Für die zweite Versuchsgruppe (**Syntac<sup>®</sup>**) ergab sich im Dentin ein Bruchverhalten von 32% Kohäsivbrüchen innerhalb des Restaurationsmaterials, 8% Kohäsivbrüchen innerhalb des Dentins, 38% Adhäsivbrüchen zwischen dem Restaurationsmaterial der Basis und dem Dentin des Fragments sowie 23% Adhäsivbrüchen zwischen dem Dentin der Basis und dem Restaurationsmaterial des Fragments.

Die Mittelwerte aller Frakturmodi der Versuchszähne aus der dritten Versuchsgruppe (**AdheSE<sup>®</sup>**) ergaben im Dentin: 51% Kohäsivbrüche innerhalb des Restaurationsmaterials, ebenfalls zu 6% Kohäsivbrüche innerhalb des Dentins, zu 14% Adhäsivbrüche zum Fragment sowie zu 29% Adhäsivbrüche zur Basis.

In der vierten Gruppe (**Adper<sup>®</sup> Prompt<sup>®</sup> L-Pop<sup>®</sup>**) ergaben die Mittelwerte der Bruchverläufe ein durchschnittliches Bruchverhalten von: 60% Kohäsivbrüche

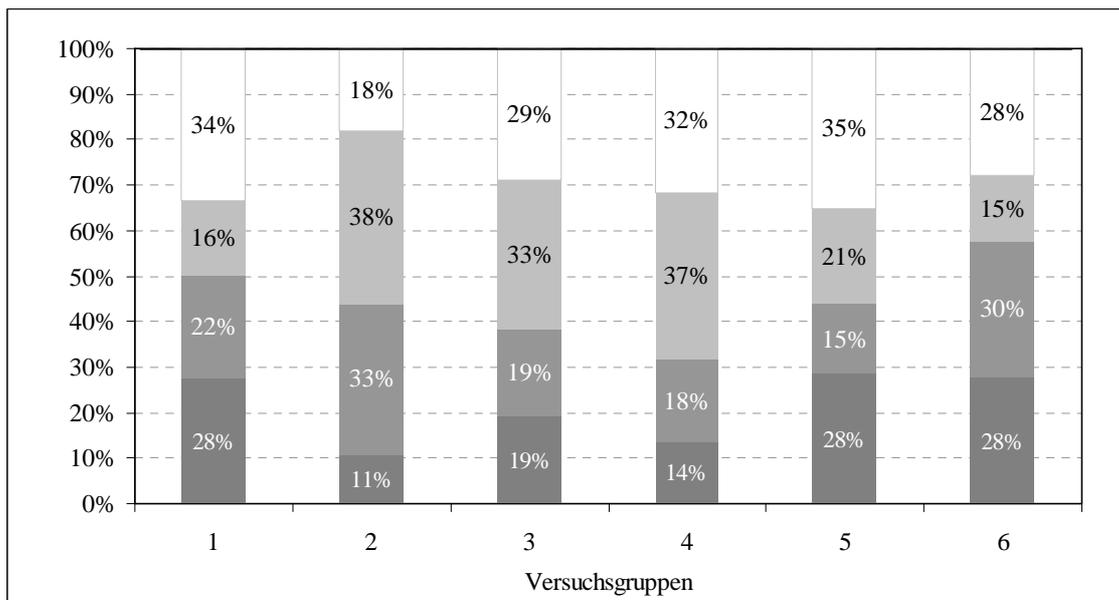
innerhalb des Restaurationsmaterials, 3% Kohäsivbrüche innerhalb des Dentins, 10% Adhäsivbrüche zum Fragment und 27% Adhäsivbrüche zur Basis.

Die kombinierte Anwendung von **OptiBond FL**<sup>®</sup> mit dem fließfähigen Komposit **Tetric**<sup>®</sup> **Flow** in der Versuchsgruppe 5 zeigte, dass im Dentin durchschnittlich 60% der Bruchflächenanteile innerhalb des Restaurationsmaterials lagen, 10% innerhalb des Dentins, 11% zwischen dem Restaurationsmaterial und dem Zahnfragment und 19% der Bruchflächenanteile zwischen dem Restaurationsmaterial und der Basis.

In der 6. Versuchsgruppe, bei der die kombinierte Anwendung von **OptiBond FL**<sup>®</sup> mit **Tetric**<sup>®</sup> **Flow** an Zähnen mit Substanzdefekten im Bruchspalt getestet wurde, ergaben die Mittelwerte der Frakturmodi der Versuchszähne folgendes Bruchverhalten: 56% Kohäsivbrüche innerhalb des Restaurationsmaterials, 14% Kohäsivbrüche innerhalb des Dentins, 13% Adhäsivbrüche zum Fragment und 18% Adhäsivbrüche zur Basis.

Frakturmodus Gruppe	Kohäsivbruch im Material	Kohäsivbruch im Schmelz	Adhäsivbruch zum Fragment	Adhäsivbruch zur Basis
1	28 %	22 %	16 %	34 %
2	11 %	33 %	38 %	18 %
3	19 %	19 %	33 %	29 %
4	14 %	18 %	37 %	32 %
5	28 %	15 %	21 %	35 %
6	28 %	30 %	15 %	28 %

**Tab. 4:** Mittelwerte der Einzelbruchflächen aller Versuchszähne innerhalb einer Gruppe im Schmelz (in Prozent)

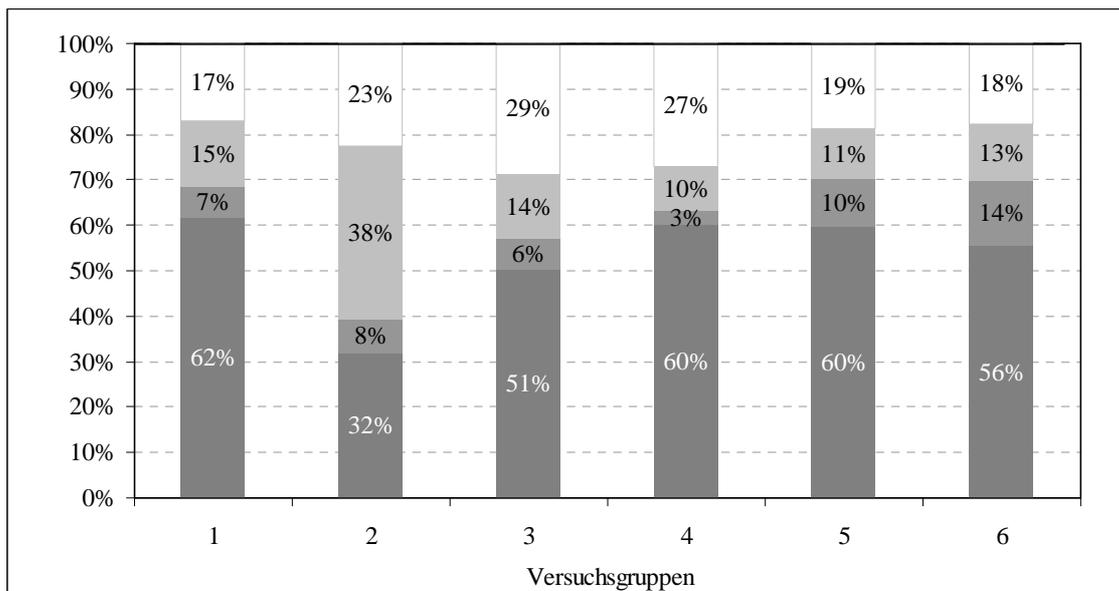


- Adhäsivbrüche zwischen Schmelz<sub>Basis</sub> und Restaurationmaterial<sub>Fragment</sub>
- Adhäsivbrüche zwischen Schmelz<sub>Fragment</sub> und Restaurationmaterial<sub>Basis</sub>
- Kohäsivbrüche innerhalb des Schmelzes
- Kohäsivbrüche innerhalb des Restaurationmaterials

**Abb. 14:** Mittelwerte der Einzelbruchflächen aller Versuchszähne innerhalb einer Gruppe im Schmelz (in Prozent)

Frakturmodus Gruppe	Kohäsivbruch im Material	Kohäsivbruch im Dentin	Adhäsivbruch zum Fragment	Adhäsivbruch zur Basis
1	62 %	7 %	15 %	17 %
2	32 %	8 %	38 %	23 %
3	51 %	6 %	14 %	29 %
4	60 %	3 %	10 %	27 %
5	60 %	10 %	11 %	19 %
6	56 %	14 %	13 %	18 %

**Tab. 5:** Mittelwerte der Einzelbruchflächen aller Versuchszähne innerhalb einer Gruppe im Dentin (in Prozent)



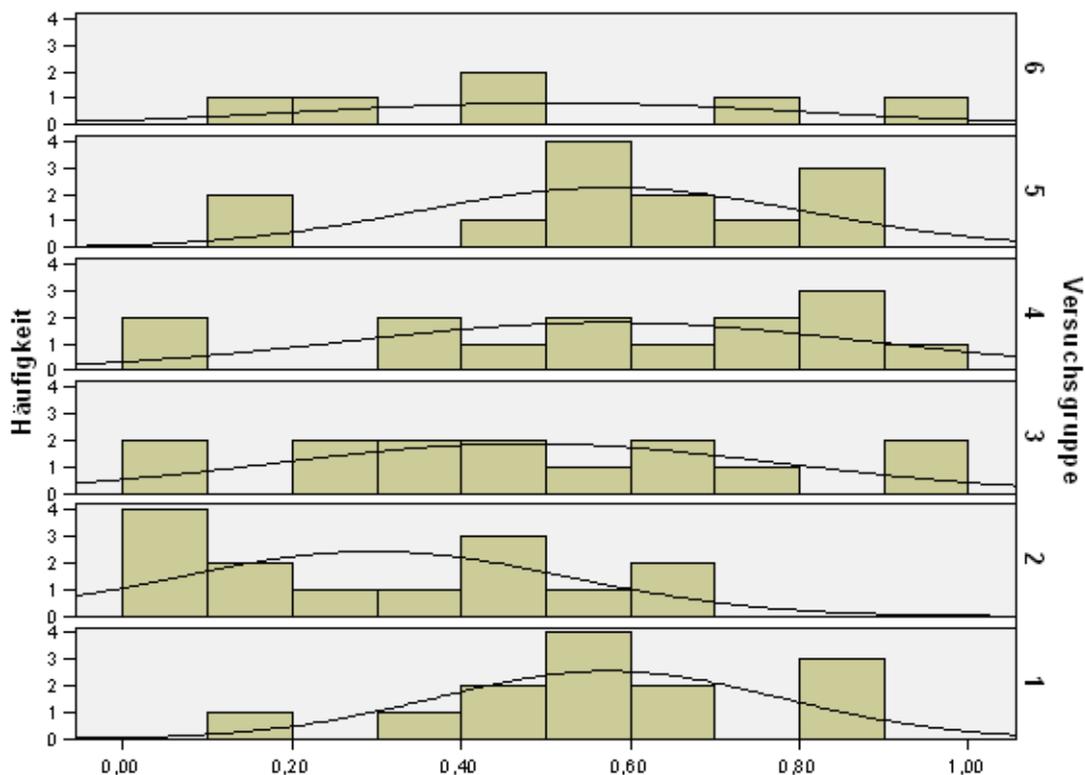
- Adhäsivbrüche zwischen Dentin<sub>Basis</sub> und Restaurationmaterial<sub>Fragment</sub>
- Adhäsivbrüche zwischen Dentin<sub>Fragment</sub> und Restaurationmaterial<sub>Basis</sub>
- Kohäsivbrüche innerhalb des Dentins
- Kohäsivbrüche innerhalb des Restaurationmaterials

**Abb. 15:** Mittelwerte der Einzelbruchflächen aller Versuchszähne innerhalb einer Gruppe im Dentin (in Prozent)

## 4.2 Statistische Auswertung

### 4.2.1 Normalverteilung

Zunächst wurden die Medianwerte für die vier möglichen Bruchverläufe innerhalb der einzelnen Versuchsgruppen jeweils für den Schmelz- und den Dentinbereich bestimmt um herauszufinden, ob man in allen sechs Versuchsgruppen von einer Normalverteilung der Werte ausgehen konnte. Es zeigte sich, dass Mittelwerte und Medianwerte bei einigen Gruppen stark abwichen und daher keine Normalverteilung vorlag. Dies machte den Einsatz nichtparametrischer Tests erforderlich. Als Beispiel sei die Überprüfung der Normalverteilung für den Frakturmodus „Kohäsivbruch innerhalb des Restaurationsmaterials“ im Dentinbereich veranschaulicht (Abb. 16). Die fehlende Gruppierung um den Mittelwert zeigt, dass keine Normalverteilung vorliegt.



**Abb. 16:** Medianwerte der prozentualen Flächenanteile aller Kohäsivbrüche innerhalb des Restaurationsmaterials im Dentinbereich

## 4.2.2 Nichtparametrische Tests

### Kruskal-Wallis-Test

Mit diesem nichtparametrischen Test konnte festgestellt werden, ob es überhaupt Unterschiede zwischen den Versuchsgruppen gab. Die Ergebnisse des Tests stellen sich als asymptotische Signifikanz zwischen 0 und 1 dar und wurden hinsichtlich ihres Verhältnisses zur privaten Irrtumswahrscheinlichkeit von 5% als signifikant bzw. nicht signifikant eingeschätzt.

Im Schmelzbereich zeigten nur die Ergebnisse der Adhäsivbrüche zum Fragment keine Signifikanzen innerhalb der Versuchsgruppen. Hier lag der p-Wert bei 0,324, also 32,4%, was auf homogene Werte und keine Unterschiede innerhalb der sechs Gruppen deutet. Bei den Flächenanteilen der übrigen drei Frakturmodi konnte man allerdings von Unterschieden zwischen den Versuchsgruppen ausgehen. Der p-Wert des kohäsiven Bruchverlaufs im Restaurationsmaterial lag bei 0,001, also 0,1%, ebenso der p-Wert des kohäsiven Frakturverlaufs im Schmelz. Und auch die asymptotische Signifikanz der Adhäsivbrüche zur Schmelzbasis lag mit einem Wert von 0,009 (0,9%) unter dem relevanten Wert von 5% und stellte sich somit ebenfalls als signifikant dar (Tab. 6).

Fraktur- modus	Kohäsivbruch im Material	Kohäsivbruch im Schmelz	Adhäsivbruch zum Fragment	Adhäsivbruch zur Basis
A. Signifikanz				
p-Wert	<b>0,001</b>	<b>0,001</b>	0,324	<b>0,009</b>
p-Wert (%)	<b>0,1 %</b>	<b>0,1 %</b>	32,4 %	<b>0,9 %</b>
Signifikanz	<b>signifikant</b>	<b>signifikant</b>	nicht signif.	<b>signifikant</b>

**Tab. 6:** Ergebnisse des Kruskal-Wallis-Tests im Schmelzbereich

Im Dentinbereich dagegen konnte man nur bei einem Frakturmodus von Unterschieden zwischen den getesteten Dentinadhäsivsystemen sprechen. Bei den prozentualen

Flächenanteilen der Kohäsivbrüche innerhalb des Dentins ergab der Kruskal-Wallis-Test eine asymptotische Signifikanz von 0,009 bzw. 0,9%.

In den übrigen drei Bruchverläufen unterschieden sich die Versuchsgruppen untereinander nicht. Der p-Wert für den Vergleich der Flächenanteile der Kohäsivbrüche im Restaurationsmaterial lag bei 0,065, also 6,5%. Auch die asymptotische Signifikanz der Adhäsivbrüche zum Fragment lag mit einem Wert von 0,220 (22%) deutlich über der Irrtumswahrscheinlichkeit von 5%. Auch der p-Wert der Adhäsivbrüche zur Basis deutete mit 0,958 (95,8%) eindeutig auf homogene Werte innerhalb der sechs Versuchsgruppen hin (Tab. 7).

Frakturmodus A. Signifikanz	Kohäsivbruch im Material	Kohäsivbruch im Dentin	Adhäsivbruch zum Fragment	Adhäsivbruch zur Basis
p-Wert	0,065	<b>0,009</b>	0,220	0,958
p-Wert (%)	6,5 %	<b>0,9 %</b>	22,0 %	95,8 %
Signifikanz	nicht signif.	<b>signifikant</b>	nicht signif.	nicht signif.

**Tab. 7:** Ergebnisse des Kruskal-Wallis-Tests im Dentinbereich

Es ist festzustellen, dass im Schmelzbereich bezüglich dreier Frakturmodi Unterschiede zwischen den Versuchsgruppen existierten und es im Dentinbereich bei nur einem Frakturmodus signifikante Unterschiede zwischen den Adhäsivsystemen gab. Zwischen welchen Versuchsgruppen diese Unterschiede bestanden, sollte ein weiterer nicht-parametrischer Test ergeben.

### Mann-Whitney-Test

Dieser Test untersuchte als Folgetest die Variablen, die beim Kruskal-Wallis-Test signifikant waren, indem immer zwei Versuchsgruppen miteinander verglichen wurden.

Da es sich hier um mehrere Testdurchgänge handelte, musste mit Hilfe der Alpha-Korrektur nach Bonferroni der Vergleichswert von 5% der Anzahl an Durchgängen angepasst werden. Aufgrund der Ergebnisse des Kruskal-Wallis-Tests mussten 15 Vergleiche zwischen den Versuchsgruppen stattfinden. Daraus ergab sich ein neuer Vergleichswert von  $0,05 / 15 = 0,0033$  (0,33%). Insgesamt erhielt man dann wieder eine private Irrtumswahrscheinlichkeit von 5%.

Da es im Schmelzbereich die Flächenanteile von drei Frakturmodi und im Dentinbereich von einem Frakturmodus zu analysieren galt, ergab der Mann-Whitney-Test für alle Variablen, die beim Kruskal-Wallis-Test relevant waren, am Ende vier neue Variablen (Tab. 8-11).

Zuerst wurden alle Versuchsgruppen hinsichtlich ihres kohäsiven Bruchverlaufs innerhalb des Restaurationsmaterials im Schmelzbereich verglichen. Die Einzelvergleiche ergaben, dass sich nur die Versuchsgruppen 2 und 5 unterschieden. Dabei lag der p-Wert mit 0,001 (0,1%) unter dem errechneten Vergleichswert von 0,33%. Zwischen allen anderen Gruppen gab es keine Unterschiede, die p-Werte waren alle größer als 0,33% und damit nicht signifikant (Tab. 8).

Gr	1	2	3	4	5	6
1		0,0071	0,382	0,047	0,590	0,861
2	nicht signif		0,009	0,221	<b>0,001</b>	0,004
3	nicht signif	nicht signif		0,135	0,174	0,284
4	nicht signif	nicht signif	nicht signif		0,010	0,026
5	nicht signif	<b>signifikant</b>	nicht signif	nicht signif		0,861
6	nicht signif	nicht signif	nicht signif	nicht signif	nicht signif	

**Tab. 8:** Asymptomatische Signifikanzen der Kohäsivbrüche innerhalb des Materials im Schmelzbereich

Der Einzelvergleich der Versuchsgruppen hinsichtlich der Kohäsivbrüche innerhalb des Schmelzes ergab in drei Fällen Signifikanzen. Mit einem p-Wert von 0,0031 (0,31%)

ergab der Mann-Whitney-Test Unterschiede zwischen den Versuchsgruppen 1 und 2. Die Ergebnisse für den Vergleich der Gruppen 2 und 3 sind mit 0,00328 (0,328%) ebenfalls signifikant, ebenso wie der Vergleich der Gruppen 2 und 5 mit 0,000 (0%). Bei allen anderen Versuchsgruppen bestanden in Bezug auf diesen Frakturmodus keine relevanten Unterschiede, entsprechende p-Werte liegen über 0,33% (Tab.9).

Gr	1	2	3	4	5	6
1		<b>0,0031</b>	0,923	0,145	0,118	0,293
2	<b>signifikant</b>		<b>0,00328</b>	0,215	<b>0,000</b>	0,070
3	nicht signif	<b>signifikant</b>		0,141	0,120	0,187
4	nicht signif	nicht signif	nicht signif		0,013	0,564
5	nicht signif	<b>signifikant</b>	nicht signif	nicht signif		0,044
6	nicht signif	nicht signif	nicht signif	nicht signif	nicht signif	

**Tab. 9:** Asymptomatische Signifikanzen der Kohäsivbrüche innerhalb des Schmelzes

Die Untersuchung der im Kruskal-Wallis-Test signifikanten Variablen „Adhäsivbrüche zur Schmelzbasis“ zeigte, dass sich bei diesem Frakturmodus lediglich die Gruppen 2 und 5 unterschieden, hier lag die asymptomatische Signifikanz mit 0,002 (0,2%) unter der privaten Irrtumswahrscheinlichkeit. Alle anderen Vergleiche haben keine Signifikanzen ergeben (Tab.10).

Gr	1	2	3	4	5	6
1		0,00332	0,244	0,159	0,898	0,380
2	nicht signif		0,035	0,031	<b>0,002</b>	0,013
3	nicht signif	nicht signif		0,854	0,225	0,458
4	nicht signif	nicht signif	nicht signif		0,109	0,284
5	nicht signif	<b>signifikant</b>	nicht signif	nicht signif		0,599
6	nicht signif	nicht signif	nicht signif	nicht signif	nicht signif	

**Tab. 10:** Asymptomatische Signifikanzen der Adhäsivbrüche zur Schmelzbasis

Auch der Einzelvergleich hinsichtlich der Kohäsivbrüche innerhalb des Dentins ergab lediglich zwischen zwei Versuchsgruppen Unterschiede. Mit einem p-Wert von 0,00328 (0,328%) konnte man zwischen den Gruppen 2 und 3 ganz knapp von Unterschieden ausgehen, während alle übrigen Vergleiche keine Signifikanzen ergaben (Tab.11).

Gr	1	2	3	4	5	6
1		0,0042	0,698	0,207	0,980	0,254
2	nicht signif		<b>0,00328</b>	0,004	0,013	0,216
3	nicht signif	<b>signifikant</b>		0,581	0,497	0,248
4	nicht signif	nicht signif	nicht signif		0,120	0,099
5	nicht signif	nicht signif	nicht signif	nicht signif		0,430
6	nicht signif	nicht signif	nicht signif	nicht signif	nicht signif	

**Tab. 11:** Asymptomatische Signifikanzen der Kohäsivbrüche innerhalb des Dentins

Insgesamt haben die Versuche und Tests gezeigt, dass sich die verschiedenen Dentinadhäsivsysteme bezüglich ihres Bruchverhaltens nur in sechs Punkten unterschieden. OptiBond FL<sup>®</sup> und Syntac<sup>®</sup> unterschieden sich bei den Kohäsivbrüchen innerhalb des Schmelzes, dabei kam es bei Syntac<sup>®</sup> öfter zu Kohäsivbrüchen innerhalb des Schmelzes als bei OptiBond FL<sup>®</sup>. Bezüglich aller weiteren Frakturmodi gab es keine Unterschiede. Auch von allen anderen getesteten Dentinadhäsiven unterschied sich OptiBond FL<sup>®</sup> hinsichtlich seines Bruchverhaltens nicht. Syntac<sup>®</sup> dagegen zeigte nicht nur im Vergleich mit OptiBond FL<sup>®</sup> unterschiedliche Fraktur Tendenzen, sondern auch im Vergleich mit AdheSE<sup>®</sup> und mit der kombinierten Anwendung von OptiBond FL<sup>®</sup> und Tetric<sup>®</sup> Flow. Dabei unterschieden sich Syntac<sup>®</sup> und AdheSE<sup>®</sup> sowohl bezüglich des kohäsiven Bruchverhaltens innerhalb des Schmelzes als auch innerhalb des Dentins, indem bei Syntac<sup>®</sup> jeweils ein größerer Anteil kohäsiv im Zahn brach. Die größten Unterschiede aber gab es zwischen Syntac<sup>®</sup> und der kombinierten Anwendung von OptiBond FL<sup>®</sup> und Tetric<sup>®</sup> Flow, also zwischen den Versuchsgruppen 2 und 5. Hier zeigten sich Differenzen in drei Frakturmodi, bei den Kohäsivbrüchen innerhalb des Materials im Schmelzbereich, bei den Kohäsivbrüchen innerhalb des Schmelzes und bei

den Adhäsivbrüchen zur Schmelzbasis. Dabei bestand bei Syntac<sup>®</sup> ein größerer Anteil der Bruchfläche aus Kohäsivbrüchen innerhalb des Schmelzes, wohingegen bei der kombinierten Anwendung von OptiBond FL<sup>®</sup> und Tetric<sup>®</sup> Flow die Kohäsivbrüche innerhalb des Restaurationsmaterials sowie die Adhäsivbrüche zur Schmelzbasis prozentual überwogen. Zu allen übrigen Dentinadhäsivsystemen zeigte Syntac<sup>®</sup> ein ähnliches Frakturverhalten. Und auch der Vergleich von AdheSE<sup>®</sup> mit den anderen Dentinadhäsivsystemen ergab keine weiteren Differenzen. Adper<sup>®</sup> Prompt<sup>®</sup> L-Pop<sup>®</sup> unterschied sich hinsichtlich seines Bruchverhaltens nicht von den anderen Gruppen und auch die kombinierte Anwendung von OptiBond FL<sup>®</sup> und Tetric<sup>®</sup> Flow bei zusätzlichem Substanzdefekt im Bruchspalt zeigte keine Unterschiede zu den übrigen Dentinadhäsivsystemen.

Verglich man schließlich die Resultate der statistischen Tests mit den zuvor erstellten Diagrammen (Abb. 14 und 15), bestätigte sich die Annahme, dass das Bruchverhalten des Restaurationsmaterials **Syntac<sup>®</sup>** vor allem im Schmelzbereich am stärksten von den Frakturmodi der übrigen getesteten Dentinadhäsivsysteme abwich, vor allem von der kombinierten Anwendung von **OptiBond FL<sup>®</sup>** mit **Tetric<sup>®</sup> Flow**. Zwischen allen anderen Versuchsgruppen bestanden dagegen nur geringe Unterschiede im Bruchverhalten nach der Wiederbefestigung von Kronenfragmenten. Auch die auf den ersten Blick große Differenz von 38% Adhäsivbrüchen zum Dentinfragment des Dentinadhäsivs **Syntac<sup>®</sup>** zu den anderen Versuchsgruppen wurde von den statistischen Tests nicht bestätigt.

## 5 Diskussion

### 5.1 Beurteilung von Material und Methode

Zum Vergleich der verschiedenen Dentinadhäsive bezüglich ihrer Verwendung bei Kronenfrakturrestaurationen entschied man sich in dieser Studie für eine Untersuchung *in vitro*, an extrahierten menschlichen Zähnen. Im Gegensatz zu einer *In-vivo*-Untersuchung war es so möglich, innerhalb kurzer Zeit Informationen über die Frakturresistenz und das Bruchverhalten der zur Fragmentbefestigung verwendeten Dentinadhäsive zu erlangen. Durch die Untersuchung *in vitro* konnten Störfaktoren ausgeschlossen und die Versuchsreihe standardisiert werden. Klinische Studien dagegen sind nicht nur sehr zeitaufwendig, sondern auch auf engmaschige Recalls vieler Patienten über einen mehrjährigen Zeitraum angewiesen<sup>96, 156</sup>. Daher sind Untersuchungen zu Adhäsivsystemen *in vitro* in der Literatur wesentlich häufiger aufzufinden als *In-vivo*-Studien<sup>108, 156</sup>. *In-vitro*-Studien sind allerdings nicht uneingeschränkt aussagekräftig, da die Auswirkungen der intraoralen Verhältnisse in Laboruntersuchungen nicht berücksichtigt werden können<sup>32, 88, 136, 157, 164</sup>. Eine mögliche Speichel- oder Blutkontamination, die die Haftfestigkeit wesentlich beeinflussen kann, wird nicht beachtet. Ebenso fehlt die chemische Zusammensetzung des Mundhöhlenmilieus<sup>105, 136</sup>. So kann es während der Lagerung der extrahierten Zähne zu Veränderungen der Zahnstruktur kommen. Zudem hat das Dentin vitaler Zähne andere Eigenschaften gegenüber Dentin extrahierter Zähne. Durch das Fehlen des Widerstands der Odontoblasten kann das Adhäsiv wesentlich weiter in die Dentintubuli eindringen als in vitalem Dentin<sup>128</sup>. Auch das Fehlen des Dentinliquors auf der Bruchfläche sowie das Wegfallen des intratubulären Drucks verändert die Haftung des Dentinadhäsivs<sup>105, 136</sup>. Auch wenn eine unmittelbare Übertragbarkeit auf die klinische Situation nicht möglich ist, können *In-vitro*-Studien dennoch wichtige Anhaltspunkte bezüglich der Leistungsfähigkeit eines Adhäsivs liefern<sup>113, 157</sup>.

### 5.1.1 Auswahl und Lagerung der Versuchszähne

Zur möglichst realitätsgetreuen Nachstellung der intraoralen Verhältnisse bedürfen die In-vitro-Untersuchungen einer sorgfältigen Auswahl und korrekten Lagerung der Versuchszähne. Zahntyp, Alter und Zustand der Zähne, Lagerungsmedium sowie Lagerungszeitraum haben Einfluss auf die Dentinhaftung von Adhäsiven.

Die Versuchszähne der vorliegenden Arbeit stammten aus einer vorangegangenen In-vitro-Studie, in der die adhäsive Wiederbefestigung der Kronenfragmente zum Zwecke der Verbundfestigkeitsmessung bereits erfolgte. Es wurden dafür vor allem extrahierte, parodontal nicht erhaltungswürdige menschliche Unterkiefer-Frontzähne mit möglichst geringen kariösen oder traumatischen Substanzdefekten ausgewählt. Das klinische Alter der Zähne war unbekannt. Die unterschiedliche Schmelzqualität und Herkunft der Zähne sowie die verschiedenen Extraktionszeitpunkte kommen als Störfaktor hinsichtlich der Verbundfestigkeit in Frage. Durch eine zufällige Zuordnung der Proben auf die Versuchsgruppen und durch eine große Probenzahl sowie durch eine Konstanthaltung der Verarbeitungs- und Prüfparameter konnten diese Störfaktoren minimiert werden<sup>71</sup>. Ähnliche Versuche an menschlichen extrahierten Zähnen wurden des öfteren in der Literatur beschrieben, in vielen Studien wurden jedoch meist Rinder- oder Schafzähne eingesetzt<sup>7, 17, 43, 40, 41, 42, 44, 45, 46, 89, 90, 100, 131</sup>. Humane Zähne unterscheiden sich von tierischen Zähnen in ihrer mikroskopischen und makroskopischen Struktur<sup>46, 120, 131</sup>. Daher raten viele Autoren von Untersuchungen an tierischem Zahnmaterial ab<sup>71, 121</sup>. Andere erzielten bezüglich der Frakturmodi bei menschlichen und tierischen Zähne ähnliche Ergebnisse<sup>51</sup>. Die einheitliche Verwendung von Unterkiefer-Frontzähnen gewährleistet einen vergleichbaren Querschnitt der Zähne. Eine gleichartige Bruchflächengröße ist erwünscht, da die Haftfestigkeit exponentiell mit der Abnahme der Bruchfläche zunimmt<sup>126</sup>. Das klinische Alter der Zähne, also der Zeitraum zwischen Eruption und Extraktion, spielt vor allem im Bereich des Dentins eine große Rolle, so können am Dentin von jugendlichen Zähnen höhere Haftwerte erzielt werden als an sklerosiertem Dentin älterer Patienten<sup>128, 132</sup>. Leider lagen in dieser Studie keine Informationen bezüglich des Alters vor. Ein sklerotischer Umbau des Dentins kann ebenfalls als Abwehrreaktion auf Karies erfolgen. Dadurch wird die

Ätzbarkeit verschlechtert und die Ausbildung von „tags“ in den Dentintubuli verhindert<sup>34, 56, 83, 154</sup>. Doch trotz Vereinheitlichung des Zahntyps sowie der Festlegung des Bruchverlaufs lassen sich morphologische Variationen zwischen verschiedenen Zähnen und auch innerhalb des gleichen Zahns nicht ausschließen<sup>53</sup>.

Um ein Austrocknen der extrahierten Zähne zu verhindern, erfolgte die Lagerung bis zum Versuchsbeginn in 1%iger Chloramin-T-Lösung. Zwischen den Restaurationen und zweiten Bruchversuchen der vorangegangenen Studie wurden die Proben für 24 Stunden bei 37°C in physiologischer Kochsalzlösung aufbewahrt. Diese Phase sollte die Nachpolymerisation bei simulierten intraoralen Verhältnissen gewährleisten. Nach Abschluss des Vorversuchs und auch zwischen den Analysen dieser Studie erfolgte die Lagerung ebenfalls in 0,9%iger physiologischer Kochsalzlösung, um ein Austrocknen der Zähne zu verhindern. In der Literatur finden sich viele Vorschläge zur Wahl des Lagerungsmediums. Für die Aufbewahrung der Zähne direkt nach der Extraktion bis zum Zeitpunkt der Versuche werden nach ISO bakteriostatische bzw. bakterizide Lösungen ohne Konservierungsstoffe empfohlen, da letztere die Verbundfestigkeit beeinflussen<sup>71</sup>. Einige Autoren verwendeten dafür 70%ige Alkohollösung<sup>57</sup>, 0,5%ige Chloramin-T-Lösung<sup>150</sup>, 0,1%ige Thymol-Lösung<sup>98</sup> oder 4%ige Formalin-Lösung<sup>102</sup>. Für die Lagerung zwischen den Versuchsreihen bedarf es keiner bakteriostatischen bzw. bakteriziden Aufbewahrung, hier wird die Verwendung von Aqua dest.<sup>19, 87, 124</sup>, Leitungswasser<sup>71, 115, 167</sup> oder physiologischer Natriumchloridlösung<sup>16, 142</sup> beschrieben. Die Lagerungsmedien sollen zwar ein Austrocknen der Zähne verhindern, können aber nicht den Einfluss des Speichels simulieren. SÖDERHOLM (1991) hält die Wahl des Lagerungsmedium allerdings nicht für entscheidend<sup>136</sup>.

Insgesamt wurde eine nach ISO vorgeschlagene Halbjahresfrist für die Lagerung der Proben nicht überschritten<sup>71</sup>. Der Einfluss degenerativer Prozesse sollte auf diese Weise ausgeschlossen werden. Andere Autoren halten selbst diese Zeit für zu lang, sie empfehlen eine maximale Lagerung von einem Monat nach Extraktion<sup>105</sup>.

### 5.1.2 Bruchmethodik und Wiederbefestigung des Fragments

In der vorangegangenen In-vitro-Untersuchung zur Verbundfestigkeit adhäsiv wiederbefestigter Kronenfragmente wurden die Versuchszähne in einem ersten Bruchversuch mit Hilfe eines Schertests frakturiert und nach Wiederbefestigung der Fragmente erneut durch dieses Verfahren gebrochen. Bei diesem Test wurde die Kraft durch einen keilförmigen Stempel direkt auf die Verbundfläche übertragen, dabei traf die Kraft parallel zum Frakturspalt auf. Zur Überprüfung der Haftfestigkeiten von Dentin-Adhäsiv-Verbunden werden häufig Scherkraftversuche eingesetzt, speziell bei Studien zur Frakturresistenz restaurierter Frontzähne<sup>17, 43, 44, 79, 90, 100, 131</sup>. Eine Alternative zum Schertest bietet der Zugversuch, bei dem die Kraft senkrecht zur Verbundfläche auf den Zahn trifft. In der Literatur gibt es unterschiedliche Ansichten bezüglich der Vor- und Nachteile beider Tests. THOMS et al. (1994) sind der Meinung, Zugtests kämen dem tatsächlichen intraoralen Bruchmechanismus am nächsten<sup>152</sup>. VERSLUIS et al. (1997) kritisieren den Schertest wegen der nicht realistischen Nachahmung klinisch auftretender Belastungen<sup>159</sup>. Andere Autoren merken an, dass die klinisch auftretenden Kräfte so komplex sind, dass sie weder durch Zug- noch durch Scherversuche simuliert werden können<sup>120</sup>.

Es existiert eine große Anzahl an Studien, welche sich mit Zusammenhängen zwischen den Tests und dem Bruchverhalten adhäsiv wiederbefestigter Fragmente beschäftigt haben. Auch hier wird über unterschiedliche Resultate berichtet. So stellten FOWLER et al. (1992) einen gehäuften Prozentsatz an Adhäsivbrüchen bei Verwendung des Schertests fest<sup>51</sup>, während MARX et al. (1992) von einem Überwiegen der Kohäsivbrüche innerhalb des Verbundmaterials berichteten<sup>85</sup>. Letztere stützten ihre Erkenntnisse auf die Annahme, dass beim Schertest eine höhere Schubbelastung entsteht, die das Adhäsiv stärker auf seine Eigenfestigkeit, also auf Kohäsion beansprucht<sup>85</sup>. KITASAKO et al. (1995) kamen zu dem Ergebnis, dass es bei allen getesteten Materialien keine signifikanten Unterschiede bezüglich der Frakturmodi zwischen Zug- und Schertest gibt<sup>76</sup>.

Die resultierende Frakturresistenz kann ebenfalls durch das Design des Bruchstempels beim Scherkraftversuch beeinflusst werden<sup>107</sup>. Trotz mehrerer Tests bezüglich eines geeigneten Bruchstempels entstehen beim Auftreffen Spannungsspitzen, die bei natürlicher Kaubelastung nicht gegeben sind<sup>32</sup>. Aber auch die Geschwindigkeit, mit der der Stempel auf den Zahn trifft, hat Einfluss auf die Frakturresistenz. ANDREASEN et al. (1993) und FARIK et al. (1999) haben herausgefunden, dass die Frakturresistenz mit steigender Auftreffgeschwindigkeit abnimmt<sup>7, 40</sup>. Schließlich ist die Wahl des Kraftangriffspunktes von Bedeutung, da dieser die Region des Zahns, welche in die adhäsive Restauration einbezogen wird, festlegt. Nach Angaben von OILO et al. (1990) ist die Verbundfestigkeit des Dentins an verschiedenen Lokalisationen der Zahnkrone unterschiedlich<sup>97</sup>. Während PRATI et al. (1995) keine Abhängigkeit der Verbundfestigkeit von der Dentintiefe feststellen, zeigen andere Autoren, dass tiefes, pulpanahes Dentin eine geringere Verbundfestigkeit als oberflächliches, pulpafernes Dentin besitzt<sup>101, 168, 106</sup>. Daher sollte auf eine Vereinheitlichung des Kraftangriffspunktes geachtet werden. In der vorausgegangenen Studie ist diese Forderung eingehalten worden. Hier wurde als Bruchlinie der Übergang vom ersten zum zweiten koronalen Viertel gewählt.

Nach dem ersten Bruchversuch wurden die Fragmente mit den zu testenden Dentinadhäsivsystemen wiederbefestigt. Dabei erfolgten alle Schritte nach Herstellerangaben, auch die Wahl des Ätzmediums, die laut HOLTAN et al. (1995) einen Einfluss auf das Bruchverhalten haben kann<sup>66</sup>. Gerade bei der Konditionierung der Dentinoberfläche ist die exakte Einhaltung der Herstellerangaben von großer Bedeutung, da Abweichungen, wie z.B. eine extreme Demineralisation des Dentins, Einflüsse auf den Frakturmodus haben können<sup>146</sup>. Insbesondere sind die empfohlene Trocknungsdauer und -intensität einzuhalten. Ein zu starkes Trockenblasen kann zum Kollabieren des Kollagennetzwerks führen und ebenfalls den Frakturmodus beeinflussen<sup>63</sup>. Daher raten einige Autoren zum so genannten „wet bonding“, bei dem das Dentin lediglich abgetupft wird und das Kollagennetzwerk somit erhalten bleibt<sup>93, 109, 146</sup>. Beim Auftragen des Adhäsivs sollte, wenn auch schwierig zu realisieren, auf eine gleichmäßige Schichtdicke geachtet werden, da variierende Filmdicken des Adhäsivs unterschiedliche Frakturverläufe verursachen können<sup>159, 162</sup>.

Nach der Restauration wurden die Proben erneut frakturiert und die Bruchkraft sowie die Bruchfläche gemessen. Infolgedessen kam es teilweise zu Randabsplitterungen, vor allem am Fragment, und damit zu Ungenauigkeiten bei der Reponierbarkeit und Überlagerung der Bruchflächen. Auch kleine Absplitterungen innerhalb der Bruchfläche waren möglich, allerdings konnte man diese nicht erkennen und damit auch nicht quantifizieren.

### **5.1.3 Einfärben der Versuchszähne**

Vor der lichtmikroskopischen Analyse der Bruchflächen zur Bestimmung der Bruchverläufe wurden die Versuchszähne mit der Plauefärbelösung MIRA-2-Ton<sup>®</sup> gefärbt. Dabei haben Schmelz und Dentin die Lösung besser aufgenommen als das Adhäsiv. So konnten die adhäsivbedeckten Flächen gut von den freien Zahnoberflächen abgegrenzt und vermessen werden. Diese Methode hat sich als sehr einfach und erfolgreich herausgestellt. Kleine Unklarheiten bei der Bruchflächenanalyse traten auf, wenn sich die Lösung unter die Adhäsivflächen ausgebreitet hatte, dies war allerdings selten der Fall. Des Weiteren birgt die Färbung das Risiko von kleinen Absplitterungen durch das Berühren und Abspülen der Fragmente, welches Einfluss auf die Bruchflächenanalyse haben kann. In der Literatur kam die Färbung von Adhäsivflächen mit MIRA-2-Ton<sup>®</sup> bisher nicht vor. Sowohl PILECKI et al. (2005) als auch FINGER (1988) ätzten die Bruchfläche mit Phosphorsäure an, um eine bessere Abgrenzung der Schmelzstruktur unter dem Mikroskop zu gewährleisten<sup>48, 113</sup>. Im Bereich des Dentins ist diese Methode allerdings nicht wirksam.

### **5.1.4 Fotografieren der Bruchflächen und Nachbearbeitung der Bilder**

Um eine quantitative Bestimmung der Frakturmodi durch computergestützte Flächenberechnungen durchführen zu können, mussten die Bruchflächen digital abfotografiert werden. Mittels Augenmaß wurde versucht, die Bruchflächen möglichst parallel zum Objektiv der Kamera auszurichten. Hierbei kam es jedoch zu kleineren Abweichungen (Winkeldifferenzen) und damit zu leichten Verzerrungen der Bruchfläche. Hierdurch

ließen sich später bei der bildlichen Überlagerung von Basis und Fragment die komplementären Bruchflächen nicht immer völlig in Deckung bringen. In diesem Fall wurden die Mittelwerte zur weiteren Berechnung bestimmt. Größenunterschiede, die durch einen unterschiedlichen Objektabstand verursacht wurden, konnten allerdings durch die anschließende Nachbearbeitung im CAD-Programm durch maßstabgetreues Vergrößern oder Verkleinern ausgeglichen werden. Ein weiterer Verlust an Informationen fand durch die Reduktion der dreidimensionalen Struktur auf eine zweidimensionale Fläche statt. Große Höhen- oder Tiefenunterschiede auf dem Bruchflächenrelief konnten so flächenmäßig nicht vollständig erfasst werden.

### **5.1.5 Bruchflächenbestimmungen**

Mit Hilfe eines CAD-Programms wurden anhand der digitalen Fotografien die Anteile der komplementären Bruchflächen vermessen und durch Überlagerung von Basis und Fragment die Frakturmodi bestimmt. Dabei wurden die Bruchflächen in vier verschiedene Frakturmöglichkeiten eingeteilt. Es wurden Kohäsivbrüche innerhalb des Restaurationsmaterials, Kohäsivbrüche innerhalb des Zahns, Adhäsivbrüche zur Basis und Adhäsivbrüche zum Fragment unterschieden. Die Auswertung erfolgte getrennt für Schmelz- und Dentinbereich. In der Literatur werden vorzugsweise drei Hauptgruppen verwendet: Adhäsivbrüche, Kohäsivbrüche und gemischte Brüche<sup>51, 114</sup>. Da es sich in der vorliegenden Arbeit fast ausschließlich um gemischte Frakturen handelt, wurden weitere Unterteilungen zur Verbesserung der Aussagekraft getroffen. Zur Unterscheidung zwischen adhäsivbedeckten und freien Bruchflächenanteilen diente ein Lichtmikroskop mit zweifacher Vergrößerung.

Bei der Analyse der Bruchflächen gab es vor allem im Schmelzbereich Unklarheiten bei der exakten Bestimmung der Teilflächen. Während im Bereich des Dentins die adhäsivbedeckten Areale meist sehr großflächig waren, gab es im Schmelzbereich oft sehr kleinflächige Absplitterungen des Adhäsivs. Zudem wurde der Schmelz nicht so intensiv angefärbt wie das Dentin, was die Differenzierung zusätzlich erschwerte. Hier erfolgte die Unterscheidung weniger anhand der Färbung, sondern durch die typische

Struktur der Schmelzprismen. Im kräftig angefärbten Dentin waren die Teilflächen meist eindeutiger zu erkennen. Schwierigkeiten gab es hier nur bei Kohäsivfrakturen innerhalb des Dentins, da sich in diesem Fall oft nur eine sehr dünne, kaum angefärbte Schicht Dentin auf der Adhäsivfläche befand. Andererseits wurde an einer adhäsivbedeckten Fläche eine freie Dentinfläche vorgetäuscht, wenn sich die Färbelösung unter eine gelockerte Adhäsivplatte ausgebreitet hatte und diese Stelle stärker angefärbt wurde. Eindeutig zu erkennen waren Adhäsivflächen, deren Oberflächen auf Grund von Lichtreflexion glänzten oder bei denen kleine Luftbläschen eingeschlossen waren. Oft half auch ein Kippen der Bruchfläche unter dem Lichtmikroskop zur Unterscheidung der Teilflächen voneinander. Kleine Ungenauigkeiten entstanden auch beim Markieren der Teilflächen mit Hilfe des CAD-Programms. Dies erfolgte durch Festlegung von Eckpunkten, die durch Linien verbunden wurden und letztendlich ein Polygon ergaben.

In der Literatur findet man verschiedene Ansätze zur Analyse von Bruchflächen nach adhäsiver Befestigung. Dabei spielt das Mikroskopieren immer eine wichtige Rolle, hier erhält man Auskunft über die schwächste Stelle des adhäsiven Verbundes<sup>96</sup>. Es gibt verschiedene Möglichkeiten, die Bruchfläche mikroskopisch darzustellen. Die in der vorliegenden Arbeit verwendete Lichtmikroskopie wurde vielfach angewandt<sup>47, 75, 86, 110, 115, 146, 169</sup>. Dabei reichen die Vergrößerungen von 2,5-fach<sup>146</sup>, über 7<sup>115</sup> - und 8-fach<sup>86</sup> bis 40-fach<sup>47</sup>.

Alternativ oder ergänzend bietet sich die Möglichkeit der Rasterelektronenmikroskopie (REM), der sich einige Autoren bedienen<sup>14, 21, 63, 87, 114</sup>, auf die in der vorliegenden Dissertation allerdings verzichtet wurde. Über die Wahl des Mikroskops gibt es in der Literatur unterschiedliche Ansichten. Während PILECKI et al. (2005) vor leichtfertiger Analyse mittels Lichtmikroskop warnen<sup>113</sup> und ARMSTRONG et al. (2001) sogar eine zweite rasterelektronische Untersuchung fordern<sup>15</sup>, konnten TAM und PILLIAR (1993) alle lichtmikroskopischen Ergebnisse im REM ausnahmslos bestätigen<sup>145</sup>.

## 5.2 Beurteilung der Ergebnisse

### 5.2.1 Interpretation der möglichen Frakturmodi

Aus der lichtmikroskopischen Analyse der Bruchflächen und der anschließenden Auswertung der Frakturmodi ergab sich für jeden einzelnen Zahn ein spezielles Bruchverhalten. Dabei wurde zwischen Kohäsiv- und Adhäsivfrakturen unterschieden. Zudem fand eine weitere Unterteilung der Kohäsivbrüche innerhalb des Zahns und der Kohäsivbrüche innerhalb des Restaurationsmaterials statt sowie eine Unterscheidung der Adhäsivbrüche zum Fragment und solcher zur Basis.

In der Literatur findet man meist keine Unterteilung der Adhäsivfrakturen, stattdessen wird zwischen reinen Kohäsiv- bzw. Adhäsivbrüchen und gemischten Brüchen unterschieden<sup>114</sup>. Da es sich bei den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit aber fast ausschließlich um gemischte Frakturen handelte, war letztere Kategorie überflüssig und eine detaillierte Einteilung der Kohäsiv- und Adhäsivfrakturen sinnvoll. Während in der Literatur Interpretationen bezüglich der beiden Varianten einer Kohäsivfraktur beschrieben werden, lassen sich zur Unterscheidung zwischen Adhäsivfrakturen zum Fragment und zur Basis keine Aussagen finden. Man kann daher nur spekulieren, dass die Angabe über die Lokalisation des Adhäsivbruchs eine zusätzliche Auskunft über die Schwachstellen des adhäsiven Verbunds gibt.

Aber auch zu allen anderen Frakturmodi fallen die Meinungen in der Literatur sehr unterschiedlich aus. Viele Autoren setzen die Art des Frakturverlaufs in direkten Zusammenhang zur Haftfestigkeit zwischen Adhäsiv und Zahn<sup>15, 22, 27, 28, 30, 37, 50, 54, 58, 62, 79, 96, 104, 157, 165</sup>. Andere Autoren sehen dort keinen Zusammenhang und machen das Bruchverhalten vom Versuchsaufbau und der Form der Kraftapplikation abhängig<sup>15, 135, 159, 160</sup>. Sie vertreten die Meinung, dass der Frakturverlauf, im Gegensatz zum intraoralen Ermüdungsbruch, durch die im Bruchversuch applizierte Kraft beeinflusst wird und daher nicht unbedingt an der schwächsten Stelle des adhäsiven Verbundes auftritt<sup>62</sup>.

Kohäsivfrakturen im Restaurationsmaterial sind für viele Autoren ein Zeichen dafür, dass die erreichte Haftfestigkeit am Zahn die Eigenfestigkeit des Materials übersteigt<sup>27, 50, 62, 96, 157, 165</sup>. Diese These wird von TAM und PILLIAR (1994) bestritten. Sie behaupten, dass eine Kohäsivfraktur im Material nicht durch die Verbundfestigkeit, sondern einzig durch die Art der applizierten Kraft im Bruchversuch zustande kommt<sup>146</sup>. SWIFT et al. (1996) und PASHLEY et al. (1995) machen eine Materialschwächung in Form von kleinen Lufteinschlüssen und mikroskopisch feinen Rissen für eine kohäsive Fraktur innerhalb des Verbundmaterials verantwortlich<sup>104, 144</sup>. Kohäsivfrakturen im Material haben den Vorteil, dass es keine Verletzung der Zahnschmelz gibt<sup>113</sup>.

Analog zur Entstehung von Kohäsivfrakturen im Verbundmaterial gehen viele Autoren davon aus, dass ein starker adhäsiver Verbund für Kohäsivfrakturen innerhalb des Zahns verantwortlich ist<sup>22, 28, 30, 37, 54, 58, 96, 104</sup>. Je größer die Haftkraft, umso größer der Anteil an Kohäsivfrakturen im Zahn<sup>79, 15</sup>. PERINKA et al. (1992) stellten bei Kohäsivfrakturen innerhalb des Dentins ein Überwiegen der Haftung von Bonding am Dentin gegenüber der Bruchresistenz des angrenzenden Dentins fest<sup>110</sup>. Gleiches gilt laut BRACKETT et al. (2006) für das Frakturverhalten im Schmelz. Erst wenn die Haftfestigkeit zwischen Adhäsiv und Schmelz größer ist als die Zugfestigkeit vom Schmelz, kann es zu Kohäsivfrakturen innerhalb des Schmelzes kommen, vor allem an der Schmelz-Dentin-Grenze<sup>22</sup>. Manche Autoren setzten sogar so hohe Haftwerte für eine Kohäsivfraktur im Zahn voraus, dass dieser Frakturmodus in einigen Studien gar nicht auftrat<sup>127</sup>. Der Frakturmodus „Kohäsivbruch innerhalb des Dentins“ wird hinsichtlich der Verbundfestigkeit eines Dentinadhäsivs als qualitativ hochwertig interpretiert<sup>161</sup>. Eine Entwicklung von Adhäsivsystemen, die solch hohe Haftfestigkeiten aufweisen, dass Frakturen vermehrt innerhalb des Zahns auftreten, sei daher erwünscht<sup>39</sup>. VERSLUIS et al. (1997) sind allerdings zu völlig anderen Ergebnissen gekommen. Sie sehen keinerlei Zusammenhang zwischen einer hohen Verbundfestigkeit und einem Kohäsivbruch innerhalb des Zahns. Auch sie gehen von dem Einfluss der Bruchmethodik auf den Frakturverlauf aus<sup>146, 159</sup>. Möglicherweise kann auch eine extraktionsbedingte Beschädigung der Zahnstruktur einen Frakturverlauf innerhalb des Zahns verursachen<sup>122, 161</sup>.

Analog der Autoren, die den starken Verbund zwischen Zahn und Verbundmaterial für eine Kohäsivfraktur verantwortlich machen, interpretieren andere Autoren die Entstehung einer Adhäsivfraktur als Zeichen einer geringen Verbundfestigkeit<sup>96, 79</sup>. Bei einem adhäsiven Verbund im Bereich des Dentins sind die schwachen Stellen, die für die Entstehung einer Adhäsivfraktur verantwortlich sein können, vermutlich die Grenzschichten zwischen Hybridschicht und Adhäsiv sowie zwischen Hybridschicht und Dentin. Diese Erkenntnisse erlangten ARMSTRONG et al. (2001) bei der Untersuchung von OptiBond FL<sup>®</sup> in einem „Mikrozugtest“<sup>15</sup>. Vor Etablierung der Total-Ätz-Technik war eine effiziente Entfernung der Schmierschicht noch nicht möglich. In den damaligen Untersuchungen kam es wesentlich häufiger zu Adhäsivbrüchen, meistens im Bereich der Schmierschicht<sup>149</sup>. Im klinischen Alltag sind im Bereich des Dentins am häufigsten Adhäsivbrüche zu finden<sup>147</sup>. Vermutlich führen die intraoralen Bedingungen sowie der Einfluss des Dentinliquors und des intratubulären Drucks zu schlechteren Haftbedingungen in vivo.

### **5.2.2 Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Dentinadhäsivsystemen und den auftretenden Frakturverläufen**

Es wurden Mittelwerte aller Bruchflächen von den zu einer Versuchsgruppe gehörigen Zähnen gebildet. So ergab sich für jedes Dentinadhäsivsystem ein bestimmtes Frakturverhalten, ausgedrückt in prozentualen Anteilen der vier möglichen Frakturmodi jeweils im Schmelz und Dentin.

Im Schmelzbereich fiel der erhöhte Anteil an Adhäsivfrakturen bei der Verwendung des jüngsten Adhäsivsystems auf dem Markt, Adper<sup>®</sup> Prompt<sup>®</sup> L-Pop<sup>®</sup>, gegenüber den anderen Dentinadhäsiven auf. Auf Grund der Aussagen von OLIO (1993) und LELOUP et al. (2001) könnte man dieses Ergebnis auf eine mangelnde Haftfestigkeit zurückführen<sup>79, 96</sup>. Diese These wird durch die vorangegangene Untersuchung zur Bruchfestigkeit der Dentinadhäsivsysteme bestätigt. Sie stellte bei derselben Versuchsgruppe die geringste Bruchfestigkeit fest. BOUILLAGUET et al. (2001) beobachteten ebenfalls ein gehäuftes Auftreten von Adhäsivfrakturen bei der Verwendung von Adper<sup>®</sup> Prompt<sup>®</sup> L-Pop<sup>®</sup>. Sie machen eine intakte Schmierschicht, die durch ein

simultanes Konditionieren und Primern durch das „Ein-Flaschen-System“ nicht entfernt wurde, für den schlechten Verbund verantwortlich <sup>21</sup>. Zudem ist die durch selbstkonditionierende Primer ausgebildete Hybridschicht wesentlich dünner als eine durch separates Ätzen und Primern ausgebildete Hybridschicht, die laut PASHLEY et al. (1993) und VAN MEERBEEK et al. (1993) ebenfalls Einfluss auf die Haftfestigkeit und den Frakturverlauf hat <sup>103, 155</sup>. So wurden in einer Untersuchung von YOSHIYAMA et al. (1998) bei dickeren Hybridschichten auch höhere Haftwerte erzielt <sup>170</sup>. Bei der Anwendung von Adper<sup>®</sup> Prompt<sup>®</sup> L-Pop<sup>®</sup> auf sklerotischem Dentin erzielten KWONG et al. (2002) drastisch reduzierte Haftkräfte <sup>78</sup>. Aus diesem Grund empfehlen GORACCI et al. (2004) vor dem Auftragen des selbstkonditionierenden Primers, ein starkes Ätzmittel zu verwenden, um eine tiefere Infiltration in das intertubuläre sklerotische Dentin zu erzielen <sup>54</sup>. Da über das Alter der Versuchszähne keine Angaben vorliegen, kann auch dieser Zusammenhang nicht ausgeschlossen werden. Laut PILECKI et al. (2005) sei eine verminderte Haftfestigkeit bei Dentinadhäsivsystemen, die Primer und Bonding vereinen, auf eine Phasenentmischung zurückzuführen. Diese kommt dadurch zustande, dass das Lösungsmittel ab einer gewissen Filmdicke nicht mehr vollständig verblasen werden kann und es so zu einer Zunahme an Porositäten im Material kommt <sup>113</sup>. Andere Autoren konnten keine Unterschiede zwischen Haftfestigkeiten und Frakturverläufen bei der Verwendung von „Ein-Flaschen-Adhäsiven“ zu der Verwendung konventioneller Mehrflaschensysteme feststellen <sup>107, 113, 153</sup>. TANUMIHARJA et al. (2000) konnten sogar größere Haftfestigkeiten bei der Verwendung von selbstkonditionierenden Adhäsiven aufweisen <sup>148</sup>.

Im Dentinbereich zeigte die Verwendung des marktältesten Adhäsivsystems, **Syntac<sup>®</sup>**, einen höheren Anteil an Adhäsivfrakturen von ca. 60% gegenüber durchschnittlich 30% Adhäsivfrakturen der anderen Versuchsgruppen. Nach statistischer Analyse ergaben sich ebenfalls für das Adhäsivsystem Syntac<sup>®</sup> die größten Abweichungen. So entstanden bei der Verwendung von Syntac<sup>®</sup> im Schmelzbereich häufiger Kohäsivbrüche innerhalb des Schmelzes als bei der Verwendung von OptiBond FL<sup>®</sup>, im Vergleich mit dem Dentinadhäsiv AdheSE<sup>®</sup> traten sogar im Schmelz- und Dentinbereich häufiger Kohäsivfrakturen innerhalb des Zahns auf. Die größten Differenzen zeigte Syntac<sup>®</sup> zur kombinierten Anwendung von OptiBond FL<sup>®</sup> mit Tetric<sup>®</sup> Flow. Hier

entstand bei der Anwendung von Syntac<sup>®</sup> wiederum ein größerer Prozentanteil an Kohäsivfrakturen im Schmelz. Der größere Anteil an Adhäsivfrakturen im Dentinbereich kann als schwächeren adhäsiven Verbund im Dentin gedeutet werden<sup>96, 79</sup>. Der häufigere Prozentsatz an Kohäsivfrakturen innerhalb des Schmelzes spricht dann allerdings eher für guten Schmelz-Adhäsiv Verbund und geringere Haftfestigkeiten innerhalb Schmelz. Möglicherweise ist die für Syntac<sup>®</sup> typische „selektive Schmelz- und Dentinkonditionierung“ für den unterschiedlichen Bruchverlauf im Schmelz- und Dentinbereich verantwortlich.

Das gefüllte Dentinadhäsivsystem **OptiBond FL<sup>®</sup>** wies bezüglich seines Bruchverhaltens nach adhäsiver Fragmentbefestigung keine größeren Unterschiede gegenüber den anderen getesteten Dentinadhäsivsystemen auf. Und auch die kombinierte Anwendung von **OptiBond FL<sup>®</sup>** mit **Tetric<sup>®</sup> Flow**, sowohl an intakten Bruchflächen als auch an solchen mit Substanzdefekt, zeigten statistisch keine signifikanten Unterschiede zu den anderen Versuchsgruppen. Auch BRAGA et al. (2000) konnten bei der Verwendung eines gefüllten Adhäsivsystems wie OptiBond FL<sup>®</sup> keinen entscheidenden Einfluss auf die Haftfestigkeit und damit auf den Frakturmodus feststellen<sup>23</sup>. Der hohe Anteil an Kohäsivfrakturen im Verbundmaterial bei der Verwendung von OptiBond FL<sup>®</sup> konnte allerdings von ARMSTRONG et al. in einer Studie von 1998 bestätigt werden<sup>14</sup>. INOUE et al. stellten 1994 die These auf, ein hoher Anteil an Kohäsivfrakturen innerhalb des Materials sei vor allem bei Adhäsiven mit hohem Füllstoffgehalt, so auch OptiBond FL<sup>®</sup>, zu beobachten, da diese über gute mechanische Eigenschaft verfügen und damit eine gute Haftung am Zahn, insbesondere am Schmelz<sup>70</sup>. Verglichen mit der alleinigen Anwendung von OptiBond FL<sup>®</sup> ergab die zusätzliche Verwendung von Tetric<sup>®</sup> Flow weder im Schmelz- noch im Dentinbereich einen signifikanten Unterschied im Bruchverhalten. Sowohl der Frakturmodus als auch die in der vorangegangenen Studie ermittelte Verbundfestigkeit waren in beiden Versuchsgruppen vergleichbar. Ursächlich hierfür könnte die Tatsache sein, dass es sich bei OptiBond FL<sup>®</sup> schon um ein gefülltes Dentinadhäsiv handelt und eine zusätzliche Applikation des ebenfalls gefüllten fließfähigen Komposits keinen Vorteil ergibt. Auch REIS et al. (2002) konnten bei guter Primärpassung von Fragment und frakturiertem Zahn durch die Applikation von Kompositmaterialien die Haftung von nicht

präparierten und nur mit einem Adhäsivsystem konditionierten Frakturflächen nicht signifikant verbessern<sup>118</sup>. Auch das Vorliegen von Substanzdefekten, wie es in Versuchsgruppe 6 der Fall war, hatte keinen Einfluss auf den Bruchverlauf. Die Aussagekraft limitierend ist allerdings die geringe Gruppengröße von sechs Versuchszähnen.

Auch das Dentinadhäsiv **AdheSE**<sup>®</sup> wies bezüglich seines Frakturmodus keine größeren Unterschiede gegenüber den anderen Versuchsgruppen auf. Eine Aussage von GORDAN et al. (1997), durch die Verwendung von selbstkonditionierenden Primern würde die Adhäsion verbessert, wurde also nicht bestätigt. GORDAN et al. stützen ihre Aussage auf der Annahme, dass eine gleichzeitige Demineralisation des Dentins und Penetration der Monomere in das Kollagenetzwerk die Gefahr einer demineralisierten, aber nicht infiltrierte Dentinschicht ausschließen und so zur besseren Haftung führen könne<sup>55</sup>.

Die vorangegangene In-vitro-Studie ermittelte für OptiBond FL<sup>®</sup> die größten Haftwerte und empfiehlt dieses für die Restauration von Kronenfragmenten. Auf Grund langjähriger positiver klinischer Erfahrungen mit OptiBond FL<sup>®</sup> wird das gefüllte Dentinadhäsivsystem ebenfalls von einigen anderen Autoren<sup>7, 17, 91, 95, 129</sup> zur Wiederbefestigung von passgenauen Fragmenten empfohlen. In der vorliegenden Arbeit konnte die hohe Verbundfestigkeit zwar durch einen großen Anteil an Kohäsivfrakturen bestätigt werden, das Bruchverhalten unterschied sich jedoch nicht signifikant von dem Bruchverhalten anderer Dentinadhäsive. Lediglich die beiden Adhäsivsysteme Adper<sup>®</sup> Prompt<sup>®</sup> L-Pop<sup>®</sup> und Syntac<sup>®</sup> fielen durch einen größeren Anteil an Adhäsivfrakturen auf und werden daher nicht als Präparat der Wahl vorgeschlagen. Auch viele andere Autoren halten die „Ein-Flaschen-Systeme“ im Bereich der Fragmentbefestigung derzeit nicht für empfehlenswert<sup>45, 100, 163</sup>. Laut REIS et al. (2004) sollte nur generell darauf geachtet werden, dass die verwendeten Adhäsivsysteme und die Befestigungsmaterialien aufeinander abgestimmt sind<sup>119</sup>.

### 5.2.3 Deutung des unterschiedlichen Bruchverhaltens im Schmelz- und Dentinbereich

Während sich die Versuchsgruppen untereinander weniger unterschieden, gab es zwischen Schmelz und Dentin große Differenzen im Bruchverhalten. Im Schmelzbereich beobachtete man außer bei Adper<sup>®</sup> Prompt<sup>®</sup> L-Pop<sup>®</sup> und Syntac<sup>®</sup> bei allen Versuchsgruppen einen vergleichbaren Anteil an Adhäsiv- und Kohäsivfrakturen, bei denen die Kohäsivfrakturen zur Hälfte im Schmelz und zur Hälfte im Verbundmaterial auftraten. Auch das Verhältnis der Adhäsivfrakturen zur Basis bzw. zum Fragment war ausgeglichen. Im Dentinbereich kam es dagegen bei fast allen Adhäsivsystemen, ausgenommen Syntac<sup>®</sup>, zu ca. 60% Kohäsivfrakturen innerhalb des Restaurationsmaterials. Nur ein geringer Prozentsatz an Kohäsivfrakturen innerhalb des Dentins sowie ein Anteil von ca. 30% Adhäsivfrakturen waren zu verzeichnen. Davon zeigte sich allerdings bei allen Versuchsgruppen ein größerer Anteil an Adhäsivfrakturen zum Dentin der Basis.

Stützt man sich auf die Meinung vieler Autoren, Adhäsivfrakturen entstünden durch geringe Verbundfestigkeiten während Kohäsivfrakturen mit höhere Haftkräften zwischen Adhäsiv und Zahn korrelieren, muss man anhand der vorliegenden Ergebnisse von einer höheren Haftfestigkeit innerhalb des Dentinbereichs, im Vergleich zum Schmelzbereich, ausgehen. DUKE et al. (1991) hingegen konnten Kohäsivfrakturen im Restaurationsmaterial nur im Schmelz finden, nicht im Dentin<sup>35</sup>.

Unterschiedliche Haftwerte und Frakturverläufe zwischen Schmelz- und Dentinbereich könnten auf die Art des adhäsiven Verbunds dieser beiden Schichten zurückzuführen sein. Während die Haftung im Schmelz maßgeblich von der mikromechanischen Retention in Form von ausgehärteten Adhäsivausläufern abhängt, spielt die Ausbildung der so genannten „tags“ im Dentinbereich eine untergeordnete Rolle. Hier hängt die Haftfestigkeit vor allem mit der Ausbildung der Hybridschicht zusammen. Dabei können bei dickeren Hybridschichten höhere Haftwerte erzielt werden.

Der durchgehend geringe Prozentsatz an Kohäsivfrakturen innerhalb des Dentins könnte auf die hohe Eigenzugfestigkeit des Dentins von 104 MPa zurückzuführen sein <sup>125</sup>. Demnach war die Zugfestigkeit des Dentins in den meisten Fällen höher als die Haftfestigkeit der Bondingsysteme. Auch TANUMIHARJA et al. (2000) und PHRUKKANON et al. (1998) erhielten in ihren Bruchflächenanalysen nur geringe Prozentsätze an Kohäsivfrakturen innerhalb des Dentins <sup>112, 148</sup>. Der vergleichbar höhere Anteil an Kohäsivfrakturen innerhalb des Schmelzes könnte einerseits auf die hohe Sprödigkeit des Schmelzes, andererseits auf Schäden in der Zahnstruktur, die bei der Extraktion oder beim ersten Bruch entstanden sein können, zurückzuführen sein <sup>122, 130</sup>.

Obwohl die meisten modernen Adhäsivsysteme für eine simultane Behandlung von Schmelz und Dentin bestimmt sind, gibt es dennoch Unterschiede in der Behandlungsbedürftigkeit dieser beiden Strukturen. Während man im Schmelz eine Mindestzeit beim Ätzen einhalten sollte, damit das Ätzmuster tief genug ist, darf das Dentin nicht überätzt werden, um ein Kollabieren der Kollagenstruktur zu verhindern. Auch in der Trocknung gibt es Unterschiede. Der Schmelz sollte vollständig getrocknet werden bis das typische Ätzmuster sichtbar ist. Im Dentin dagegen kann es bei starker Trocknung zum Kollabieren des Kollagennetzwerkes kommen. Da es aber fast unmöglich ist, Schmelz und Dentin getrennt zu behandeln und dies von den Herstellern der modernen Adhäsivsysteme auch nicht mehr gefordert wird, kann die unterschiedliche Behandlungsbedürftigkeit ebenfalls einen Einfluss auf die Haftfestigkeit und den Frakturverlauf im Schmelz- und Dentinbereich haben.

Auch der Kontakt der Schmelzoberfläche mit Dentinhaftvermittlern wird in der Literatur diskutiert. Während HADAVI et al. (1993) in einem Schertest zeigten, dass ein Kontakt des geätzten Schmelzes mit Dentinadhäsiven die Haftkraft zum Schmelz um 31-44% senkte <sup>59</sup>, konnten HOLZMEIER et al. (2006) keinen signifikanten Unterschied zwischen den Gruppen mit und ohne Kontamination durch Dentinhaftvermittler feststellen <sup>67</sup>.

Beim Vergleich des Bruchverhaltens zwischen Schmelz und Dentin waren aber nicht nur die gesamten prozentualen Anteile an Frakturmodi auffällig, sondern auch die

Zusammensetzung der verschiedenen Teilflächen. Konnte man im Dentinbereich eher größere adhäsivbedeckte Flächen von großflächigen Dentinflächen abgrenzen, so fand man auf der Schmelzoberfläche viele kleinere Adhäsivflächen. Im Schmelz war das Bruchverhalten also wesentlich „gemischter“ als im Dentinbereich.

## 6 Zusammenfassung

Kronenfrakturen, insbesondere im Rahmen von Frontzahntraumata, nehmen einen immer größeren Stellenwert bei der Behandlung von Kindern und Jugendlichen ein. Da auch in Zukunft mit einem weiteren Anstieg derartiger Verletzungen zu rechnen ist, muss an minimal-invasiven, ästhetischen und ökonomischen Therapiemöglichkeiten geforscht werden. Die Fragmentbefestigung mit Hilfe von Dentinadhäsiven mit oder ohne zusätzliche Verwendung von fließfähigem Komposit stellt derzeit die Methode der Wahl dar.

Da es in den letzten Jahren zu einer Umstellung von Mehrflaschen-Adhäsiven auf Einflaschen-Adhäsive gekommen ist, sollten in der vorliegenden Arbeit Dentinadhäsivsysteme verschiedenen Generationen bezüglich ihres Bruchverhaltens nach Versagen der adhäsiven Befestigung getestet werden. Zudem sollte herausgefunden werden, ob unterschiedliche Frakturverläufe im Schmelz- und Dentinbereich zu beobachten sind. Humane extrahierte Zähne aus einer vorangegangenen Studie zur Bruchfestigkeit von Dentinadhäsiven dienten als In-vitro-Testsystem. Die Dentinadhäsive OptiBond FL<sup>®</sup>, Syntac<sup>®</sup>, AdheSE<sup>®</sup>, Adper<sup>®</sup> Prompt<sup>®</sup> L-Pop<sup>®</sup> sowie die kombinierte Anwendung von OptiBond FL<sup>®</sup> mit dem fließfähigen Komposit Tetric<sup>®</sup> Flow wurden anhand von lichtmikroskopischen Bruchflächenanalysen auf ihr Frakturverhalten nach Versagen der Fragmentbefestigung untersucht.

Die Adhäsivsysteme untereinander unterschieden sich dabei bezüglich der Frakturverläufe kaum. Abweichungen gab es allerdings zwischen Schmelz- und Dentinbereich. Während es im Schmelzbereich zu einem ausgeglichenen Verhältnis von Kohäsiv- und Adhäsivfrakturen kam, dominierte im Dentinbereich der Anteil an Kohäsivfrakturen innerhalb des Restaurationsmaterials. Lediglich das Adhäsivsystem Syntac<sup>®</sup> fiel durch einen erhöhten Anteil an Adhäsivfrakturen im Dentinbereich und Adper<sup>®</sup> Prompt<sup>®</sup> L-Pop<sup>®</sup> durch einen hohen Prozentsatz an Adhäsivfrakturen im Schmelzbereich auf. In der Literatur werden Kohäsivfrakturen häufig mit hohen Haftwerten und Adhäsivfrakturen mit niedrigen Verbundfestigkeiten zwischen Zahn und Adhäsiv in Verbindung gebracht. Bei Adper<sup>®</sup> Prompt<sup>®</sup> L-Pop<sup>®</sup> konnte im Rahmen

der vorangegangenen Studie eine verminderte Bruchfestigkeit gegenüber den anderen Adhäsivsystemen bestätigt werden. Zur Wiederbefestigung von Kronenfragmenten sind somit die modernen „Einflaschen-Adhäsivsysteme“ derzeit noch nicht zu empfehlen. Gefüllte Dentinadhäsive, wie OptiBond FL<sup>®</sup>, scheinen hingegen aufgrund ihrer höheren Bruchfestigkeit und ihrer langen klinischen Erfahrung für die Fragmentbefestigung geeignet zu sein.

## 7 Literatur

- 1 **Anding C (2007):**  
Diagnostik und Therapie von Kronen- und Kronen-Wurzel-Frakturen  
Zahnärztliche Mitteilungen 97: 36-44
- 2 **Andreasen FM, Andreasen JO (1989):**  
Prognosis of root-fractured permanent incisors - prediction of healing modalities  
Endod Dent Traumatol 5: 11-22
- 3 **Andreasen FM, Daugaard-Jensen J, Munksgaard EC (1991):**  
Reinforcement of bonded crown fractured incisors with porcelain veneers  
Endod Dent Traumatol 7: 78-83
- 4 **Andreasen FM, Flügge E, Daugaard-Jensen J, Munksgaard EC (1992):**  
Treatment of crown fractured incisors with laminate veneer restorations.  
An experimental study  
Endod Dent Traumatol 8: 30-35
- 5 **Andreasen FM, Noren JG, Andreasen JO, Engelhardt S, Lindh-Strömberg U (1995):**  
Long-term survival of fragment bonding in the treatment of fractured crowns:  
A multicenter clinical study  
Quint Int 26: 669-681
- 6 **Andreasen FM, Rindum JL, Munksgaard EC, Andreasen JO (1986):**  
Bonding of enamel-dentin crown fractures with GLUMA and resin  
Endod Dent Traumatol 2: 277-280
- 7 **Andreasen FM, Steinhardt U, Bille M, Munksgaard EC (1993):**  
Bonding of enamel-dentin crown fragments after crown fracture.  
An experimental study using bonding agents  
Endod Dent Traumatol 9: 111-114
- 8 **Andreasen JO (1988):**  
Traumatologie der Zähne  
Schlütersche Verlagsanstalt und Druckerei-GmbH und Co, Hannover: 19-90
- 9 **Andreasen JO (2001):**  
Adhesive Dentistry Applied to the Treatment of Traumatic Dental Injuries  
Oper Dent 26: 328-335
- 10 **Andreasen JO, Andreasen FM (1990):**  
Dental Traumatologie: Quo vadis  
Endod Dent Traumatol 6: 78-80

- 11 **Andreasen JO, Andreasen FM (1992):**  
Farbatlas der Traumatologie der Zähne  
Deutscher Ärzte-Verlag GmbH, Köln: 47-76
- 12 **Andreasen JO, Andreasen FM (1994):**  
Crown-root fractures  
Munksgaard, Copenhagen: 257-277
- 13 **Andreasen JO, Raven JJ (1972):**  
Epidemiology of traumatic dental injuries to primary and permanent teeth in a Danish popular sample  
Int J Oral Surg 1: 235-239
- 14 **Armstrong SR, Keller JC, Boyer DB (1998):**  
Microtensile bond strength testing and failure analysis of two dentin adhesives  
Dent Mater 14: 44-50
- 15 **Armstrong SR, Keller JC, Boyer DB (2001):**  
Mode of failure in the dentin-adhesive resin-resin composite bonded joint as determined by strength-based (MykrometerTBS) and fracture-based (CNSB) mechanical testing  
Dent Mater 17: 201-210
- 16 **Art-Smart K, Retief DH, Russell CM (1993):**  
Bond strength of All-Bond 2 universal adhesive system to enamel  
J Dent Res 72: 387
- 17 **Badami AA, Dunne SM, Scheer B (1995):**  
An in vitro investigation into the shear bond strength of two dentine-bonding agents used in the reattachment of incisal edge fragments  
Endod Dent Traumatol 11: 129-135
- 18 **Baratieri LN, Monteiro S Jr, Andrada MAC (1990):**  
Tooth fracture reattachment: Case reports  
Quint Int 21: 261-270
- 19 **Barkmeier WW, Erickson RL (1994):**  
Shear bond strength of composite to enamel and dentin using Scotchbond Multi-Purpose  
Am J Dent 7: 175-179
- 20 **Blunck U, Haller B (1999):**  
Klassifikation von Bondingsystemen  
Quintessenz 50: 1021-1033

- 21 Bouillaguet S, Gysi P, Wataha JC, Ciucchi B, Cattani M, Godin C, Meyer JM (2001):**  
Bond strength of composite to dentin using conventional, one-step, and self-etching adhesive systems  
J Dent 29: 55-61
- 22 Brackett WW, Ito S, Nishitani Y, Haisch LD, Pashley DH (2006):**  
The microtensile bond strength of self-etching adhesives to ground enamel  
Oper Dent 31-3: 332-337
- 23 Braga RR, Cesar PF, Gonzaga CC (2000):**  
Tensile bond strength of filled and unfilled adhesives to dentin  
Am J Dent 13: 73-76
- 24 Buonocore MG, Davila J (1973):**  
Restoration of fractured anterior teeth with ultraviolet-light-polymerized bonding materials: a new technique  
J Am Dent Assoc 86: 1349-1354
- 25 Burden DJ (1995):**  
An investigation of the association between overjet size, lip coverage, and traumatic injury to maxillary incisors  
Europ J Ortho 17: 513-517
- 26 Burke FJ (1991):**  
Reattachment of a fractured central incisor tooth fragment  
Br Dent J 170: 223-225
- 27 Burrow MF, Tagami J, Negishi T, Nikaido T, Hosoda H (1994):**  
Early tensile bond strengths of several enamel and dentin bonding systems  
J Dent Res 73: 522-528
- 28 Chappell RP, Eick JD (1994):**  
Shear bond strength and scanning electron microscopic observation of six current dentinal adhesives  
Quint Int 25: 359-368
- 29 Chu FC, Yim TM, Wei SH (2000):**  
Clinical considerations for reattachment of tooth fragments  
Quint Int 31: 385-391
- 30 Davidson CL, Abdalla AL, De Gee AJ (1993):**  
An investigation into the quality of dentin bonding systems for accomplishing a durable bond  
J Oral Rehabil. 20: 291-300

- 
- 31 **Dean JA, Avery DR, Swartz ML (1986):**  
Attachment of anterior tooth fragments  
Pediatr Dent 8: 139-143
- 32 **DeHoff PH, Anusavice KJ, Wang Z (1995):**  
Three-dimensional finite element analysis of shear bond test  
Dent Mater 11: 126-131
- 33 **Demarco FF, Fay R-M, Pinzon LM, Powers JM (2004):**  
Fracture resistance of re-attached coronal fragments - influence of different adhesive materials and bevel preparation  
Dent Traumatol 20: 157-163
- 34 **Duke ES, Lindemuth JS (1991):**  
Variability of clinical dentin substrates  
Am J Dent 4: 241-246
- 35 **Duke ES, Robbins JR, Snyder DS (1991):**  
Clinical evaluation of a dentinal adhesive system: three-year results  
Quint Int 22: 889-895
- 36 **Eick JD, Cobb CM, Chappell RP, Spencer P, Robinson SJ (1991):**  
The dentinal surface: Its influence on dentinal adhesion. Part I  
Quint Int 22: 967-977
- 37 **Eick JD, Robinson SJ, Chappell RP, Charles MC, Spencer P (1993):**  
The dentinal surface: Its influence on dentinal adhesion. Part III  
Quint Int 24: 571-582
- 38 **Einwag J, Pieper K (2002):**  
Kinderzahnheilkunde  
Urban & Fischer, München - Jena: 298-311
- 39 **El Kalla IH, García-Godoy F (1998):**  
Bond strength and interfacial micromorphology of four adhesive systems in primary and permanent molars  
J Dent Child 65: 169-176
- 40 **Farik B, Munksgaard EC (1999):**  
Fracture strength of intact and fragment-bonded teeth at various velocities of the applied force  
Eur J Oral Sci 107: 70-73
- 41 **Farik B, Munksgaard EC, Andreasen JO (2000):**  
Fracture strength of fragment-bonded teeth. Effect of calcium hydroxide lining before bonding  
Am J Dent 13: 98-100

- 42 Farik B, Munksgaard EC, Andreasen JO (2000):**  
Impact strength of teeth restored by fragment-bonding  
Endod Dent Traumatol 16: 151-153
- 43 Farik B, Munksgaard EC, Andreasen JO, Kreiborg S (1998):**  
Adhesive bonding of fragmented anterior teeth  
Endod Dent Traumatol 14 (3): 119-123
- 44 Farik B, Munksgaard EC, Andreasen JO, Kreiborg S (1999):**  
Drying and rewetting anterior crown fragments prior to bonding  
Endod Dent Traumatol 15 (3): 113-116
- 45 Farik B, Munksgaard EC, Andreasen JO, Kreiborg S (2002):**  
Fractured teeth bonded with dentin adhesives with and without unfilled resin  
Dent Traumatol 18: 66-69
- 46 Farik B, Munksgaard EC, Suh BI, Andreasen JO, Kreiborg S (1998):**  
Adhesive bonding of fragmented anterior teeth: Effect of wet technique and  
rewetting agent  
Am J Dent 11: 251-253
- 47 Fasbinder DJ, Burgess JO, Robbins JW, Theobald WD (1989):**  
Tensile bond strength of dental adhesives to dentin and enamel  
Dent Mater 5: 272-276
- 48 Finger WJ (1988):**  
Dentin bonding agents. Relevance of in-vitro investigations  
Am J Dent 1: 184
- 49 Forsberg C-M, Tedestam G (1993):**  
Etiological and predisposing factors related to traumatic injuries to permanent  
teeth  
Swed Dent J: 183-190
- 50 Fortin D, Swift ES Jr, Denehy GE, Reinhardt JW (1994):**  
Bond strength and mikroleakage of current dentin adhesives  
Dent Mater 10: 253-258
- 51 Fowler CS, Swartz ML, Moore BK, Rhodes BF (1992):**  
Influence of selected variables on adhesion testing  
Dent Mater 8: 265-269
- 52 Frankenberger R (2001):**  
Materialkundliche Grundlagen der Adhäsivtechnik  
3M ESPE AG, Seefeld: 12-17

- 53 Garberoglio R, Brännström M (1976):**  
Scanning electron microscopic investigation of human dentinal tubules  
Arch Oral Biol 21: 355-362
- 54 Goracci C, Bertelli E, Ferrari M (2004):**  
Bonding to worn or fractured incisal edges: Shear bond strength of new adhesive systems  
Quint Int 35: 21-27
- 55 Gordan VV, Vargas MA, Cobb DS (1997):**  
Evaluation of adhesive systems using acidic primers  
Am J Dent 10: 219-223
- 56 Gwinnett AJ (1992):**  
Interfacial morphology of resin composite and shiny erosive lesions  
Am J Dent 5: 315-317
- 57 Gwinnett AJ (1994):**  
Altered tissue contribution to interfacial bond strength with acid conditioned dentin  
Am J Dent 7: 243-246
- 58 Gwinnett AJ (1994):**  
A new method to test the cohesive strength of dentin  
Quint Int 25: 215-218
- 59 Hadavi F, Hey JH, Ambrose ER, Louie PW, Shinkewski DJ (1993):**  
The effect of dentin primer on the shear bond strength between composite resin and enamel  
Oper Dent 18: 61-65
- 60 Haller B (1994):**  
Mechanismus und Wirksamkeit von Dentinhaftvermittlern  
Dtsch Zahnärztl Z 49: 750-759
- 61 Haller B (2006):**  
Wenig Fortschritte bei Adhäsiven  
Zahnärztliche Mitteilungen 96: 60
- 62 Hasegawa T, Itoh K, Koike T, Yukitani W, Hisamitsu H, Wakumoto S, Fujishima A (1999):**  
Effect of mechanical properties of resin composites on the efficacy of the dentin bonding system  
Oper Dent 24: 323-330
- 63 Hashimoto M, Ohno H, Kega M, Sano H, Endo K, Oguchi H (2002):**  
Fractured surface characterization: wet versus dry bonding  
Dent Mater 18: 95-102

- 64 Hellwig E, Klimek J, Attin T (2003):**  
Einführung in die Zahnerhaltung  
Urban und Fischer, München - Jena: 162-168
- 65 Hill CM, Crosher RF, Mason DA (1985):**  
Dental and facial injuries following sports accidents: a study of 130 patients  
Br J Oral Maxillofac Surg 23: 268-274
- 66 Holtan JR, Nystrom G, Phelps RA, Anderson TB, Becker WS (1995):**  
Influence of different etchants and etching times on shear bond strength  
Oper Dent 20: 94-99
- 67 Holzmeier M, Ernst C-P, Willershausen B, Hirschfelder U (2006):**  
In-vitro-Scherhaftvergleich selbstkonditionierender und konventioneller  
Adhäsive für die kieferorthopädische Befestigung  
J Orofac Orthop 67: 244-259
- 68 Hugo B (1999):**  
Direkte Veneers  
Ästhet Zahnmed 4: 279-282
- 69 Hugo B (2001):**  
Optimale Approximalkontakte  
Ästhet Zahnmed 3: 142-148
- 70 Inoue M, Finger WJ, Mueller M (1994):**  
Effect of filler content of restorative resins on retentive strength to acid-  
conditioned enamel  
Am J Dent 7: 161-166
- 71 International Organisation for Standardization, Technical Committee  
106/SC1/WG11 (1991):**  
Dental materials: Guidance on testing of adhesion to tooth structure  
Committee draft: ISO/TC 106/SC 1 N 236 resolution 6:
- 72 Jarvinen S (1979):**  
Fractured and avulsed permanent incisors in Finnish children. A retrospective  
study  
Acta Odontol Scan 37: 47-50
- 73 Kanca III. J (1996):**  
Replacement of a fractured incisor fragment over pulpal exposure:  
A long-term case report  
Quint Int 27: 829-832

- 74 **Kaste LM, Gift HC, Bhat M, Swango PA (1996):**  
Prevalence of Incisor Trauma in Persons 6 to 50 Years of Age: United States, 1988-1991  
J Dent Res 75: 696-705
- 75 **Kawano F, Dootz ER, Koran III A, Craig RG (1992):**  
Comparison of bond strength of six soft denture liners to denture base resin  
J Prosthet Dent 68: 368-371
- 76 **Kitasako Y, Burrow MF, Nikaido T, Harada N, Inokoshi S, Yamada T, Takatsu T (1995):**  
Shear and tensile bond testing for resin cement evaluation  
Dent Mater 11: 298-304
- 77 **Kuntze C, Fischer J (1997):**  
Korrektur von Frontzahndefekten mit der Edge up-Technik  
Phillip J 14: 351-356
- 78 **Kwong SM, Cheung GSP, Kei LH, Itthagarun A, Smales RJ, Tay FR, Pashley DH (2002):**  
Micro-tensile bond strengths to sclerotic dentin using a self-etching and a total-etching technique  
Dent Mater 18: 359-369
- 79 **Leloup G, Hoore WD, Bouter D, Degrange M, Vreven J (2001):**  
Meta-analytical review of factors involved in dentin adherence  
J Dent Res 80: 1605-1614
- 80 **Mader C (1978):**  
Restoration of a fractured anterior tooth  
J Am Dent Assoc 96: 113-115
- 81 **Maia EAV, Baratieri LN, de Andrada CMA, Monteiro S, de Araujo M (2003):**  
Tooth fragment reattachment: Fundamentals of technique and two case reports  
Quint Int 34: 99-107
- 82 **Marcenes W, Al Beiruti N, Tayfour D, Issa S (1999):**  
Epidemiology of traumatic injuries to the permanent incisors of 9-12-year-old schoolchildren in Damascus, Syria  
Endod Dent Traumatol 15: 117-123
- 83 **Marshall GW, Chang YJ, Saeki K, Gansky SA, Marshall SJ (2000):**  
Citric acid etching of several sclerotic dentin lesions: an AFM study  
Journal of Biomedical Material Research 49: 338-344

- 84 Martens LC, Beyls HMF, De Craene LG (1988):**  
Reattachment of the original fragment after vertical crown fracture of a permanent central incisor  
J Pedod 13: 53-62
- 85 Marx R, Haass C (1992):**  
Zug-oder Schertest--welcher Test ist für den Verbund Metall/Keramik aussagekräftiger  
Dtsch Zahnärztl Z 47: 165-168
- 86 Miles DA, Anderson RW, Pashley DH (1994):**  
Evaluation of the bond strengths of dentin bonding agents used to seal resected root apices  
J Endodon 20: 538-541
- 87 Montes MAJR, De Goes MF, Da Cunha MRB, Soares AB (2001):**  
A morphological and tensile bond strength evaluation of an unfilled adhesive with low-viscosity composites and a filled adhesive in one and two coats  
J Dent 29: 435-441
- 88 Morin DL, Cross M, Voller VR et al. (1988):**  
Biophysical stress analysis of restored teeth: modelling and analysis  
Dent Mater 4: 77-84
- 89 Mota CS, Demarco FF, Camacho GB, Powers JM (2003):**  
Tensile bond strength of four resin luting agents bonded to bovine enamel and dentin  
J Prosthet Dent 89: 558-564
- 90 Munksgaard EC, Hojtvad L, Jorgensen EHW, Andreasen FM, Andreasen JO (1991):**  
Enamel-dentin crown fractures bonded with various bonding agents  
Endod Dent Traumatol 7: 73-77
- 91 Murchinson DF, Burke FJT, Worthington RB (1999):**  
Incisal edge reattachment: Indication for use and clinical technique  
Br Dent J 186: 614-619
- 92 Murchinson DF, Worthington RB (1998):**  
Incisal edge reattachment: Literature review and treatment perspectives  
J Compend Dent 19: 731-743
- 93 Nakajima M, Sano H, Zheng L, Tagami M, Pashley DH (1999):**  
Effect of moist versus dry bonding to normal vs. caries-affected dentin with Scotchbond Multi-Purpose Plus  
J Dent Res 78: 1298-1303

- 94 Naumann M (2000):**  
Restaurationsmöglichkeiten unkomplizierter Frontzahnfrakturen mit Dentinbeteiligung - eine vergleichende In-vitro-Untersuchung  
Med Diss, Humboldt-Universität zu Berlin
- 95 Niederman R, Tantraphol MC, Slinin P, Hayes C, Conway S (2000):**  
Effectiveness of dentist-prescribed, home-applied tooth whitening. A meta analysis  
J Contemp Dent Pract 15: 20-36
- 96 Oilo G (1993):**  
Bond strength testing-what does it mean?  
Int Dent J 43: 492-498
- 97 Oilo G, Olsson S (1990):**  
Tensile bond strength of dentin adhesives: a comparison of materials and methods  
Dent Mater 6: 138
- 98 Olsen ME, Bishara SE, Damon P, Jakobsen J (1997):**  
Comparison of shear bond strength and surface structure between conventional acid etching and air-abrasion of human enamel  
Am J Orthod Dentofac Orthod 112: 502-506
- 99 Padilla R, Balikov S (1993):**  
Sports dentistry: coming of age in the '90s  
J Calif Dent Assoc 21: 27-37
- 100 Pagliarini A, Rubini R, Rea M, Campese M (2000):**  
Crown fractures: Effectiveness of current enamel-dentin adhesives in reattachment of fractured fragments  
Quint Int 31: 133-136
- 101 Panighi M, G`Sell C (1993):**  
Effect of the tooth microstructure on the shear bond strength of a dental composite  
J Biomed Mat Res 27: 975-981
- 102 Pantke A, Schüttler D, Hüttemann RW, Pantke H (1985):**  
Vergleichende Untersuchungen verschiedener Methoden zur Beurteilung von Oberflächenstrukturen präparierter Zähne  
Dtsch Zahnärztl Z 40: 368-391
- 103 Pashley DH, Ciucchi B, Sano H, Horner JA (1993):**  
Permeability of dentin to adhesive resin  
Quint Int 24: 618-631

- 104 Pashley DH, Hidehiko S, Ciucchi B, Yoshiyama M, Carvalho RM (1995):**  
Adhesion testing of dentin bonding agents: a review  
Dent Mater 11: 117-125
- 105 Pashley EL, Tao L, Mackert JR, Pashley DH (1988):**  
Comparison of in-vivo vs. in-vitro bonding of composite resin to the dentin of canine teeth  
J Dent Res 67: 467-470
- 106 Pashley EL, Tao L, Matthews WG, Pashley DH (1993):**  
Bond strength to superficial, intermediate and deep dentin in-vivo with four dentin bonding systems  
Dent Mater 9: 19-22
- 107 Pecora N, Yaman P, Dennison J, Herrero A (2002):**  
Comparison of shear bond strength relative to two testing devices  
J Prosthet Dent 88: 511-515
- 108 Perdigao J, Lambrechts P, Van Meerbeek B, Braem M, Yildiz E, Yücel T, Vanherle G (1996):**  
The interaction of adhesive systems with human dentin  
Am J Dent 9: 167-173
- 109 Perdigao J, Van Meerbeek B, Lopes MM, Ambrose WW (1999):**  
The effect of a re-wetting agent on dentin bonding  
Dent Mater 15: 285-295
- 110 Perinka L, Sano H, Hosoda H (1992):**  
Dentin thickness, hardness, and Ca-concentration vs: bond strength of dentin adhesives  
Dent Mater 8: 229-233
- 111 Peutzfeldt A, Vigild M (2001):**  
A survey of the use of dentin-bonding systems in Denmark  
Dent Mater 17: 211-216
- 112 Phrukkanon S, Burrow MF, Tyas MJ (1998):**  
Effect of cross-sectional surface area on the bond strength between resin and dentin  
Dent Mater 14: 120-128
- 113 Pilecki P, Stone DG, Sherriff M, Watson TF (2005):**  
Microtensile bond strengths to enamel of self-etching and one bottle adhesive systems  
J Oral Rehabil. 32: 531-540

- 114 Prati C, Ferrieri P, Galloni C, Mongiorgi R, Davidson CL (1995):**  
Dentin permeability and bond quality as affected by new bonding systems  
J Dent 23: 217-226
- 115 Prévost AP, Fuller JL, Peterson LC (1982):**  
The use of an intermediate resin in the acid-etch procedure: retentive strength,  
mikroleakage, and failure mode analysis  
J Dent Res 61: 412-418
- 116 Rappelli G, Massaccesi C, Putignano A (2002):**  
Clinical procedures for the immediate reattachment of a tooth fragment  
Dent Traumatol 18: 281-286
- 117 Reis A, Francci C, Loguercio AD, Carrhilho MRO, Rodrigues Filho LE (2001):**  
Re-Attachment of Anterior Fractured Teeth: Fracture Strength Using Different  
Techniques  
Oper Dent 26: 287-294
- 118 Reis A, Kraul A, Francci C, de Assis TGR, Crivelli DD, Oda M, Loguercio AD (2002):**  
Re-Attachment of Anterior Fractured Teeth: Fracture Strength Using Different  
Materials  
Oper Dent 27: 621-627
- 119 Reis A, Loguercio AD, Kraul A, Materson E (2004):**  
Reattachment of Fractured Teeth: A review of Literature Regarding Techniques  
and Materials  
Oper Dent 29: 226-233
- 120 Retief DH (1991):**  
Standardizing laboratory adhesion tests  
Am J Dent 4: 231-236
- 121 Retief DH, Mandras RS, Russell CM, Denys FR (1990):**  
Extracted human versus bovine teeth in laboratory studies  
Am J Dent 3: 253-258
- 122 Rix DW, Foley TF, Mamandras AH (2001):**  
A comparison of bond strength of three adhesives: composite resin, hybrid GIC,  
and glass filled GIC  
Am J Orthod Dentofacial Orthop 119: 36-42
- 123 Rocha MJC, Cardoso M (2001):**  
Traumatized permanent teeth in Brazilian children assisted at the federal  
University of Santa Catarina, Brazil  
Dent Traumatol 17: 245-249

- 124 Sanares AME, Itthagarun A, King NM, Tay FR, Pashley DH (2001):**  
Adverse surface interactions between one-bottle light-cured adhesives and chemical-cured composites  
Dent Mater 17: 542-556
- 125 Sano H, Ciucchi B, Matthews W, Pashley D (1994):**  
Tensile properties of mineralized and demineralized human and bovine dentin  
J Dent Res 73: 1205-1211
- 126 Sano H, Shono T, Sonoda H, Takatsu T, Ciucchi B, Carvalho R, Pashley DH (1994):**  
Relationship between surface area for adhesion and tensile bond strength--  
evaluation of a micro-tensile bond test  
Dent Mater 10: 236-240
- 127 Sano H, Takatsu T, Ciucchi B, Russell CM, Pashley DH (1995):**  
Tensile properties of resin-infiltrated demineralized human dentin  
J Dent Res 74: 1093-1102
- 128 Schmidseeder J (1998):**  
Ästhetische Zahnmedizin, Bd. 15  
Georg Thieme Verlag, Stuttgart - New York: 85-114
- 129 Schneider T (2007):**  
Fragmentbefestigung bei Kronenfrakturen - Eine In-vitro-Untersuchung zur  
Verbundfestigkeit verschiedener Dentinadhäsivsysteme  
Med Diss, Julius-Maximilians-Universität zu Würzburg
- 130 Schroeder HE (1982):**  
Orale Strukturbiologie  
Georg Thieme Verlag, Stuttgart - New York: 91
- 131 Sengun A, Ozer F, Unlu N, Ozturk B (2003):**  
Shear bond strenghts of tooth fragments reattached or restored  
J Oral Rehabil. 30: 82-86
- 132 Sidhu SK, Soh G, Henderson LJ (1991):**  
Effect of dentin age on effectiveness of dentin bonding agents  
Oper Dent 16: 218-222
- 133 Simonsen R (1979):**  
Traumatic fracture restoration: an alternetive use of the acid etch technique  
Quint Int 2: 15-22
- 134 Skaare AB, Jacobsen I (2003):**  
Dental injuries in Norwegians aged 7-18 years  
Dent Traumatol 19: 67-71

- 135 Sneddon IN (1961):**  
The distribution of stress in adhesive joints  
Oxford University Press, Oxford: 207-253
- 136 Söderholm KJM (1991):**  
Correlation of in-vivo and in-vitro performance of adhesive restorative materials: a report of the ASC MD156 task group on test methods for the adhesion of restorative materials  
Dent Mater 7: 74-83
- 137 Spasser H (1977):**  
Repair and Restauration of fractured, pulpally involed anterior tooth: a report of a case  
J Am Dent Assoc 94: 519-520
- 138 Spinus E (2004):**  
Longevity of composite restorations of traumatically injured teeth  
Am J Dent 17: 407-411
- 139 Staffanou RS (1972):**  
Restauration on fractured incisal angles  
J Am Dent Assoc 84: 146-150
- 140 Starkey P (1979):**  
Reattachment of a fractured fragment to a tooth  
J Indiana Dent Assoc 58: 37-38
- 141 Stöckli PW, Ben-Zur ED (1994):**  
Zahnmedizin bei Kindern und Jugendlichen  
Thieme, Stuttgart - New York: 215-253
- 142 Strickland SS, Retief DH, Russell CM, Denys FR (1992):**  
Gluma shear bond strength to enamel and dentin treated with pyruvic acid and glycine  
Am J Dent 5: 97-102
- 143 Swift EL Jr. (2002):**  
Dentin/enamel adhesives: review of the literature  
Pediatr Dent 24: 456-461
- 144 Swift EL Jr., Triolo PT Jr., Barkmeier WW, et al. (1996):**  
Effect of low-viscosity resins on the performance of dental adhesives  
Am J Dent 9: 100-104
- 145 Tam LE, Pilliar RM (1993):**  
Fracture toughness of dentin/resin-composite adhesive interface  
J Dent Res 72: 953-959

- 146 Tam LE, Pilliar RM (1994):**  
Effects of dentin surface treatments on the fracture toughness and tensile bond strength of a dentin-composite adhesive interface  
J Dent Res 73: 1530-1538
- 147 Tam LE, Yim D (1997):**  
Effect of dentine depth on the fracture toughness of dentine--composite adhesive interfaces  
J Dent 25: 339-346
- 148 Tanumiharja M, Burrow MF, Tyas MJ (2000):**  
Microtensile bond strengths of seven dentin adhesive systems  
Dent Mater 16: 180-187
- 149 Tao L, Pashley DH (1988):**  
Shear bond strengths to dentin: effects of surface treatments, depth and position  
Dent Mater 4: 371
- 150 Tay FR, Gwinnett AJ, Pang KM, Wei SHY (1995):**  
Variability in microleakage observed in total-etch wet-bonding technique under different handling conditions  
J Dent Res 74: 1168-1178
- 151 Tennery T (1978):**  
The fractured tooth reunited using the acid etch bonding technique  
Texas Dent J 96: 16-17
- 152 Thoms LM, Nicholls JI, Brudvik JS, Kydd WL (1994):**  
The effect of dentin primer on the tensile bond strength to human enamel  
Int J Prosthodont 7: 403-409
- 153 Tjan AH, Castelnovo J, Lui P (1996):**  
Bond strength of multi-step and simplified-step systems  
Am J Dent 9: 269-272
- 154 Van Meerbeek B, Braem M, Lambrechts P, Vanherle G (1994):**  
Morphological characterization of the interface between resin and sclerotic dentin  
J Dent 22: 141-146
- 155 Van Meerbeek B, Inokoshi S, Braem M, Lambrechts P, Vanherle G (1992):**  
Morphological aspects of the resin-dentin interdiffusion zone with different dentin adhesive systems  
J Dent Res 71: 1530-1540

- 156 Van Meerbeek B, Peumans M, Gladys S, Braem M, Lambrechts P, Vanherle G (1996):**  
Three-year clinical effectiveness of four total-etch dentinal adhesive systems in cervical lesions  
Quint Int 27: 775-783
- 157 Van Noort R, Noroozi S, Howard IC, Cardew G (1989):**  
A critique of bond strength measurements  
J Dent 17: 61-67
- 158 van Waes HJM, Stöckli PW (2001):**  
Farbatlant der Zahnmedizin, Bd. 17  
Thieme, Stuttgart - New York: 289-370
- 159 Versluis A, Tantbirojn D, Douglas WH (1997):**  
Why do shear bond tests pull out dentin?  
J Dent 17: 61-67
- 160 Watanabe I, Nakabayashi N (1994):**  
Measurement methods for adhesion to dentine: The current status in Japan  
J Dent 22: 67-72
- 161 Watanabe LG, Marshall GW Jr., Marshall SJ (1996):**  
Dentin shear strength: effects of tubule orientation and intratooth location  
Dent Mater 12: 109-115
- 162 Watson TF (1989):**  
A confocal optical microscope study of the morphology of the tooth/restoration interface using Scotchbond 2 dentin adhesive  
J Dent Res 68: 1124-1131
- 163 Wiegand A, Rödiger T, Attin T (2005):**  
Die Therapie von Kronenfrakturen bei Frontzähnen - Reattachment statt Restauration?  
Schweiz Monatsschr Zahnmed 115: 1172-1181
- 164 Williams KR, Edmundson JT, Rees JS (1987):**  
Finite element stress analysis of restored teeth  
Dent Mater 3: 200-206
- 165 Woronko GA, St Germain HA, Meiers JC Jr (1996):**  
Effect of dentin primer on the shear bond strength between composite resin and enamel  
Oper Dent 21: 116-121
- 166 Worthington RB, Murchison DF, Vandewalle KS (1999):**  
Incisal edge reattachment: The effect of preparation utilization and design  
Quint Int 30: 637-643

- 167 Xie J, Powers JM, McGuckin RS (1993):**  
In-vitro bond strength of two adhesives to enamel and dentin under normal and contaminated conditions  
Dent Mater 9: 295-299
- 168 Yoshiyama M, Carvalho R, Sano H, Horner J, Brewer P, Pashley D (1995):**  
Interfacial morphology and strength of bonds made to superficial versus deep dentin  
Am J Dent 8: 297-302
- 169 Yoshiyama M, Carvalho R, Sano H, Horner J, Brewer P, Pashley D (1996):**  
Regional bond strengths of resins to human root dentine  
J Dent 24: 435-442
- 170 Yoshiyama M, Matsu T, Ebisu S, Pashley D (1998):**  
Regional bond strengths of self-etching/self-priming adhesive systems  
J Dent 26: 609-616

## 8 Anhang

### 8.1 Abkürzungen

4-META	4-Methacryloyloxyethyl-trimellitat-anhydrit
A. Signifikanz	Asymptotische Signifikanz
Ad	Adhäsivbruch
Bis-GMA	Bisphenol-A-diglycidyl-methacrylat
BPDM	Biphenyldimethacrylat
EDTA	Ethylendiamintetraacetat
HEMA	Hydroxyethylmethacrylat
HPMA	Hydroxypropylmethacrylat
Ko	Kohäsivbruch
NPGGMA	N-Phenyl-glycin-glycidyl-methacrylat
PEGDMA	Polyethylen-glycol-dimethacrylat
PENTA	Dipentaerytritolpentamethacryloyloxyphosphat
PMMA	Polymethylmethacrylat
REM	Rasterelektronenmikroskop
TEGDMA	Triethylenglycol-dimethacrylat
UDMA	Urethan-dimethacrylat

## 8.2 Abbildungen

- Abb. 1:** Schematischer Versuchsaufbau der vorangegangenen In-vitro-Untersuchung
- Abb. 2:** Einfärben von Zahn und Fragment
- Abb. 3:** Bruchfläche vor und nach der Färbung
- Abb. 4:** Fotografieren der Bruchflächen mit Digitalkamera
- Abb. 5:** Mikroskop und Computer
- Abb. 6:** Schematischer Versuchsaufbau der vorliegenden Dissertation
- Abb. 7:** Bruchfläche der Basis und des Fragments, ungefärbt
- Abb. 8:** Bruchfläche der Basis und des Fragments, gefärbt, Bruchfläche des Fragments gespiegelt
- Abb. 9:** Vermessung der Gesamtbruchfläche und Dentinfläche der Basis und des Fragments, Markierung der Überlagerungsmarken
- Abb. 10:** Vermessung der adhäsivbedeckten Flächen im Schmelz- und Dentinbereich der Basis und des Fragments
- Abb. 11:** Alle eingezeichneten Flächen von Basis und Fragment
- Abb. 12:** Überlagerung der beiden Bruchflächen zur Bestimmung der gemeinsamen adhäsivbedeckten Schnittflächen
- Abb. 13:** Bestimmung der Frakturmodi
- Abb. 14:** Mittelwerte der Einzelbruchflächen aller Versuchszähne innerhalb einer Gruppe im Schmelz
- Abb. 15:** Mittelwerte der Einzelbruchflächen aller Versuchszähne innerhalb einer Gruppe im Dentin
- Abb. 16:** Medianwerte der prozentualen Flächenanteile aller Kohäsivbrüche innerhalb des Restaurationsmaterials im Dentinbereich

### 8.3 Herstellerverzeichnis

#### Materialien:

Adper <sup>®</sup> Prompt <sup>®</sup> L-Pop <sup>®</sup>	3M ESPE AG, D-82229 Seefeld Chargen-Nr.: L6154099
AdheSE <sup>®</sup>	Ivoclar Vivadent AG, FL-9494 Schaan Chargen-Nr.: F327334
Chloramin-T-Lösung 1%	Universitätsapotheke, D-97070 Würzburg
Heliobond <sup>®</sup>	Ivoclar Vivadent AG, FL-9494 Schaan
Knetmasse, NAKIPLAST <sup>®</sup>	Pelikan, D-30163 Hannover
Kochsalzlösung, isotonisch	Fresenius AG, D-61343 Bad Homburg
MIRA-2-Ton <sup>®</sup>	Hager & Werken GmbH & Co. KG, D-47006 Duisburg
OptiBond FL <sup>®</sup>	Kerr , USA - CA 92867 Item No. 25882 Adhesiv Chargen-Nr.:403100 Item No. 25881 Primer Chargen-Nr.: 403205
Syntac <sup>®</sup>	Ivoclar Vivadent AG, FL-9494 Schaan Chargen-Nr.: F53110
Technovit <sup>®</sup> 4071	Heraeus Kulzer GmbH, D-61273Wehrheim/Ts
Tetric Flow <sup>®</sup>	Ivoclar Vivadent AG, FL-9494 Schaan Chargen-Nr.: F57610/ G02404
Ultraetch <sup>®</sup> (37%ige H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> )	Ultradent Products, Inc., USA-Utha 84095

**Geräte:**

Computer, DELL, INSPIRON 5100	DELL GmbH, D-60549 Frankfurt am Main
Digitalkamera, Canon EOS 300D <sup>®</sup>	CANON INC., Tokio 146-8501 Japan
Makroobjektiv, Canon MACRO PHOTO LENS, MP-E 65mm F2.8 1-5x <sup>®</sup>	CANON INC., Tokio 146-8501 Japan
Lichtmikroskop, Stereo 5002	Eschenbach Optik GmbH + Co, D-90409 Nürnberg
Stativ, NORDMENDE S 200 <sup>®</sup>	DGC GmbH, D-86899 Landsberg am Lech

**Software:**

Adobe Photoshop 7.0  
Canon Utilities - Remote Capture 2.6  
Microsoft<sup>®</sup> Excel 2002  
Nemetschek Allplan FT V17  
SPSS, Version 11

## **Danksagung**

Herrn Prof. Dr. B. Klaiber möchte ich für die freundliche Überlassung des Themas der Arbeit sowie für die Übernahme des Referats danken.

Für die freundliche Übernahme des Korreferats danke ich Herrn Prof. Dr. Th. Holste ganz herzlich.

Frau Dr. C. Anding danke ich für die Idee der Arbeit sowie für die Anleitung und Unterstützung bei der Durchführung der Experimente und deren Auswertung.

Herzlich bedanken möchte ich mich auch bei Herrn A. Spahn für seine hilfreiche Unterstützung bei der statistischen Auswertung der Untersuchungsergebnisse.

Herrn Priv.-Doz. Dr. N. Hofmann danke ich für die Bereitstellung und Einweisung des Lichtmikroskops.

Für die Unterstützung bei der Bruchflächenanalyse möchte ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. H. Berger ganz herzlich bedanken.

Mein besonderer Dank geht an Frau Dr. U. Straßberger für die fachliche Unterstützung und die gute Zusammenarbeit.



