

Aus dem Universitätsklinikum Münster  
Poliklinik für Zahnerhaltung des  
Zentrums für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde  
- Direktor: Univ.-Prof. Dr. K. H. R. Ott -

**Laseroptische Untersuchungen zum Abrasionsverhalten moderner  
elektrischer Zahnbürsten nach robotergestützter Langzeitputzsimulation**

INAUGURAL-DISSERTATION  
zur  
Erlangung des doctor medicinae dentium  
der Medizinischen Fakultät der  
Westfälischen Wilhelms-Universität Münster

vorgelegt von  
Baumeister, David Wolfgang  
aus Aschaffenburg

**2009**

Gedruckt mit Genehmigung der  
Medizinischen Fakultät der  
Westfälischen Wilhelms-Universität Münster

Dekan:  
1. Berichterstatter:  
2. Berichterstatter:  
Tag der mündlichen Prüfung:

Univ.-Prof. Dr. W. Schmitz  
Univ.-Prof. Dr. K. H. R. Ott  
Univ.-Prof. Dr. Dr. L. Figgenger  
26.10.2009

Aus dem Universitätsklinikum Münster  
Poliklinik für Zahnerhaltung des  
Zentrums für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde  
Referent: Univ.-Prof. Dr. K. H. R. Ott  
Koreferent: Univ.-Prof. Dr. Dr. L. Figgener

## **Zusammenfassung**

### **Laseroptische Untersuchungen zum Abrasionsverhalten moderner elektrischer Zahnbürsten nach robotergestützter Langzeitputzsimulation**

David Wolfgang Baumeister

Gegenstand der vorliegenden Untersuchung ist es, an einem hierfür entwickelten Arbeitsplatz die Abrasivität verschiedener elektrischer Zahnbürsten mit unterschiedlichen Bürsten-/Bürstenkopf-Kombinationen in Schmelz und Dentin zu untersuchen und vorhandene Unterschiede zu analysieren.

Zu diesem Zweck wurden menschliche Zähne einer Putzsimulation von fünf Jahren unterzogen. Für die Versuche wurde eine Bürstenhalterung mit einer integrierten stufenlos justierbaren Gewichtsmechanik zur Aufrechterhaltung eines für alle Bürsten einheitlichen Anpressdrucks konstruiert. Ein computergesteuerter Sechs-Achsen-Industrieroboter stellte eine natürliche Putzbewegung sicher. Vor und nach der Putzsimulation wurden Abformungen der Proben genommen und Gipsrepliken erstellt. Die Schmelz- und Dentinoberflächen wurden mit einem berührungsfrei arbeitenden dreidimensionalen Oberflächenmessgerät erfasst und die Veränderungen mit einer bildverarbeitenden Software quantifiziert.

Es konnte gezeigt werden, dass die Abrasivität ein multifaktorielles Geschehen ist, bei dem sich der Einfluss einzelner Faktoren jedoch isolieren lässt. Es ergeben sich deutliche Hinweise auf das Gefahrenpotential einzelner Bürsten/Bürstenkopf-Kombinationen für Zähne mit freiliegendem Dentin.

Tag der mündlichen Prüfung: 26.10.2009

*Diese Dissertation ist meiner Familie und vor allem meinen lieben Eltern in großer Dankbarkeit gewidmet.*

## Inhaltsverzeichnis

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>Einleitung</b> .....  | <b>1</b>  |
| <b>2</b> | <b>Literaturübersicht und theoretische Überlegungen</b> .....        | <b>4</b>  |
| 2.1      | Zahnaufbau .....   | 4         |
| 2.2      | Zahnpasta .....  | 5         |
| 2.3      | Zahnbürsten .....  | 6         |
| 2.3.1    | Geschichte der Zahnbürste und der elektrischen Zahnbürste .....      | 6         |
| 2.3.2    | Nutzen und Schaden moderner elektrischer Zahnbürsten .....           | 7         |
| <b>3</b> | <b>Zielsetzung</b> .....   | <b>10</b> |
| <b>4</b> | <b>Material und Methode</b> .....                                    | <b>11</b> |
| 4.1      | Verwendete Bürsten .....   | 11        |
| 4.2      | Sammlung, Lagerung und Einbettung der Probenzähne .....              | 14        |
| 4.3      | Simulationsparameter .....   | 17        |
| 4.3.1    | Aufbau und Funktionsweise der Putzsimulationsapparatur .....         | 17        |
| 4.3.2    | Anpressdruck der Bürsten auf die Proben .....                        | 20        |
| 4.3.3    | Abrasionsmittel .....  | 20        |
| 4.3.4    | Simulationsdauer .....   | 21        |
| 4.4      | Herstellung von Hartgipsrepliken der Probenzähne .....               | 22        |
| 4.5      | Quantifizierung von Defekttiefe und Defektvolumen .....              | 24        |
| 4.5.1    | Optisches 3D-Oberflächenmessgerät (Laserscan 3D) .....               | 24        |
| 4.5.2    | Bildverarbeitung (Match 3D) .....                                    | 27        |
| 4.6      | Statistische Analyse .....   | 29        |
| <b>5</b> | <b>Ergebnisse</b> .....  | <b>31</b> |
| 5.1      | Abrasion bei verschiedenen Bürsten-/Bürstenkopf-Kombinationen .....  | 32        |
| 5.2      | Abrasion bei Bürsten mit unterschiedlichen Antriebskonzepten .....   | 42        |
| 5.3      | Abrasion bei Bürsten mit unterschiedlichen Bürstenköpfen .....       | 44        |
| 5.4      | Abrasion bei Bürsten unterschiedlicher Konstruktionsausführung ..... | 46        |
| 5.5      | Abrasionsverhältnis Schmelz/Dentin .....                             | 48        |
| <b>6</b> | <b>Diskussion</b> .....  | <b>53</b> |
| 6.1      | Ergebnisdiskussion .....   | 53        |
| 6.2      | Kritische Würdigung der Fragestellung .....                          | 56        |

---

|  |           |
|--|-----------|
| 6.3 Kritische Würdigung der Methodik.....            | 56        |
| 6.3.1 In-vitro-Versuche versus In-vivo-Versuche..... | 56        |
| 6.3.2 Proben.....                                    | 58        |
| 6.3.3 Abrasionsmittel.....                           | 59        |
| 6.3.4 Anpressdruck.....                              | 60        |
| 6.3.5 Simulationsapparatur und Bürstbewegung.....    | 61        |
| 6.3.6 Simulationsdauer.....                          | 62        |
| 6.3.7 Verwendung von Gipsrepliken.....               | 62        |
| 6.3.8 Laserscan 3D/Match 3D.....                     | 63        |
| 6.4 Klinische Relevanz.....                          | 64        |
| <b>7 Zusammenfassung.....</b>                        | <b>65</b> |
| <b>8 Literaturverzeichnis.....</b>                   | <b>67</b> |
| <b>9 Anhang 74</b>                                   |           |
| 9.1 Tabellen.....                                    | 74        |
| 9.2 Diagramme.....                                   | 79        |
| <b>10 Danksagung.....</b>                            | <b>98</b> |
| <b>11 Lebenslauf.....</b>                            | <b>99</b> |

## 1 Einleitung

Die Mundhygiene trägt in mehrfacher Hinsicht zur Gesundheit und zum allgemeinen Wohlbefinden des Menschen bei. Der oralen Hygiene muss sowohl in der Zahnheilkunde, als auch in der Humanmedizin eine erhebliche krankheitsvorbeugende Bedeutung beigemessen werden. So legen zum Beispiel zahlreiche Untersuchungen einen Kausalzusammenhang zwischen Parodontitis und kardiovaskulären Erkrankungen wie Herzinfarkt und Schlaganfall nahe [37].

Aus zahnheilkundlicher Sicht werden in Bezug auf die Gesundheit der Zähne und des Zahnhalteapparates folgende Punkte als wichtig erachtet:

Beim Thema Ernährung muss in der Bevölkerung ein gesteigertes Bewusstsein etabliert werden. Wenn man die Häufigkeit der Aufnahme niedermolekularer Kohlenhydrate reduziert, kann den Karies verursachenden Mikroorganismen das notwendige Substrat entzogen werden [25; 64].

Einen weiteren Pfeiler der Kariesprävention stellen Fluoridierungsmaßnahmen dar. Diese erhöhen zum einen durch Verminderung der Säurelöslichkeit der mineralischen Bestandteile der Zahnhartsubstanzen die Widerstandskraft der Zähne gegenüber pathogenen Einflüssen. Zum anderen ermöglichen Fluoridierungsmaßnahmen die Remineralisierung bei initialen kariösen Läsionen.

Auch mit Hilfe von regelmäßigen Kontrollen durch den Zahnarzt lassen sich die Risiken von Erkrankungen der Zähne und des Zahnhalteapparates verringern. Eventuelle Schäden, Prädispositionen und Risiken können so frühzeitig erkannt werden. Durch rasches Eingreifen bzw. durch zahnmedizinische Beratung können daraus möglicherweise resultierende Folgeschäden vermieden werden. Als Beispiel sei hier die Erhebung eines Plaqueindex mit darauf folgender individueller Mundhygieneinstruktion und Motivation erwähnt. Hierdurch sollen individuelle Schwachstellen in der Mundhygiene des Patienten aufgedeckt und nach Möglichkeit beseitigt werden.



Vor allem aber müssen selbstverständlich die regelmäßigen, selbstständig zuhause durchgeführten Reinigungsmaßnahmen erwähnt werden. Diese sollten in der Regel nach jeder Mahlzeit, jedoch mindestens zweimal täglich stattfinden. Sie sind von größter Bedeutung bei der Entfernung von Zahnbelägen, bevor jene zu aktiver Plaque akkumulieren, und dienen damit der Vorbeugung von Schäden an den Zähnen oder dem Zahnhalteapparat.

Zu diesem Zweck stehen dem Konsumenten Zahnbürsten, Zahnpasta und Zahnseide zur Verfügung, wobei auch Mundspüllösungen durchaus ergänzend sinnvoll sein können. Selbstverständlich muss auch eine geeignete Putztechnik für eine adäquate Mundhygiene erlernt werden.

Die käuflich erwerbbaaren Mundhygieneartikel sind keine Neuerfindungen, sondern Hilfsmittel, die über die Jahrhunderte immer weiter entwickelt worden sind. Erstaunlicherweise unterliegen Mundhygieneartikel, was die Produktprüfung und die Zulassung zum Verkauf anbelangt, den gleichen Auflagen wie Kosmetikartikel und nicht dem Medizinproduktegesetz [34]. Sie werden nicht als medizinische Geräte bzw. Substanzen gewertet.

In der Mitte des letzten Jahrhunderts wurden die ersten elektrischen Zahnbürsten für den Massenmarkt entwickelt. Obwohl es als erwiesen gilt, dass man auch mit einer herkömmlichen Handzahnbürste eine ausreichend gute Mundhygiene bewerkstelligen kann [30], gibt es doch auch einige Merkmale, die für eine elektrische Zahnbürste sprechen. So wird die angemessene Reinigung der Zähne mittels einer elektrischen Bürste deutlich vereinfacht, da die Putztechnik hierbei aufgrund der Eigenbewegung des Bürstenkopfes von geringerer Wichtigkeit ist. Dies kann vor allem motorisch eingeschränkten Personen, wie Kindern, älteren Menschen und Menschen mit Behinderungen eine erheblich verbesserte Mundhygiene ermöglichen [67]. Bei Kindern können elektrische Zahnbürsten zusätzlich zumindest für einige Zeit die Motivation steigern, da der Spieltrieb geweckt wird [55]. Auch bei Menschen mit uneingeschränkter Motorik konnte eine verbesserte Mundhygiene festgestellt werden, was man sowohl auf

die erleichterte Zahnreinigung als auch auf die verstärkte Motivation durch das neue Gerät zurückführen kann [27].

Die elektrischen Zahnbürsten haben in den letzten Jahren eine rasante Entwicklung erfahren. Dies gilt für die Antriebskonzepte, die verwendeten Akkumulatoren und die konstruktive Ausführung, aber auch für das Design, welches einen nicht zu unterschätzenden Einfluss auf den Erfolg solcher Produkte hat.

Zu bedenken ist allerdings, dass das Verwenden von Zahnbürsten bei der Mundhygiene durch die mechanische Bearbeitung der Zahnhartsubstanzen mit den Filamenten der Borsten zu einem zahnschädigenden Substanzabtrag führen kann. Häufiges Putzen mit hohem Kraftaufwand, falsche Putztechnik, Steifigkeit und Design der Borsten und der Gebrauch abrasiver Zahnpasten kann den Substanzabtrag verstärken, ohne dass bei diesem multifaktoriellen Geschehen die Interaktionswirkung der einzelnen Verstärker bislang klar abgegrenzt werden kann [44]. Unumstritten ist, dass der gewachsene Biofilm auf der Zahnoberfläche regelmäßig mechanisch entfernt werden muss.

Die hier vorliegende Studie widmet sich dem Vergleich von elektrischen Zahnbürsten hinsichtlich ihres unerwünschten Abtrags von Zahnhartsubstanzen.

## 2 Literaturübersicht und theoretische Überlegungen

### 2.1 Zahnaufbau

Der Hauptbestandteil des menschlichen Zahnes ist das Dentin. Das Dentin umgibt die Pulpa und schützt sie. Der Zahnschmelz bedeckt das Dentin im Bereich der Zahnkrone, während das Dentin im Bereich der Wurzel vom Wurzelzement umschlossen wird. Schmelz, Dentin und Zement werden allgemein als Zahnhartsubstanz bezeichnet. Jedoch unterscheiden sich die verschiedenen Zahnhartsubstanzen sowohl in ihren Materialeigenschaften wie Zusammensetzung, Härte, Druckfestigkeit und Elastizität als auch in ihrem histologischen Aufbau erheblich.

Der Schmelz hat einen hohen Anteil (95 Gew.-%) an mineralischen Bestandteilen und ist die härteste Substanz des menschlichen Körpers. Er besitzt eine Härte zwischen 250 und 550 HV<sup>1</sup>, eine Druckfestigkeit zwischen 300 und 450 MPa und ein Elastizitätsmodul zwischen 50000 und 85000 MPa [39].

Das Dentin verfügt über einen deutlich höheren Anteil an organischen Bestandteilen (20 Gew.-%) und ist deutlich weicher als der Schmelz. Es weist eine Härte zwischen 60 und 70 HV, eine Druckfestigkeit zwischen 200 und 350 MPa und ein Elastizitätsmodul zwischen 15000 und 20000 MPa auf [39].

Das Wurzelzement hat einen noch höheren Anteil an organischen Bestandteilen als das Dentin (27 Gew.-%). Es ähnelt im Aufbau dem menschlichen Knochen, ohne wie dieser vaskularisiert zu sein. Es wird bereits dem Zahnhalteapparat zugeordnet, da an ihm die parodontalen Fasern ansetzen, die den Zahn in der Alveole verankern [28].

---

<sup>1</sup> HV = Vickershärte; Die Härteprüfung ist in der Norm nach DIN EN ISO 6507-1 geregelt.

## 2.2 Zahnpasta

Wissenschaftlich ist unstrittig, dass Zahnpasten die häusliche Mundhygiene effektiv unterstützen können [66]. Die Zahnpasta erleichtert bei Benutzung einer Zahnbürste die Entfernung bakterieller Beläge von der Zahnoberfläche durch die in ihr enthaltenen Putzkörper und Tenside. Außerdem kann die Zahnpasta Träger pharmakologisch wirksamer Substanzen sein, wie beispielsweise Fluoride, die der Kariesprophylaxe dienen. Während als Tenside nur einige wenige Substanzen wie Natriumlaurylsulfat in geringer Konzentration verwendet werden (bis 2 %), variiert die Art und der Anteil an Abrasivstoffen stark (15 bis 55 %). Hier kommen Carbonate, Phosphate, Kieselgele, feindisperse Kieselsäure, Aluminiumoxidhydrate und Kunststoffe zum Einsatz, weshalb die Putzkörper bezüglich ihrer Oberflächenstruktur, Größe und Härte deutlich voneinander abweichen. Hierdurch ergeben sich große Unterschiede in der Abrasivität der verschiedenen Zahnpasten [28; 54; 71].

Die Abrasivität von Zahnpasten kann durch die Messung des Abriebs von radioaktiv markiertem Dentin und Schmelz quantifiziert werden. Aus dem Abrieb des Dentins wird der RDA-Wert (Radioactive Dentin Abrasion) und aus dem Abrieb des Schmelzes der REA-Wert (Radioactive Enamel Abrasion) ermittelt. Der RDA-Wert wurde 1998 in der DIN EN ISO 11609 "Zahnpasten" festgelegt. Dieser RDA-Wert hängt im Wesentlichen von der Härte, Größe und Oberflächenstruktur der Putzkörper ab, die der Zahnpasta beigemischt werden. RDA-Werte von 30 gelten als gering abrasiv, Werte zwischen 70 und 80 als mittelabrasiv. Werte über 100 werden als stark abrasiv bezeichnet. In einigen Zahnweißpasten werden zur Entfernung von Zahnverfärbungen sogar RDA-Werte bis 150 erreicht. Der gesetzliche Grenzwert ist auf einen RDA-Wert von 250 festgelegt.

## 2.3 Zahnbürsten

### 2.3.1 Geschichte der Zahnbürste und der elektrischen Zahnbürste

Seit mehr als 3000 Jahren werden in den verschiedenen Kulturkreisen die unterschiedlichsten Hilfsmittel zur Mundhygiene und speziell zur Reinigung der Zähne genutzt [65]. Die ersten, den heutigen Handzahnbürsten ähnlichen Geräte wurden in China um 1500 nach Christus hergestellt; in Europa wurde eine ähnliche Konstruktion wenige Jahre später am französischen Königshof vorgestellt. In den nächsten Jahrhunderten blieb die Benutzung von Zahnbürsten aber ein Privileg höherer Stände, bis die industrielle Revolution am Ende des 19. Jahrhunderts zum allgemeinen Durchbruch der Zahnbürste führte. Seitdem befindet sich die Handzahnbürste in einer ständigen evolutionären Weiterentwicklung. Ein bedeutender Fortschritt war der Ersatz der bis dahin üblichen Verwendung von Schweineborsten durch Kunstfasern (Nylon) um 1930 [21]. Die heutige Weiterentwicklung beschränkt sich weitestgehend auf die Beschaffenheit der Einzelborsten, die Anzahl und die Anordnung der Borsten, die Größe und Geometrie des Borstenfeldes und die Gestaltung des Handgriffes.

Die ersten elektrischen Zahnbürsten für den Massenmarkt wurden in den fünfziger Jahren des vergangenen Jahrhunderts in Amerika entwickelt und hatten dort bereits in den sechziger Jahren großen kommerziellen Erfolg. Da die damaligen Konstruktionen lediglich die mit einer Handzahnbürste ausgeführten Bewegungen imitierten, stagnierte dann aber der Markt in den siebziger und achtziger Jahren. In Deutschland wurden in den späten achtziger Jahren die Zähne wieder vorwiegend von Hand geputzt, und die elektrischen Zahnbürsten hatten den Ruf eines unnützen „Elektrospielzeuges“ [17]. Das änderte sich erst, nachdem 1988 bei der Firma BRAUN Oral B® die erste elektrische Zahnbürste mit rundem, rotierend-oszillierendem Bürstenkopf entwickelt wurde. Das Konstruktionsprinzip des rotierend-oszillierenden Bürstenkopfes verhalf der elektrischen Zahnbürste zum endgültigen Durchbruch. In der Folgezeit gab es eine andauernde Weiterentwicklung, vor allem mit Erhöhung der Rotations- bzw. Oszillationsfrequenz und der Einführung zusätzlicher Seitwärtsbewegungen des

Bürstenkopfes. Der wirtschaftliche Erfolg der rotierend-oszillierenden Zahnbürste führte zu einem verstärkten Wettbewerb, der die Entwicklung neuer Produkte mit anderen Konstruktionsprinzipien anstieß. Die Firma PHILIPS® brachte als Antwort eine Zahnbürste heraus, deren Kopf elektromagnetisch, durch gegenpolige Magnetfelder in Schwingungen versetzt wird. Auch diese Zahnbürsten unterliegen einer ständigen Innovation. Die Leistungssteigerung wird durch das Erhöhen der Amplitude der Borstenbewegungen realisiert [17].

### 2.3.2 Nutzen und Schaden moderner elektrischer Zahnbürsten

In einer Studie aus dem Jahre 1990 sah Mayer noch Vorteile für die Handzahnbürste hinsichtlich ihrer Fähigkeit, Plaque zu reduzieren [47]. In einer Übersichtsarbeit aus dem Jahre 1998 betonte Jepsen noch die adäquate Reinigungswirkung herkömmlicher Handzahnbürsten [30]. Andere, vor allem neuere Untersuchungen sehen jedoch eindeutige Vorteile der elektrischen Zahnbürsten: Stoltze fand 1994 eine effektivere Plaque-Entfernung durch elektrische Zahnbürsten sowie eine Reduktion von Gingivitiden [69]; Ainamo wies 1997 eine signifikante Verbesserung der gingivalen Gesundheit bei Benutzern einer elektrischen Zahnbürste nach [1]; ebenfalls 1997 berichtete Grossmann von einer reduzierten Plaque durch den Gebrauch elektrischer Zahnbürsten bei Kindern [23]. Dentino sah 2002 Vorteile beim Entfernen von Plaque und stellte ein vermindertes Vorkommen von Zahnstein fest [9]; in einer Übersichtsarbeit aus dem Jahre 2002 konstatiert Sicilia verminderte gingivale Blutungen und Entzündungen als Folge verminderter Plaque beim Anwenden elektrischer Zahnbürsten [67].

Wissenschaftlichen Studien haben für beide Funktionsprinzipien der derzeit auf dem Markt erhältlichen elektrischen Zahnbürsten, entweder rotierend-oszillierende Arbeitsbewegungen eines runden bis ovalen Bürstenkopfes oder schallaktivierte Schwenkbewegungen eines meist länglich-ellipsoiden Bürstenfeldes, gezeigt, dass sie in der Lage sind, effizient künstlichen Zahnbelag bei In-vitro-Untersuchungen [4; 33] und Biofilme bzw. Plaque bei In-vivo-Untersuchungen zu entfernen [23; 26; 49].

Für die Zahnbürsten gilt wie für die Zahnpasten, dass sie neben ihrer unbestritten nützlichen Reinigungswirkung auch einen negativen Einfluss auf den Zustand von Zähnen und Gingiva haben können. Es muss davon ausgegangen werden, dass die schädlichen Wirkungen der auf dem Markt erhältlichen Zahnbürsten je nach Typ unterschiedlich ausgeprägt sind. Jedoch hat auch die Nutzungsgewohnheit des Anwenders einen nicht unerheblichen Einfluss: So können beispielsweise die falsche Putztechnik und ein zu hoher Kraftaufwand zur Schädigung von Zähnen und Zahnhalteapparat führen. In diesem Zusammenhang wurden Zahnhalsdefekte [43] und Gingivaabrasionen [31] beobachtet, die vermutlich auf zu intensive dentalhygienische Maßnahmen oder auch auf den Gebrauch harter Zahnbürsten [35] zurückzuführen sind.

Grundsätzlich ist beim Gebrauch von Zahnbürsten durch die mechanische Bearbeitung von Zahnhartsubstanzen mit den Filamenten der Zahnbürsten aufgrund der entstehenden Reibung mit einem Substanzabtrag zu rechnen. Die Zugabe von Abrasivmitteln wie die Putzkörper der Zahnpasten kann diesen Effekt zusätzlich verstärken, wobei zwischen verschiedenen Zahnpasten deutliche Abrasivitätsunterschiede bestehen [71].

In der Weiterentwicklung der elektrischen Zahnbürsten ist ein Trend der Hersteller festzustellen, die Anzahl der Arbeitsbewegungen pro Zeiteinheit bzw. die Amplitude der Arbeitsbewegungen zu erhöhen, um die Effizienz der Bürsten zu steigern. Naheliegender ist daher die Fragestellung, ob mit einer Leistungssteigerung dieser Geräte auch ein vergrößerter Materialabtrag und damit ein unerwünschter Zahnhartsubstanzverlust zu erwarten ist.

Weiterhin stellt sich die Frage, ob in einer In-vitro-Studie unter standardisierten, reproduzierbaren Bedingungen ein Vorteil für ein Antriebskonzept (rotierend-oszillierend oder schallaktiviert) hinsichtlich einer geringeren Abrasivität an den Zahnhartsubstanzen herausgearbeitet werden kann.

Eine erfolgreiche häusliche Mundhygiene muss zum einen eine effektive Plaquekontrolle ermöglichen, darf jedoch im Gegenzug nicht zu erhöhten Zahnhartsubstanzverlusten führen. Dies ist in kritischen Regionen, beispielsweise bei parodontal vorgeschädigten Zähnen mit freiliegenden Wurzeloberflächen oder bei bereits stark abradieren Zähnen mit freiliegenden Dentinoberflächen am ehesten zu befürchten: Aufgrund ihres niedrigeren Mineralisationsgrades sind diese Oberflächen erheblich weniger resistent gegen Umwelteinflüsse jeglicher Art und lassen somit einen erhöhten Materialabtrag bei mechanischer Beanspruchung erwarten. Studien im Rahmen der Parodontitistherapie mit regelmäßiger Bearbeitung dieser Zahnhartsubstanzen konnten zeigen, dass selbst geringste Hartsubstanzabträge im Laufe der Zeit zu klinisch relevanten Schäden im Bereich der Wurzeln akkumulieren können [19; 20; 58].

Die Weiterentwicklung und Qualitätskontrolle von Antriebskonzepten, der Bürstenkopfgestaltung und Filamentbeschaffenheit bei elektrischen Zahnbürsten unter möglichst kliniknahen Bedingungen ist unumgänglich, um die Anwendungssicherheit zu optimieren und einen unerwünschten Substanzabtrag zu minimieren.



### 3 Zielsetzung

Das Ziel der Studie ist es, käuflich erwerbbar, aktuelle elektrische Zahnbürsten der führenden Hersteller hinsichtlich ihres Abrasionsverhaltens zu untersuchen. Besonderes Augenmerk liegt darauf, möglichst viele Vertreter der jeweiligen Antriebskonzepte zu verwenden und diese, sofern vorhanden, mit den unterschiedlichen angebotenen Bürstenköpfen zum Einsatz zu bringen.

Extrahierte menschliche Zähne sollen einer Putzsimulation, die einem Zahnbürstengebrauch von fünf Jahren entspricht, ausgesetzt werden, wobei ein Industrieroboter ein natürliches, nichtlineares Bewegungsmuster ausführt. Der Verlust an Zahnhartsubstanz wird mittels eines dreidimensionalen Oberflächenmessverfahrens und einer anschließenden Bildverarbeitung quantitativ bestimmt.

Folgende Fragen sollen dabei geklärt werden:

- Gibt es Unterschiede zwischen den verschiedenen Zahnbürsten der führenden Hersteller bezüglich ihrer abrasiven Wirkung an den Zahnhartsubstanzen?
- Unterscheidet sich die Abrasivität von Zahnbürsten mit unterschiedlichem Antriebskonzept (rotierend-oszillierend und schallaktiviert)?
- Gibt es Unterschiede in der Abrasivität der für eine Bürste angebotenen verschiedenen Bürstenkopftypen (kleine und große Bürstenköpfe, Bürstenköpfe mit Silikoneinsätzen, harte und weiche Filamente)?
- Ist die Abrasivität der Bürsten in Schmelz und Dentin gleich?

## 4 Material und Methode

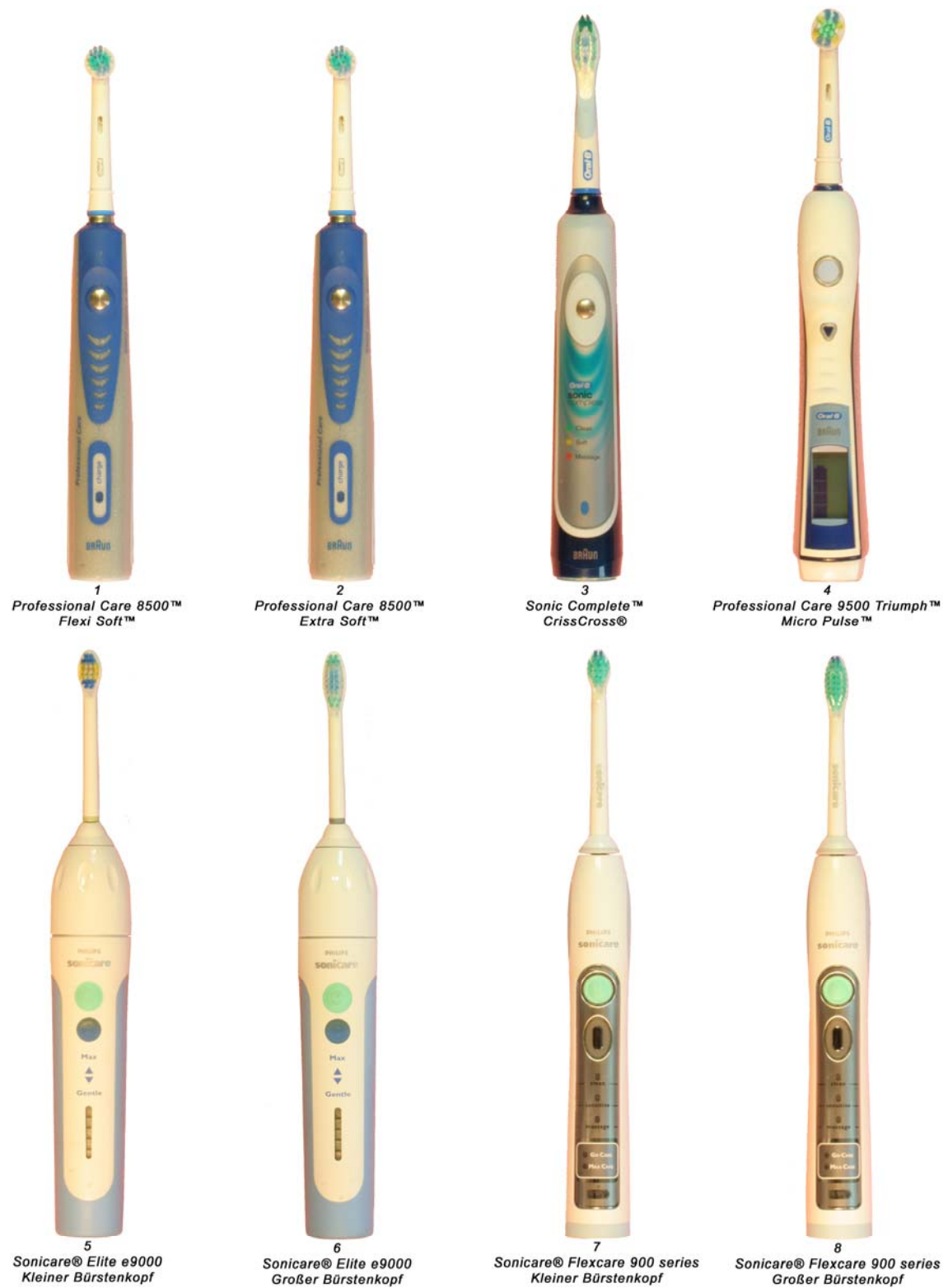
### 4.1 Verwendete Bürsten

Zur Anwendung kamen in dieser Studie elektrische Zahnbürsten mit unterschiedlichen Funktionsprinzipien und Bürstenköpfen folgender Hersteller (Tabelle 1).

| Nr. | Hersteller    | Zahnbürste                      | Funktionsprinzip                                 | Bürstenkopf              |
|-----|---------------|---------------------------------|--|--------------------------|
| 1   | BRAUN Oral B® | Professional Care 8500™         | Rotierend-Oszillierende Bewegungen               | Flexi Soft™ Bürstenkopf  |
| 2   | BRAUN Oral B® | Professional Care 8500™         | Rotierend-Oszillierende Bewegungen               | Extra Soft™ Bürstenkopf  |
| 3   | BRAUN Oral B® | Sonic Complete™                 | Elektromagnetisch erzeugte Schwingungen (Schall) | CrissCross® Bürstenkopf  |
| 4   | BRAUN Oral B® | Professional Care 9500 Triumph™ | Rotierend-Oszillierende Bewegungen               | Micro Pulse™ Bürstenkopf |
| 5   | PHILIPS®      | Sonicare® Elite e9000           | Elektromagnetisch erzeugte Schwingungen (Schall) | Kleiner Bürstenkopf      |
| 6   | PHILIPS®      | Sonicare® Elite e9000           | Elektromagnetisch erzeugte Schwingungen (Schall) | Großer Bürstenkopf       |
| 7   | PHILIPS®      | Sonicare® FlexCare 900 series   | Elektromagnetisch erzeugte Schwingungen (Schall) | Kleiner Bürstenkopf      |
| 8   | PHILIPS®      | Sonicare® FlexCare 900 series   | Elektromagnetisch erzeugte Schwingungen (Schall) | Großer Bürstenkopf       |

**Tabelle 1:** Untersuchte Zahnbürsten und Bürstenköpfe

Das unterschiedliche Design der Bürsten zeigt die Abbildung 1.



**Abbildung 1:** Untersuchte Zahnbürsten und Bürstenköpfe

Die relevanten unterschiedlichen technischen Daten sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

| Nr.  | Bürste                          | Hersteller    | Bewegungen (1/min) | Seitwärtsbewegungen (1/min) |
|------|---------------------------------|---------------|--------------------|-----------------------------|
| 1, 2 | Professional Care 8500™         | BRAUN Oral B® | 40.000             | 8.800                       |
| 3    | Sonic Complete™                 | BRAUN Oral B® | 31.200             | Entfällt                    |
| 4    | Professional Care 9500 Triumph™ | BRAUN Oral B® | 40.000             | 8.800                       |
| 5, 6 | Sonicare® Elite e9000           | PHILIPS®      | 31.000             | Entfällt                    |
| 7, 8 | FlexCare® 900 series            | PHILIPS®      | 31.000             | Entfällt                    |

**Tabelle 2:** Technische Daten der untersuchten Zahnbürsten

Bis auf die *Professional Care 8500™* können alle Zahnbürsten in verschiedenen Leistungsstufen betrieben werden. In den Versuchen wurde allerdings ausschließlich der leistungsstärkste Modus – die Bezeichnungen der Hersteller variieren hier (BRAUN Oral B®: „clean“, PHILIPS®: „max“) – der jeweiligen Bürstentypen genutzt.

Alle untersuchten Zahnbürsten sind akkubetrieben. Vor jedem Versuchsdurchlauf wurde durch eine vollständige Aufladung eine optimale Leistungscharakteristik sichergestellt.

Alle Putzsimulationen der acht Bürsten-/Bürstenkopf-Kombinationen wurden in zehnfacher Ausführung wiederholt. Um mögliche individuelle Variationen der Leistungsdaten der einzelnen Zahnbürstenserie ausgleichen zu können, wurden für jeden Zahnbürstentyp wechselweise vier Musterzahnbürsten verwendet.

BRAUN Oral B® gibt für seine Bürstenköpfe eine Haltbarkeit von 3 - 4 Monaten an. Diese Zeitangabe wird in den Simulationsablauf wie folgt eingerechnet:

Haltbarkeit nach Herstellerangabe: 3 - 4 Monate

|  |                           |
|--|---------------------------|
| 4 (Monate) x 30 (Tage pro Monat)           | = 120 Tage                |
| 120 (Tage) x 2 (Putzvorgänge pro Tag)      | = 240 Putzvorgänge        |
| 240 (Putzvorgänge) x 2 (Minuten Putzdauer) | = 480 Minuten Haltbarkeit |

Probenanzahl pro Bürste: 10

|   |                |
|---|----------------|
| 30 Minuten <sup>2</sup> (1 Jahr Putzsimulation) x 5 (Jahre) | = 150 Minuten  |
| 150 Minuten x 10 (Proben)                                   | = 1500 Minuten |
| 1500 Minuten /480 Minuten                                   | = 3,125        |

Das bedeutet, dass man bei einer angegebenen Haltbarkeit eines Bürstenkopfes von 3 - 4 Monaten mindestens 4 Bürstenköpfe benötigt, um bei 10 Proben eine Putzdauer von ca. 5 Jahren simulieren zu können. Um jedoch mögliche produktionsbedingte Qualitätsunterschiede der einzelnen Bürstenköpfe innerhalb der Bürstenkopfserie ausgleichen zu können, wurden 8 Bürstenköpfe je Bürstentyp verwendet.

## 4.2 Sammlung, Lagerung und Einbettung der Probenzähne

Die zur Untersuchung verwendeten Zähne wurden nach der Extraktion mit einem Mulltupfer gereinigt, unter fließendem Wasser abgespült und in luftdichten Kunststoffbehältern in isotoner Kochsalzlösung (NaCl 0,9 %, Delta Select GmbH, Dreieich, Deutschland) bei Raumtemperatur vor dem eigentlichen Ver-

<sup>2</sup> 1 Jahr Putzsimulation entspricht 30 Minuten, s. a. Berechnung der Simulationsdauer

such gelagert, so dass eine Veränderung der mechanischen Eigenschaften auszuschließen war [36; 73; 74]. Die Lösung wurde einmal wöchentlich erneuert. Es wurden Weisheitszähne mit karies- und zahnsteinfreier Schmelz- und Wurzeloberfläche, die keine Zeichen vorheriger Oberflächenbearbeitung oder Schäden durch die Extraktion aufwiesen, für die weitere Bearbeitung verwendet.

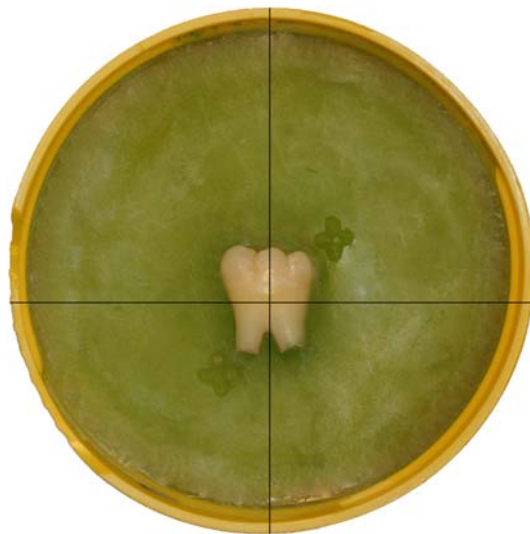
Zur später notwendigen, eindeutig reproduzierbaren Fixierung des Zahnes während der Putzsimulation wurden die Zähne einzeln mit einer Positionierungshilfe, als welche ein Artikulator (Kavo Dental GmbH, Biberach, Deutschland) diente, eingebettet (Abbildung 2).



**Abbildung 2:** Vorrichtung zur genormten Einbettung der Zähne

Die Positionierung jedes einzelnen Zahnes wurde so vorgenommen, dass der Schnittpunkt der Schmelz-Zementgrenze und der halbierten Strecke der größten mesio-distalen Ausdehnung der klinischen Krone für jeden Zahn einen individuell zu bestimmenden Bezugspunkt darstellt. Ziel dieser genormten Einbet-

tung war es, trotz der individuellen, natürlichen Proben, eine möglichst ähnliche, reproduzierbare Positionierung der Zähne und des genannten Bezugspunktes zu erzielen. Die später eingerichtete Bürstbewegung orientiert sich an diesem Bezugspunkt. Die Zähne wurden mittels Acrylatkunststoff (Technovit, Heraeus Kulzer GmbH, Werheim, Deutschland) in die Deckel eines genormten Kunststoffbehälters (SV PP 100m/D, Paul Böttger OHG, Bodenmais, Deutschland) eingebettet. Diese Einbettung erlaubt eine für alle Proben einheitliche Positionierung in einem Magnetsockelsystem. Zu diesem Zweck mussten alle Deckel an einer einheitlichen Stelle markiert werden. Dies erfolgte sofort nach der Einbettung. Das den Zahn umgebende Acrylat wurde abschließend dauerhaft apikal und koronal mit zwei reproduzierbaren Markierungen versehen, um Referenzpunkte für die spätere laseroptische Vermessung zu schaffen. Außerdem wurden die Deckel rückseitig dauerhaft mit einem Zahlencode versehen, um eine Katalogisierung der Proben zu ermöglichen (Abbildung 3).



**Abbildung 3:** Eingebettete Probe (Bezugspunkt mit Fadenkreuz markiert)

### 4.3 Simulationsparameter

#### 4.3.1 Aufbau und Funktionsweise der Putzsimulationsapparatur

Zur konstanten und exakten In-vitro-Bearbeitung der Probenzähne wurde ein computergesteuerter Sechs-Achsen-Industrieroboter verwendet (Mitsubishi® RV-E4NM, Mitsubishi Electric Corporation, Tokyo, Japan). Die im Acrylat-kunststoff normiert eingebetteten Zähne wurden in einer dreidimensional definierten Position mit einem Sockelsystem fixiert. Die jeweilige Bürste wurde am Arm des Roboters mittels einer speziell für diese Untersuchung konstruierten Bürstenhalterung befestigt (Abbildung 4).



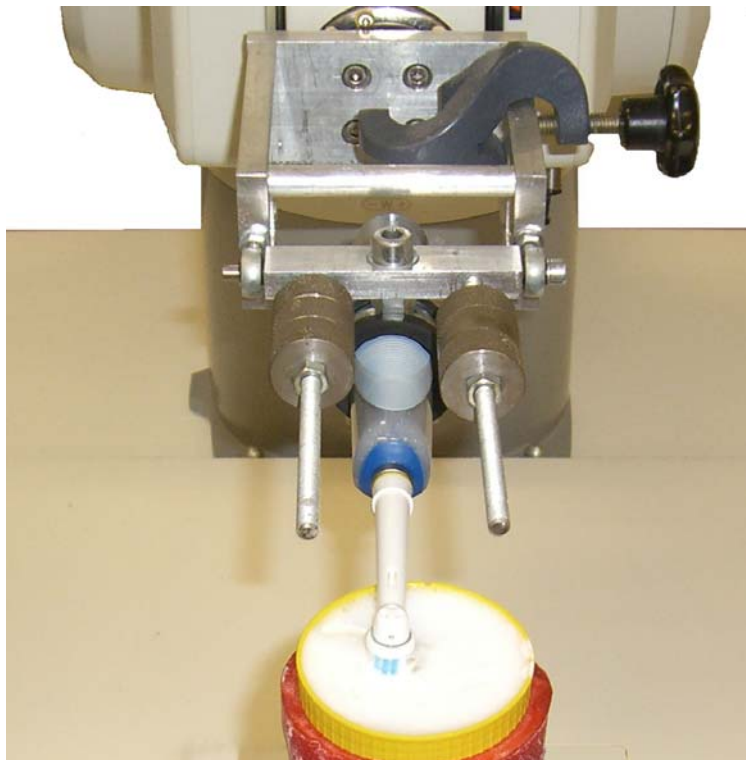
**Abbildung 4:** Aufbau der Putzsimulationsapparatur



Die Bürstenhalterung besteht aus drei Komponenten:

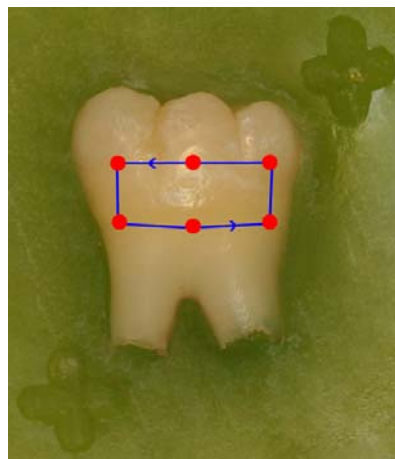
1. Anteil, der am Roboterarm fixiert ist
2. Scharniergelenk
3. eigentliche Bürstenhalterung

An dieser um eine Achse frei schwingenden Bürstenhalterung wurde mit Hilfe einer Aufnahmevorrichtung die jeweilige Bürste befestigt. Bei der Befestigung der Bürste an der frei schwingenden Bürstenhalterung hat das Zentrum des Bürstenkopfes immer einen festen Bezug zum Koordinatensystem des Roboters. Die Gewichtsmechanik ist ebenfalls an dem frei schwingenden Anteil angebracht. Sie besteht aus insgesamt sechs Gewichten, von denen je drei auf beiden Seiten der Bürsten über Schrauben entweder in Richtung Bürstenkopf oder in Richtung Bürstengriff verschoben werden können. Diese Gewichte können über jeweils zwei Muttern, eine vorne und eine hinten, in ihrer Position fixiert werden. Durch das Verschieben der Gewichte ist es somit möglich, die Belastung des Bürstenkopfes stufenlos zu verändern (Abbildung 5).



**Abbildung 5:** Bürstenhalterung mit stufenlos justierbarer Gewichtsmechanik

Die Simulation der Zahnbürstenbewegung lehnt sich an die vom Patienten durchgeführten Abläufe bei der häuslichen Mundhygiene an. So wurden mit dem Zentrum des Bürstenkopfes insgesamt 6 Punkte auf der bukkalen Fläche des Zahnes angefahren. Drei der Punkte liegen am koronalen Rand der Fläche und drei im Bereich der Schmelzzementgrenze. Das kontinuierliche Abfahren dieser 6 Punkte ergibt einen harmonischen Zyklus, der 2 Sekunden dauert. Während einer mesial-distalen Putzbewegung erfährt der Zahnbürstenkopf eine Veränderung des Anstellwinkels um  $30^\circ$  und hinsichtlich der Vor- und Rückbewegung eine Variation um 9 mm (Abbildung 6). Ein einfache, lineare Bürstmaschine, wie sie in anderen Studien verwandt wird, ermöglicht nur eingeschränkt die fließende Veränderung des Anstellwinkels. Aus diesem Grund kam der bereits in vorangegangenen Studien verwendete Roboter mit der oben beschriebenen Bürstenhalterung zum Einsatz [4; 6; 13].



**Abbildung 6:** Programmierter Anfahrpunkte eines Bürstzyklus

Eine spezielle Problematik ergab sich aus der Tatsache, dass sich die beiden bei den Versuchen verwendeten Zahnbürsten der Firma PHILIPS® nach einer Laufzeit von 2 Minuten automatisch abschalten. Damit der Versuchsdurchlauf trotzdem wie bei den anderen Bürsten erfolgen konnte, musste in den gewöhnlichen Putzzyklus eine weitere Roboterbewegung eingefügt werden, wodurch diese Bürsten erneut eingeschaltet wurden. Bei Vorversuchen stellte sich nach Deaktivierung und dem Versuch sofortiger Reaktivierung der Bürsten heraus,

dass in diese Bürsten eine Zeitschaltung integriert ist. Diese erfordert, die Putzzeit von 2 Minuten ablaufen zu lassen, bevor man erneut einen Putzzyklus starten kann. Andernfalls wird die Bürste zunächst nur für den zu den 2 Minuten noch fehlenden Zeitraum aktiviert.

Die Putzdauer, also die Verweildauer des Bürstenkopfes auf dem Probenkörper bei jedem Versuchsdurchlauf, konnte somit für alle Bürstentypen einheitlich gehalten werden.

#### 4.3.2 Anpressdruck der Bürsten auf die Proben

Die Einstellung des Drucks, mit dem die Zahnbürste die eingebetteten Zähne putzte, erfolgte über die in die Bürstenhalterung integrierte, stufenlos justierbare Gewichtsmechanik. Damit wurde sichergestellt, dass die unterschiedlichen Gewichte und die unterschiedlichen Gewichtsverteilungen der verschiedenen Zahnbürsten ausgeglichen werden konnten und so der Anpressdruck im Bereich des Bürstenkopfes während der Putzsimulation für alle Bürsten konstant gehalten wurde. Die genaue Einstellung des Anpressdruckes erfolgte vor jedem Durchlauf in der computerprogrammierten Startposition bei horizontaler Bürstenposition mittels einer geeichten Feinwaage. Von besonderer Wichtigkeit war hierbei die zentrale Positionierung des Bürstenkopfes auf der Wiegefläche.

Vor Versuchsbeginn wurde der Anpressdruck für alle Bürsten einheitlich auf 1,2 N festgelegt. Dies liegt im Bereich der Werte, die in einer vom Hersteller BRAUN Oral B<sup>®</sup> veröffentlichten Studie zur Reinigungseffizienz elektrischer Zahnbürsten angegeben werden [11].

#### 4.3.3 Abrasionsmittel

Für diese Studie wurde einheitlich eine Zahnpasta von mittlerer Abrasivität (RDA-Wert: 77) ausgewählt [73] (Elmex<sup>®</sup> rot/mentholfrei, GABA GmbH, Lörach, Deutschland).

Dieses Abrasionsmittel wird im Volumenverhältnis 1:3 in Form eines homogenen Gemisches von Zahnpasta und deionisiertem Wasser verwendet [73]. Es wird vor jedem Versuchsdurchlauf frisch angemischt und unmittelbar vor Versuchsstart auf die Probe aufgetragen. Um eine Sedimentation der Putzkörper zu vermeiden, wird durch eine programmierte Roboterbewegung das Abrasionsmittel in festen Zeitabständen erneut durchmischt.

#### 4.3.4 Simulationsdauer

Die Putzdauer pro Zahn wird folgendermaßen errechnet: Die empfohlene Putzdauer beträgt 30 Sekunden pro Quadrant. Die oralen, vestibulären und okklusalen Flächen wurden in „Prämolarenbreiten“ aufgeteilt und die 30 Sekunden wurden durch die Anzahl der Flächen (oral, vestibulär und okklusal) aller Zähne in einem Quadranten dividiert, wobei von einem vollbezahnten Gebiss (32 Zähne) ausgegangen wurde. Dies ergab eine Putzdauer von zwei Sekunden für eine laterale Molarenfläche pro Mundhygienemaßnahme. Somit lassen sich in relativ kurzer Zeit die Vorgänge mehrerer Jahre simulieren. Jede Probe wurde einem Simulationszeitraum von insgesamt 5 Jahren zugeführt. Bei jedem Versuchsdurchlauf wurden Mundhygienemaßnahmen für 1 Jahr simuliert. Die Simulation von einem Jahr Mundhygienemaßnahmen dauerte im Versuchsablauf ca. 30 Minuten. Als Berechnungsgrundlage gilt folgende Überlegung:

|   |                 |
|---|-----------------|
| 1 Zyklus (1 x Mundhygienemaßnahme<br>an der bukkalen Molarenfläche) | = 2 Sekunden    |
| 2 Zyklen (2 x Mundhygienemaßnahmen/Tag)                             | = 4 Sekunden    |
| 2 Zyklen x 7 (Tage/Woche) = 14 Zyklen                               | = 28 Sekunden   |
| 14 Zyklen x 52 (Wochen/Jahr) = 728 Zyklen                           | = 1456 Sekunden |

Dies entspricht in etwa 23 Minuten. Hinzu kommt die Zeit, die die Roboterbewegung in Anspruch nimmt, um die Sedimentation der Zahnpasta zu verhindern (ca. 8 Sekunden). Diese Bewegung vollzieht der Roboter nach jeweils 14 Zyklen (Simulationszeitraum einer Woche).

8 Sekunden x 52 (Wochen/Jahr) = 416 Sekunden

Dies entspricht in etwa 7 Minuten. Addiert man die beiden unterschiedlichen, miteinander kombinierten Vorgänge, so ergibt dies eine Dauer von ca. 30 Minuten, wenn man ein Jahr Mundhygienemaßnahmen simulieren möchte.

Aus der oben geschilderten Problematik mit den Zahnbürsten der Firma PHILIPS® resultierte hier ein geringfügig verlängerter Zeitraum, da die Führung der Zahnbürste zu dem speziellen Aufbau, der zur Reaktivierung derselben diente, ebenfalls einige Sekunden in Anspruch nahm (ca. 17 Sekunden) und dieser Vorgang nach jeweils 42 Zyklen wiederholt werden musste. Dies entspricht einem zusätzlichen Zeitaufwand von ca. 5 Minuten, was zu einer Dauer von ca. 35 Minuten für ein simuliertes Jahr der Mundhygienemaßnahmen für die Bürsten der Firma PHILIPS® führt. Die Kontaktzeit der Zahnbürste zur Zahnoberfläche ist dadurch jedoch nicht erhöht und somit für alle untersuchten Bürsten konstant.

#### **4.4 Herstellung von Hartgipsrepliken der Probenzähne**

Die Vermessung der entstehenden Zahnhartsubstanzverluste erfolgte laseroptisch. Diese Messmethode erfordert opake Oberflächen. Aufgrund der Transparenz des Dentins der Probenzähne mussten Gipsrepliken erstellt werden. Die in Acrylat eingebetteten Zähne wurden daher vor und nach der Putzsimulation in Doppelmischtechnik mit hochviskosem Impregum® (3M Espe, Seefeld, Deutschland) und niedrigviskosem Permadyne® (3M Espe, Seefeld, Deutschland) abgeformt (Abbildung 7). Eine reproduzierbare Codierung ermöglichte eine Zuordnung und Katalogisierung der Probe.



**Abbildung 7:** Abformung der Zähne in Doppelmischtechnik

Die Herstellung exakter Gipsreplika erfolgte unter Vakuum-Anmischung des Superhartgipses Typ IV (Fuji Rock<sup>®</sup>, GC Corporation, Tokio, Japan). Die Gipsrepliken wurden ebenfalls codiert, katalogisiert und geschützt gelagert. (Abbildung 8).



**Abbildung 8:** Ausguss der Abformung mit Superhartgips

## 4.5 Quantifizierung von Defekttiefe und Defektvolumen

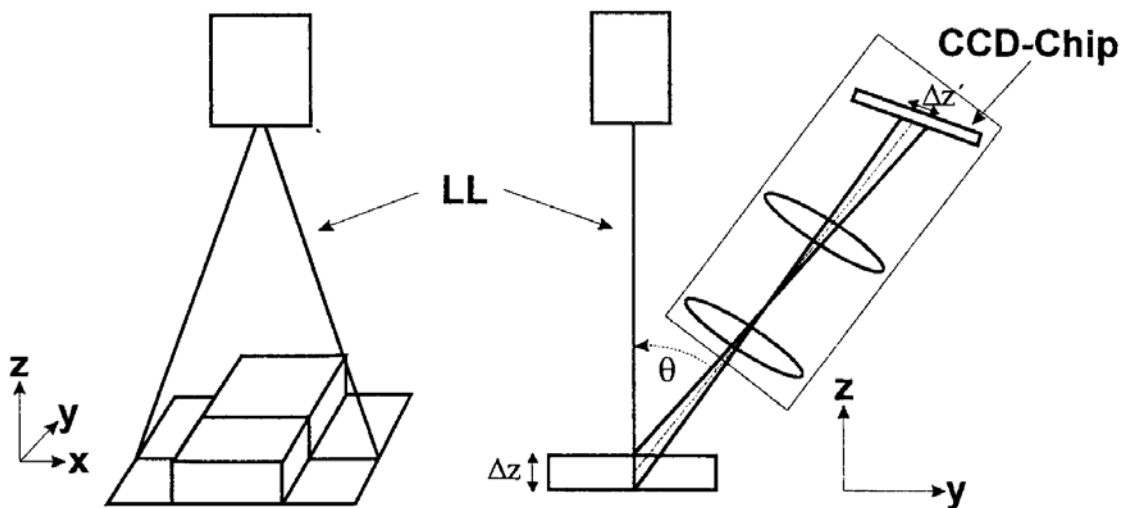
### 4.5.1 Optisches 3D-Oberflächenmessgerät (Laserscan 3D)

Die durch die Putzsimulation entstandenen Substanzdefekte der Zähne wurden quantifiziert. Dies geschah anhand der vor und nach Putzsimulation angefertigten Repliken mit dem laseroptischen Oberflächenmessgerät Laserscan 3D (Abbildung 9). Dieses arbeitet nach dem Triangulationsprinzip [53].



**Abbildung 9:** Laserscan 3D nach Gschoßmann [24]

In dieser als Laserscanner bezeichneten Apparatur wird der punktförmige Lichtstrahl einer Halbleiter-Laserdiode (670 nm Wellenlänge) über eine Linienoptik in eine Lichtlinie umgewandelt und auf die zu vermessende Oberfläche projiziert. Das von der Oberfläche reflektierte Laserlicht wird auf einem CCD-Chip abgebildet und die Information des Höhenunterschiedes auf den entstehenden seitlichen Versatz der einzelnen Oberflächenpunkte übertragen (Abbildung 10).



**Abbildung 10:** Funktionsdiagramm des Oberflächenmessgerätes nach Mehl [52]

Die technischen Daten des Laserscan 3D sind der Tabelle 3 zu entnehmen:

|  |                  |
|--|------------------|
| Auflösung in z-Richtung (vertikal)                           | 5 $\mu\text{m}$  |
| Auflösung in x-Richtung (lateral, CCD-limitiert)             | 25 $\mu\text{m}$ |
| Auflösung in y-Richtung (lateral, Verschiebetisch-limitiert) | >2 $\mu\text{m}$ |
| Tiefenmessbereich  | 20 mm            |
| Messzeit   | 40 ms/Linie      |

**Tabelle 3:** Technische Daten des Laserscan 3D nach Kunzelmann [42]

Die gesamte Oberflächeninformation erhält man durch schrittweises Bewegen der Replik auf einem schrittmotorgesteuerten Verschiebetisch. Der Abstand und die Anzahl der eingelesenen Lichtlinien kann mit Hilfe der Steuersoftware eingestellt werden. Die gewonnenen Daten werden zur weiteren Bildverarbeitung in einer binären Datei (\*.xv-file) gespeichert.

Mittels einer Grauwertanimation kann der Laserscanner die ermittelten Objektdaten plastisch darstellen. Dabei wird einer bestimmten Oberflächenkrümmung ein bestimmter Grauwert zugeordnet. Parallel zum Betrachter ausgerichtete Flächen erscheinen dabei weiß, geneigte Flächen entsprechend dem Nei-



gungswinkel grau bis schwarz. Die Darstellung eines Zahnes mittels Grauwertanimation vor Putzsimulation zeigt die Abbildung 11.



**Abbildung 11:** Grauwertanimation eines Zahnes vor Putzsimulation

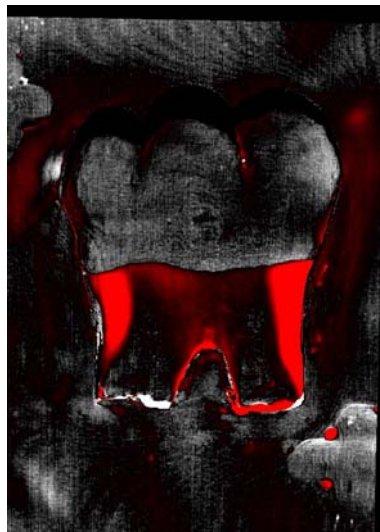
Die Grauwertanimation desselben Zahnes nach 5 Jahren Putzsimulation zeigt die Abbildung 12.



**Abbildung 12:** Grauwertanimation desselben Zahnes nach Putzsimulation

#### 4.5.2 Bildverarbeitung (Match 3D)

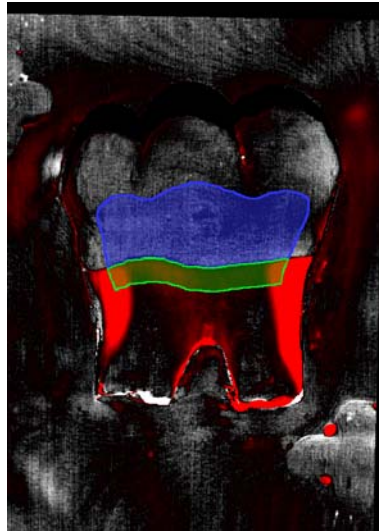
Die resultierenden Bilder der Oberflächen vor und nach der Putzsimulation wurden mit einer speziell für den Laserscan 3D konzipierten Software (Match 3D, Firma Willytec, München) zur Deckung gebracht (Matching). Zur Überlagerung der Oberflächenbilder wurden die Referenzpunkte herangezogen, welche nach der Einbettung der Zähne im Bereich der Einbettmasse eingebracht worden waren. Nach dem Matching konnte für jeden x-y-Koordinatenpunkt der Repliken die Höhendifferenz (Differenz der z-Werte) zwischen der Ausgangsreplik und der Replik nach Putzsimulation ermittelt werden. Das Defektvolumen und die Defekttiefe ließen sich so mit einer Genauigkeit von 10 µm bestimmen. Die räumliche Verteilung der Höhenunterschiede zwischen der Ausgangsreplik und der Endreplik wurde durch das Bildverarbeitungsverfahren als Differenzbild in Fehlfarben visualisiert. Ein solches Differenzbild des zuvor gezeigten Zahnes zeigt die Abbildung 13.



**Abbildung 13:** Differenzbild vor und nach Putzsimulation

Bei der vorliegenden Untersuchung lag das Hauptaugenmerk nicht auf dem Substanzverlust der gesamten Zahnoberfläche, sondern auf dem Unterschied zwischen dem Abtrag im Bereich des Dentins im Vergleich zu dem Abtrag im Bereich des Schmelzes. Daher wurden nach dem Matching die Schmelz-

Zementgrenze und ein jeweils festgelegter Bereich in der Schmelz- sowie in der Dentinregion individuell für jeden Zahn festgelegt (Abbildung 14).



**Abbildung 14:** Messbereich Schmelz/Dentin (Markierung blau/grün)

Der zur Auswertung herangezogene Bereich der Schmelzregion entsprach nahezu dem gesamten sichtbaren Schmelz abzüglich des Bereiches im Übergang zur Einbettmasse der Probe. Dies hat zwei Gründe: Zum einen kann es bei partiell überschüssiger Einbettmasse zur Verfälschung des Abrasionsverhaltens kommen, zum anderen liegen in diesen Bereichen stärkere Neigungen vor. Dies führt zu messtechnischen Problemen, da das Vermessungsverfahren Areale, die mehr als  $60^\circ$  vom Lot des Laserstrahles abweichen, weniger exakt erfasst.

Der Bereich in der Dentinregion ist auf ein 1 mm breites Band begrenzt, das unterhalb der Schmelz-Zementgrenze verläuft, wobei auch aus den oben genannten Gründen die Areale entfallen, welche den Übergang zur Einbettmasse der Proben darstellen.

Mit Hilfe der Software konnte eine statistische Auswertung des Differenzbildes vorgenommen werden. Dabei wurden unter anderem der lineare Materialverlust in  $\mu\text{m}$  als Mittelwert, als Median und die Quantile zwischen 0,5 % und 99,5 %

ermittelt. Ebenso wurde der volumetrische Materialverlust in  $\mu\text{m}^3$  ermittelt. Die Daten wurden in einer ASCII-Datei (\*.stat-file) gespeichert.

Die Quantifizierung der Defektvolumina und Defekttiefen erfolgte verblindet. Das bedeutet, dass der Person, die die Vermessung der Gipsrepliken vornahm, nicht der Schlüssel zur Verfügung stand, der die einzelnen Versuchsreihen mit der bei ihnen angewandten Zahnbürste in Zusammenhang bringt.

#### **4.6 Statistische Analyse**

Für die durch das Differenzbildverfahren ermittelten Defekttiefen (1-%-Quantil und 5-%-Quantil für die größten Defekttiefen einerseits sowie 50-%-Quantil = Median und der Mittelwert für die mittleren Defekttiefen andererseits) wurden aus der zehnfachen Ausführung der Putzsimulation mit den acht verschiedenen Bürsten-/Bürstenköpfen zunächst Mittelwerte und Standardabweichungen bestimmt. Die grafische Darstellung dieser Werte in Übersichtsform erfolgte in Balkendiagrammen mit Darstellung der Mittelwerte und der Standardabweichungen.

Um Unterschiede im Abrasionsverhalten der verschiedenen Bürsten-/Bürstenkopf-Kombinationen zu sichern oder zu verwerfen, wurden entsprechend der Probenzahl ( $n = 10$ ), bei der eine Normalverteilung der Werte nicht ohne weiteres angenommen werden durfte, nichtparametrische Testverfahren in zwei Stufen herangezogen [68]. In einer ersten Stufe wurde mittels einer nichtparametrischen Einweg-Varianzanalyse (nonparametric One-Way ANOVA) für Mehrfachvergleiche nach Kruskal-Wallis [41] getestet, ob signifikante Unterschiede zwischen verschiedenen Bürsten-/Bürstenkopf-Kombinationen bestehen. Soweit im Verfahren nach Kruskal-Wallis die Existenz von signifikanten Unterschieden nachweisbar war, wurden in einer zweiten Stufe mit dem ebenfalls nichtparametrischen Test für Mehrfach-Vergleiche (Multiple-Comparisons-Test) nach Dunn [14] festgestellt, bei welchen Bürsten-/Bürstenkopf-Kombinationen signifikante Unterschiede im Abrasionsverhalten bestehen.

Soweit eindeutige Probenpaare vorlagen (wie eine Bürste mit zwei verschiedenen Bürstenköpfen oder ein Bürstenkopf mit zwei verschiedenen Bürsten) wurde der ebenfalls nichtparametrische Mann-Whitney U-Test [46] herangezogen.

Bei allen Testverfahren wurde die erlaubte Wahrscheinlichkeit der Nullhypothese bzw. die Irrtumswahrscheinlichkeit auf  $p < 0,05$  festgelegt. Die signifikant unterschiedlichen Werte wurden mittels Box-Whisker-Diagrammen mit Darstellung der Mediane, der mittleren Quartile und der Extremwerte grafisch visualisiert.

Die Berechnungen der Testverfahren nach Kruskal-Wallis und Mann-Whitney wurden parallel mit Microsoft® Office Excel 2003 (Microsoft®, Redmond, USA) und InStat+ for Windows, Version 3.036 (Statistical Services Centre, The University of Reading, United Kingdom) durchgeführt. Die Berechnungen nach dem Mehrfachvergleichsverfahren nach Dunn erfolgten mit Microsoft® Office Excel 2003. Die Histogramme wurden direkt mit Microsoft® Office Excel 2003, die Box-Whisker-Diagramme mit dem Microsoft® Office Excel 2003 Add-In SSC-Stat, Version 2.12 (Statistical Services Centre, The University of Reading, United Kingdom) erstellt.

## 5 Ergebnisse

Die in Schmelz und Dentin nach Simulation einer Zahnpulverdauer von 5 Jahren entstandenen Abrasionsdefekte konnten mit Hilfe der Messungen mit dem Laserscanner Scan 3D und der anschließenden Bildverarbeitung mit der Software Match 3D in  $\mu\text{m}$  wiedergegeben werden. Zur Quantifizierung der größten Abrasionsdefekte dienten die 1-%- und 5-%-Quantile des Höhenverlustes im Differenzbild. Zur Quantifizierung der mittleren Defekttiefen wurden das 50-%-Quantil (Median) und der Mittelwert (arithmetisches Mittel) des Höhenverlustes im Differenzbild herangezogen.

Fasst man die Ergebnisse aller Proben aller untersuchten Bürsten zusammen ( $n = 80$ ), lagen die größten gemessenen Defekttiefen im Schmelz bei 29 bis 45  $\mu\text{m}$  und im Dentin bei 210 bis 274  $\mu\text{m}$ ; die mittleren Abrasionsdefekte betragen 2 bis 4  $\mu\text{m}$  im Schmelz und bei 42 bis 63  $\mu\text{m}$  im Dentin. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 4 zusammengefasst:

| Abrasion           | Alle Bürsten      |                   |
|--------------------|-------------------|-------------------|
|                    | Mittelwert        | Std.-Abw.         |
| <b>Schmelz</b>     |                   |                   |
| Abtrag 1-%-Quantil | 45 $\mu\text{m}$  | 20 $\mu\text{m}$  |
| Abtrag 5-%-Quantil | 29 $\mu\text{m}$  | 15 $\mu\text{m}$  |
| Abtrag Median      | 2 $\mu\text{m}$   | 9 $\mu\text{m}$   |
| Abtrag Mittelwert  | 4 $\mu\text{m}$   | 9 $\mu\text{m}$   |
| <b>Dentin</b>      |                   |                   |
| Abtrag 1-%-Quantil | 274 $\mu\text{m}$ | 139 $\mu\text{m}$ |
| Abtrag 5-%-Quantil | 210 $\mu\text{m}$ | 117 $\mu\text{m}$ |
| Abtrag Median      | 42 $\mu\text{m}$  | 33 $\mu\text{m}$  |
| Abtrag Mittelwert  | 63 $\mu\text{m}$  | 41 $\mu\text{m}$  |

**Tabelle 4:** Durchschnittliche Defekttiefen in Schmelz und Dentin

Berücksichtigt man alle Proben aller untersuchten Bürsten ( $n = 80$ ), liegt das Verhältnis der größten Defekttiefen im Schmelz zu den größten Defekttiefen im Dentin bei 14 bis 16 %. Bei Betrachtung der größten Defekttiefen ist also die

Abrasion im Dentin 6,3 bis 7,1-fach höher als im Schmelz. Das Verhältnis der mittleren Defekttiefen lag bei Schmelz/Dentin bei 5 bis 6 %. Bei Betrachtung der mittleren Defekttiefen ist also die Abrasion im Dentin 16,7 bis 20,0-fach höher als im Schmelz.

### 5.1 Abrasion bei verschiedenen Bürsten-/Bürstenkopf-Kombinationen

Eine Übersicht über die größten Abrasionstiefen (5%-Quantile der Match 3D-Differenzbilder) bei den verschiedenen Bürsten-/Bürstenkopf-Kombinationen im Schmelz zeigt die Abbildung 15 (1%-Quantile im Anhang, Abbildung 20).

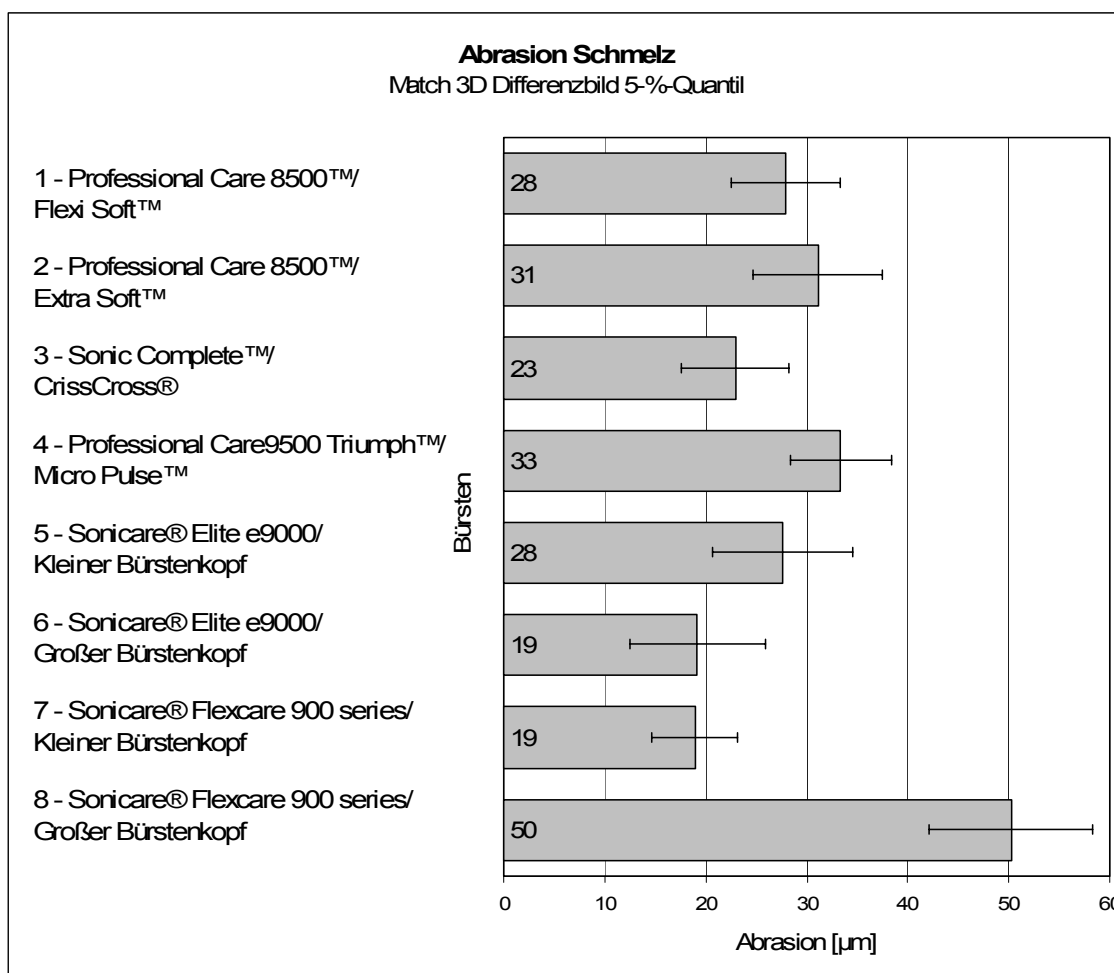
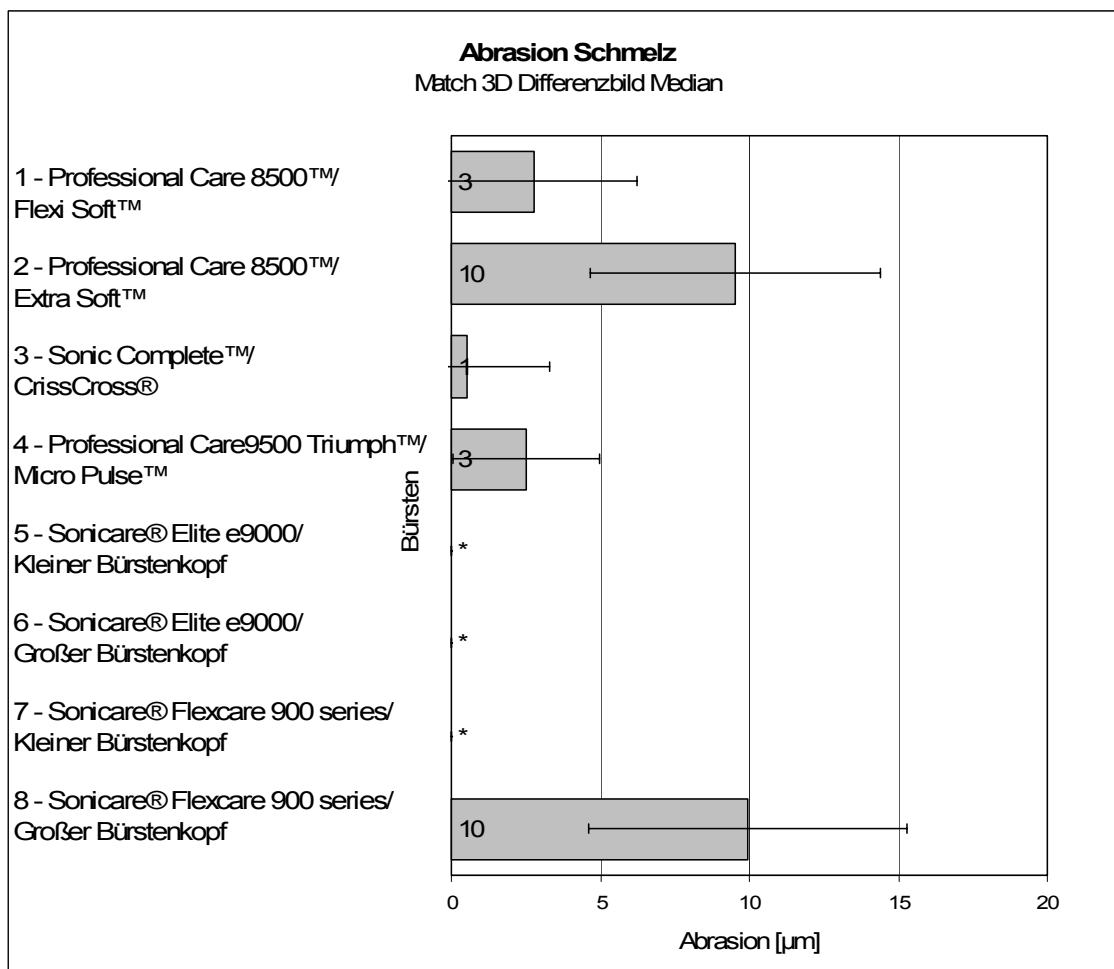


Abbildung 15: Größte Defekttiefen im Schmelz

Im Schmelzbereich weichen bei den größten Abrasionsdefekten die *Professional Care 9500 Triumph™/Micro Pulse™ Bürstenkopf* und *Sonicare® FlexCare 900 series/Großer Bürstenkopf* von den Mittelwerten von 45 bzw. 29 µm (s. Tabelle 4) deutlich nach unten im Sinne größerer Abrasionsdefekte ab, während die *Sonic Complete™/CrissCross® Bürstenkopf*, die *Sonicare® Elite e9000/Großer Bürstenkopf* und *Sonicare® FlexCare 900 series/Kleiner Bürstenkopf* Abweichungen nach oben zeigen.

Abbildung 16 gibt einen Überblick über die mittleren Abrasionstiefen (Mediane der Match 3D-Differenzbilder) bei den verschiedenen Bürsten-/Bürstenkopf-Kombinationen im Schmelz (Mittelwerte im Anhang, Abbildung 21).

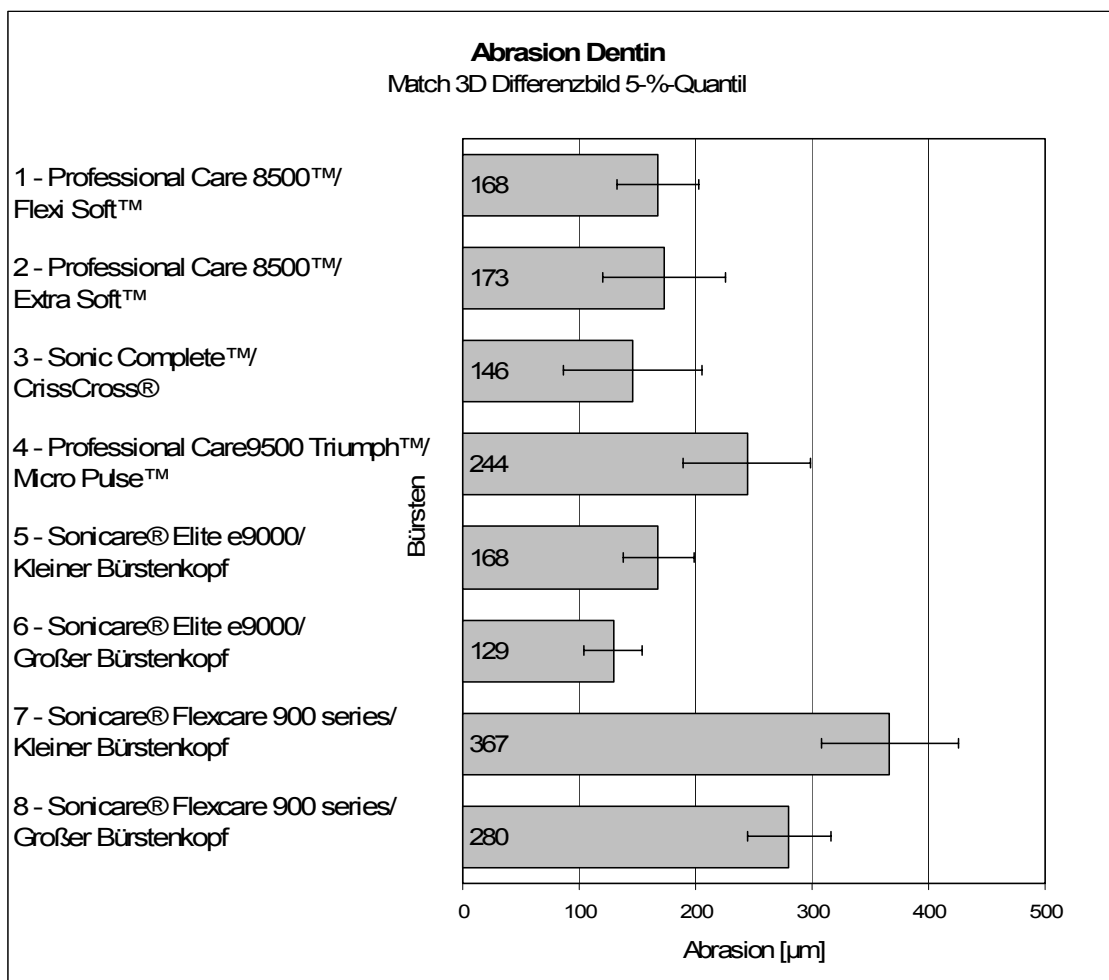


**Abbildung 16:** Mittlere Defekttiefen im Schmelz (\*Messgenauigkeit des Scan-3D-Verfahrens beträgt 10 µm; negative Werte wurden als Artefakte ausgeschlossen)



Bei den mittleren Abrasionsdefekten weichen die *Professional Care 8500™/Extra Soft™* und *Sonicare® Flexcare 900 series/Großer Bürstenkopf* von den Mittelwerten von 2 bzw. 4  $\mu\text{m}$  nach unten ab, während bei den Bürsten *Sonic Complete™/CrissCross®*, *Sonicare® Elite e9000/Kleiner Bürstenkopf*, *Sonicare® Elite e9000/Großer Bürstenkopf* und *Sonicare® Flexcare 900 series/Kleiner Bürstenkopf* unterdurchschnittliche Abrasionsdefekte auftreten. Bei den Bürsten *Sonicare® Elite e9000/Kleiner Bürstenkopf* (nur Median des Match-3D-Differenzbildes), *Sonicare® Elite e9000/Großer Bürstenkopf* und *Sonicare® Flexcare 900 series/Kleiner Bürstenkopf* zeigen sich sogar negative Werte, die allerdings im Rahmen der beschriebenen Genauigkeit von 10  $\mu\text{m}$  des Scan-3D-Messverfahrens bei erneuter Positionierung der Proben liegen [53]. Somit ist dieser vermeintliche „Materialzuwachs“ als Artefakt zu bewerten.

Eine Übersicht der größten Abrasionstiefen (5%-Quantile der Match-3D-Differenzbilder) bei den verschiedenen Bürsten-/Bürstenkopf-Kombinationen im Dentin zeigt die Abbildung 17 (1%-Quantile im Anhang, Abbildung 22).

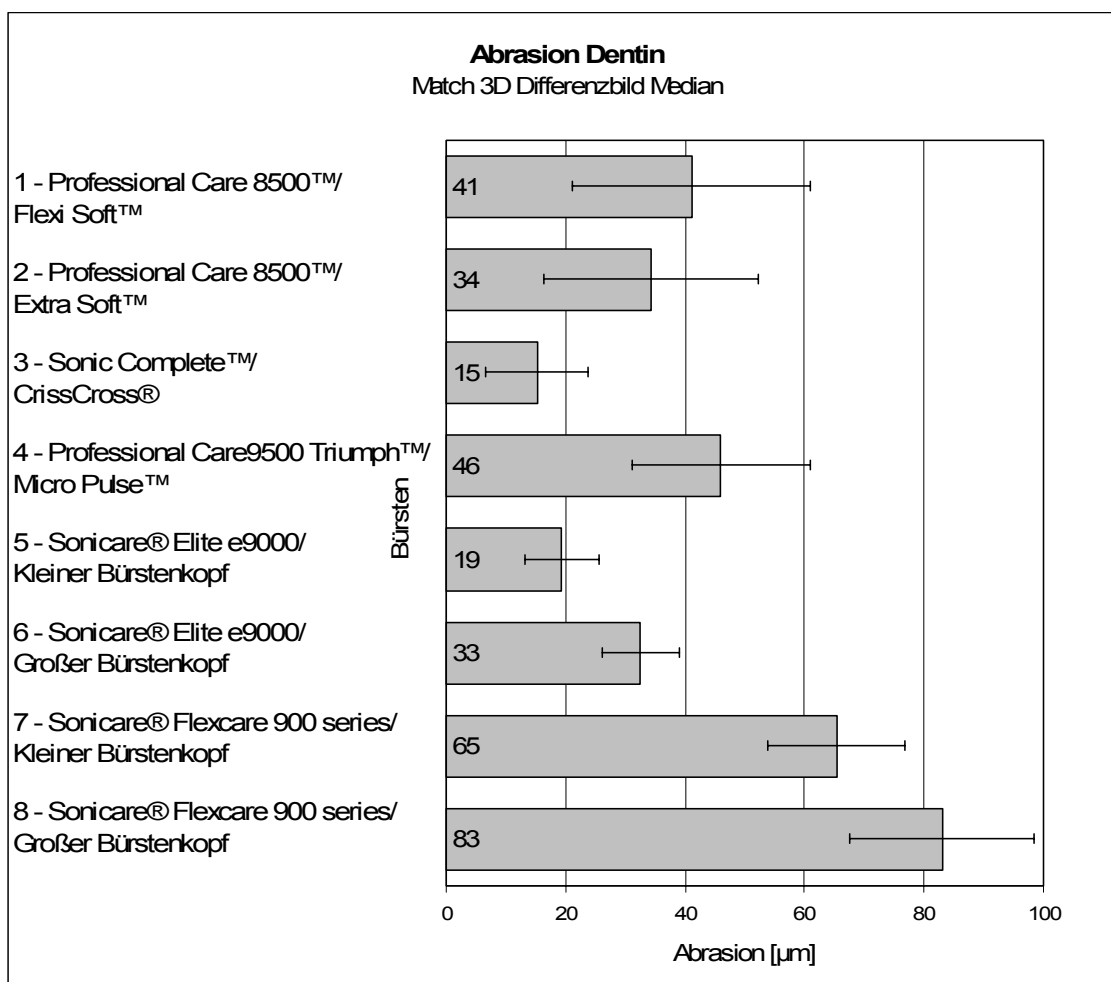


**Abbildung 17:** Größte Defekttiefen im Dentin

Die Ergebnisse im Dentinbereich sind den Ergebnissen im Schmelzbereich teilweise ähnlich; es ergeben sich aber auch Unterschiede. Insgesamt sind die Unterschiede zwischen einzelnen Bürsten-/Bürstenkopf-Kombinationen zu den Mittelwerten aller getesteten Bürsten aber deutlicher zu erkennen. Bei den größten Abrasionsdefekten weichen die Bürste *Professional Care 9500 Triumph™/Micro Pulse™* und noch deutlicher die Bürsten *Sonicare® Flexcare 900 series/Kleiner Bürstenkopf* und *Sonicare® Flexcare 900 series/Großer Bürstenkopf* von dem durchschnittlichen Abrasionswert der untersuchten Bürsten (s. Tabelle 4)

nach unten im Sinne höherer Abrasionsdefekte ab, während die Bürsten *Professional Care 8500™/Flexi Soft™*, *Professional Care 8500™/Extra Soft™*, *Sonic Complete™/CrissCross®*, *Sonicare® Elite e9000/Kleiner Bürstenkopf* und *Sonicare® Elite e9000/Großer Bürstenkopf* Abweichungen nach oben im Sinne geringerer Abrasionsdefekte zeigen.

Eine Übersicht der mittleren Abrasionstiefen (Mediane) bei den verschiedenen Bürsten-/Bürstenkopf-Kombinationen im Dentin zeigt die Abbildung 18 (Mittelwerte im Anhang, Abbildung 23).



**Abbildung 18:** Mittlere Defekttiefen im Dentin

Bei den mittleren Abrasionsdefekten ist das gleiche Muster zu erkennen: die *Professional Care 9500 Triumph™/Micro Pulse™* zeigt höhere, die Bürsten *Sonica-*

re® Flexcare 900 series/Kleiner Bürstenkopf und Sonicare® Flexcare 900 series/Großer Bürstenkopf deutlich höhere Abrasions-Defekte im Vergleich zu den durchschnittlichen Abrasionswerten der untersuchten Bürsten (s. Tabelle 4), während die Bürsten Professional Care 8500™/Flexi Soft™, Professional Care 8500™/Extra Soft™, Sonic Complete™/CrissCross®, Sonicare® Elite e9000/Kleiner Bürstenkopf und Sonicare® Elite e9000/Großer Bürstenkopf unterdurchschnittliche Abrasionseffekte erkennen lassen.

Die erste Stufe der statistischen Auswertung (mit dem nonparametric One-Way ANOVA nach Kruskal-Wallis) zeigte, dass signifikante Unterschiede im Abrasionsverhalten zwischen verschiedenen Bürsten-/Bürstenkopf-Kombinationen bei Schmelz und Dentin sowohl bei den höchsten Defekttiefen (1-% und 5-%-Quantile) als auch bei den mittleren Defekttiefen (Mediane und Mittelwerte) vorhanden sind. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 5 zusammengefasst. Dabei ist H der errechnete Kennwert und p die zugehörige Überschreitungswahrscheinlichkeit (Wahrscheinlichkeit der Nullhypothese). Das zugehörige Signifikanzniveau  $\alpha$  ergibt sich aus  $\alpha = 1 - p$ .

|         |             | H     | p     |
|---------|-------------|-------|-------|
| Schmelz | 1-%-Quantil | 23,09 | 0,16% |
|         | 5-%-Quantil | 29,02 | 0,01% |
|         | Median      | 22,13 | 0,24% |
|         | Mittelwert  | 24,09 | 0,11% |
| Dentin  | 1-%-Quantil | 30,10 | 0,01% |
|         | 5-%-Quantil | 32,77 | 0,00% |
|         | Median      | 34,47 | 0,00% |
|         | Mittelwert  | 37,79 | 0,00% |

**Tabelle 5:** Unterschiedliches Abrasionsverhalten in Schmelz und Dentin  
Signifikante Kennwerte ( $p < 0,05$ ) markiert

Damit konnte in der ersten Stufe der statistischen Auswertung (mit dem Nonparametric One-Way ANOVA nach Kruskal-Wallis) bewiesen werden, dass bei den höchsten wie bei den mittleren Abrasionsdefekten im Schmelz- und Dentinbereich signifikante Unterschiede zwischen verschiedenen Bürsten-/Bürstenkopf-Kombinationen bestehen.

Die zweite Stufe der statistischen Auswertung mit einem Test für Vielfach-Vergleiche (Nonparametric-Multiple-Comparisons-Test nach Dunn) zeigte dann in Kreuztabellen, welche Bürsten-/Bürstenkopf-Kombinationen signifikante Unterschiede aufweisen. Werte größer 1 im Multiple-Comparisons-Test entsprechen dabei einer Wahrscheinlichkeit der Nullhypothese bzw. einer Irrtumswahrscheinlichkeit von unter 5 %.

Die Ergebnisse des Nonparametric-Multiple-Comparisons-Test nach Dunn für die größten Abrasionswerte im Schmelz (5%-Quantile) sind in der Tabelle 6 zusammengefasst (1%-Quantile im Anhang, Tabelle 14).

**Kennwerte Multiple-Comparisons-Test nach Dunn, Schmelz, 5%-Quantil**

| Bürste   | Nr. | 1 | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    |
|--|-----|---|------|------|------|------|------|------|------|
| <i>Professional Care 8500™/Flexi Soft™</i>               | 1   |   | 0,17 | 0,29 | 0,26 | 0,06 | 0,55 | 0,51 | 0,82 |
| <i>Professional Care 8500™/Extra Soft™</i>               | 2   |   |      | 0,47 | 0,09 | 0,24 | 0,74 | 0,70 | 0,66 |
| <i>Sonic Complete™/CrissCross®</i>                       | 3   |   |      |      | 0,56 | 0,23 | 0,27 | 0,22 | 1,13 |
| <i>Professional Care 9500 Triumph™/Micro Pulse™</i>      | 4   |   |      |      |      | 0,33 | 0,83 | 0,79 | 0,57 |
| <i>Sonicare® Elite e9000/Kleiner Bürstenkopf</i>         | 5   |   |      |      |      |      | 0,50 | 0,46 | 0,90 |
| <i>Sonicare® Elite e9000/Großer Bürstenkopf</i>          | 6   |   |      |      |      |      |      | 0,05 | 1,41 |
| <i>Sonicare® Flexcare 900 series/Kleiner Bürstenkopf</i> | 7   |   |      |      |      |      |      |      | 1,36 |
| <i>Sonicare® Flexcare 900 series/Großer Bürstenkopf</i>  | 8   |   |      |      |      |      |      |      |      |

**Tabelle 6:** Größte Abrasionsdefekte im Schmelz  
Signifikante Kennwerte ( $p < 0,05$ ) markiert

Bei den größten Abrasionsdefekten im Schmelz (5%-Quantile des Match-3D-Differenzbildes) zeigt die *Sonicare® Flexcare 900 series/Großer Bürstenkopf* eine

signifikant größere Abrasion als die *Sonic Complete™/CrissCross®*, *Sonicare® Elite e9000/Großer Bürstenkopf* und *Sonicare® Flexcare 900 series/Kleiner Bürstenkopf*. Die *Professional Care 9500 Triumph™/Micro Pulse™* weist bei Betrachtung der Balken-Diagramme ebenfalls eine deutlich höhere Abrasion als die oben genannten Bürsten auf, wobei jedoch das geforderte Signifikanzniveau nicht erreicht wird.

Die Ergebnisse des Nonparametric-Multiple-Comparisons-Test nach Dunn für die mittleren Abrasionswerte im Schmelz (Mediane) sind in der Tabelle 7 zusammengefasst (Mittelwerte im Anhang, Tabelle 15).

**Kennwerte Multiple-Comparisons-Test nach Dunn, Schmelz, Median**

| Bürste   | Nr. | 1 | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    |
|--|-----|---|------|------|------|------|------|------|------|
| <i>Professional Care 8500™/Flexi Soft™</i>               | 1   |   | 0,48 | 0,15 | 0,05 | 0,30 | 0,44 | 0,63 | 0,42 |
| <i>Professional Care 8500™/Extra Soft™</i>               | 2   |   |      | 0,65 | 0,45 | 0,80 | 0,95 | 1,14 | 0,06 |
| <i>Sonic Complete™/CrissCross®</i>                       | 3   |   |      |      | 0,20 | 0,15 | 0,30 | 0,50 | 0,59 |
| <i>Professional Care 9500 Triumph™/Micro Pulse™</i>      | 4   |   |      |      |      | 0,35 | 0,50 | 0,70 | 0,39 |
| <i>Sonicare® Elite e9000/Kleiner Bürstenkopf</i>         | 5   |   |      |      |      |      | 0,15 | 0,34 | 0,74 |
| <i>Sonicare® Elite e9000/Großer Bürstenkopf</i>          | 6   |   |      |      |      |      |      | 0,19 | 0,89 |
| <i>Sonicare® Flexcare 900 series/Kleiner Bürstenkopf</i> | 7   |   |      |      |      |      |      |      | 1,08 |
| <i>Sonicare® Flexcare 900 series/Großer Bürstenkopf</i>  | 8   |   |      |      |      |      |      |      |      |

**Tabelle 7:** Mittlere Abrasionsdefekte im Schmelz  
Signifikante Kennwerte ( $p < 0,05$ ) markiert

Bei den mittleren Abrasionsdefekten (Medianwerte des Match-3D-Differenzbildes) weisen die *Professional Care 8500™/Extra Soft™* und *Sonicare®*

*Flexcare 900 series/Großer Bürstenkopf* eine signifikant höhere Abrasion als die *Sonicare® Flexcare 900 series/Kleiner Bürstenkopf* auf. Bei Heranziehung der Mittelwerte des Match-3D-Differenzbildes zeigt die *Sonicare® Flexcare 900 series/Großer Bürstenkopf* zusätzlich noch eine signifikant höhere Abrasion als die *Sonicare® Elite e9000/Großer Bürstenkopf*. Die – bei Betrachtung der Säulen-Diagramme – noch erkennbare größere Abrasion der *Professional Care 8500™/Extra Soft™* und *Sonicare® Flexcare 900 series/Großer Bürstenkopf* gegenüber der *Sonic Complete™/CrissCross®* und der *Sonicare® Elite e9000/Kleiner Bürstenkopf* ist hingegen nicht signifikant.

Die Ergebnisse des Nonparametric-Multiple-Comparisons-Test nach Dunn für die größten Abrasionswerte im Dentin (5-%-Quantile) sind der Tabelle 8 zu entnehmen (1-%-Quantile im Anhang, Tabelle 16).

**Kennwerte Multiple-Comparisons-Test nach Dunn, Dentin, 5-%-Quantil**

| Bürste   | Nr. | 1 | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    |
|--|-----|---|------|------|------|------|------|------|------|
| <i>Professional Care 8500™/Flexi Soft™</i>               | 1   |   | 0,00 | 0,25 | 0,43 | 0,04 | 0,34 | 1,01 | 0,71 |
| <i>Professional Care 8500™/Extra Soft™</i>               | 2   |   |      | 0,26 | 0,44 | 0,05 | 0,35 | 1,03 | 0,72 |
| <i>Sonic Complete™/CrissCross®</i>                       | 3   |   |      |      | 0,70 | 0,21 | 0,09 | 1,29 | 0,99 |
| <i>Professional Care 9500 Triumph™/Micro Pulse™</i>      | 4   |   |      |      |      | 0,49 | 0,80 | 0,59 | 0,28 |
| <i>Sonicare® Elite e9000/Kleiner Bürstenkopf</i>         | 5   |   |      |      |      |      | 0,30 | 1,08 | 0,77 |
| <i>Sonicare® Elite e9000/Großer Bürstenkopf</i>          | 6   |   |      |      |      |      |      | 1,38 | 1,08 |
| <i>Sonicare® Flexcare 900 series/Kleiner Bürstenkopf</i> | 7   |   |      |      |      |      |      |      | 0,31 |
| <i>Sonicare® Flexcare 900 series/Großer Bürstenkopf</i>  | 8   |   |      |      |      |      |      |      |      |

**Tabelle 8:** Größte Abrasionsdefekte im Dentin  
Signifikante Kennwerte ( $p < 0,05$ ) markiert

Bei den größten Abrasionsdefekten im Dentin zeigt die *Sonicare® Flexcare 900 series/Kleiner Bürstenkopf* eine signifikant höhere Abrasion als die *Professional Care 8500™/Flexi Soft™*, *Professional Care 8500™/Extra Soft™*, *Sonic Complete™/CrissCross®*, *Sonicare® Elite e9000/Kleiner Bürstenkopf* und *Sonicare® Elite e9000/Großer Bürstenkopf*; bei Heranziehung der 5-%-Quantile weist zusätzlich die *Sonicare® Flexcare 900 series/Großer Bürstenkopf* eine stärkere Abrasion als die *Sonicare® Elite e9000/Großer Bürstenkopf* auf.

Die Ergebnisse des Nonparametric-Multiple-Comparisons-Test nach Dunn für die mittleren Abrasionswerte im Dentin (Mediane) sind der Tabelle 9 zu entnehmen (Mittelwerte im Anhang, Tabelle 17).

**Kennwerte Multiple-Comparisons-Test nach Dunn, Dentin, Median**

| Bürste   | Nr. | 1 | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    |
|--|-----|---|------|------|------|------|------|------|------|
| <i>Professional Care 8500™/Flexi Soft™</i>               | 1   |   | 0,06 | 0,54 | 0,23 | 0,43 | 0,04 | 0,66 | 0,87 |
| <i>Professional Care 8500™/Extra Soft™</i>               | 2   |   |      | 0,49 | 0,30 | 0,37 | 0,02 | 0,75 | 0,96 |
| <i>Sonic Complete™/CrissCross®</i>                       | 3   |   |      |      | 0,79 | 0,11 | 0,51 | 1,23 | 1,45 |
| <i>Professional Care 9500 Triumph™/Micro Pulse™</i>      | 4   |   |      |      |      | 0,68 | 0,28 | 0,44 | 0,66 |
| <i>Sonicare® Elite e9000/Kleiner Bürstenkopf</i>         | 5   |   |      |      |      |      | 0,40 | 1,12 | 1,34 |
| <i>Sonicare® Elite e9000/Großer Bürstenkopf</i>          | 6   |   |      |      |      |      |      | 0,72 | 0,94 |
| <i>Sonicare® Flexcare 900 series/Kleiner Bürstenkopf</i> | 7   |   |      |      |      |      |      |      | 0,22 |
| <i>Sonicare® Flexcare 900 series/Großer Bürstenkopf</i>  | 8   |   |      |      |      |      |      |      |      |

**Tabelle 9:** Mittlere Abrasionsdefekte im Dentin  
Signifikante Kennwerte ( $p < 0,05$ ) markiert



Bei den mittleren Abrasionsdefekten (Medianwerte der Match-3D-Differenzbilder) weisen die *Sonicare® Flexcare 900 series/Kleiner Bürstenkopf* und die *Sonicare® Flexcare 900 series/Großer Bürstenkopf* eine signifikant höhere Abrasion als die *Sonic Complete™/CrissCross®* und die *Sonicare® Elite e9000/Kleiner Bürstenkopf* auf; bei Betrachtung der Mittelwerte der Match-3D-Differenzbilder zeigen die *Sonicare® Flexcare 900 series/Kleiner Bürstenkopf* und die *Sonicare® Flexcare 900 series/Großer Bürstenkopf* zusätzlich eine signifikante höhere Abrasion als die *Sonicare® Elite e9000/Großer Bürstenkopf*.

## 5.2 Abrasion bei Bürsten mit unterschiedlichen Antriebskonzepten

*Professional Care 8500™* und *Professional Care 9500 Triumph™* arbeiten mit einem rotierend-oszillierenden Antrieb, die Bürsten *Sonic Complete™*, *Sonicare® Elite e9000* und *Sonicare® Flexcare 900 series* hingegen mit Schall als Funktionsprinzip.

Bei Betrachtung der größten und mittleren Abrasionstiefen in Schmelz und Dentin (Abbildungen 15 bis 18 sowie 20 bis 23 im Anhang) lässt die schallgetriebene *Sonic Complete™* keinen deutlichen Unterschied zu den rotierend-oszillierenden Bürsten *Professional Care 8500™* und *Professional Care 9500 Triumph™* erkennen. Entsprechend sind auch in der statistischen Prüfung mit dem Nonparametric-Multiple-Comparisons-Test nach Dunn keine signifikanten Unterschiede zwischen diesen Bürsten nachweisbar (Tabellen 6 bis 9 sowie 14 bis 17 im Anhang).

Für die schallgetriebene *Sonicare® Elite e9000* ergibt sich ein ähnliches Bild: beim Vergleich der Abrasionstiefen (Abbildungen 15 bis 18 sowie 20 bis 23 im Anhang) sind nur geringe Unterschiede zu den rotierend-oszillierenden Bürsten *Professional Care 8500™* und *Professional Care 9500 Triumph™* zu erkennen. Die statistische Prüfung mit dem Nonparametric-Multiple-Comparisons-Test nach Dunn weist keine signifikanten Unterschiede zwischen diesen Bürsten nach (Tabellen 6 bis 9 sowie 14 bis 17 im Anhang).

Ein anderes Ergebnis zeigt hingegen die schallgetriebene *Sonicare® Flexcare 900 series* mit kleinem und großem Bürstenkopf bereits beim Vergleich der Abrasionstiefen in den Balkendiagrammen (Abbildungen 15 bis 18 sowie 20 bis 23 im Anhang).

Bei den größten und den mittleren Abrasionsdefekten im Schmelz weist nur die *Sonicare® Flexcare 900 series/Großer Bürstenkopf* ein etwas stärkeres Abrasionsverhalten als die *Professional Care 8500™* und die *Professional Care 9500 Triumph™* auf; die *Sonicare® Flexcare 900 series/Kleiner Bürstenkopf* hat bei den größten und bei den mittleren Abrasionsdefekten deutlich unterdurchschnittliche Abrasionswerte. Entsprechende Resultate zeigen die Signifikanztabellen nach dem Nonparametric-Multiple-Comparisons-Test nach Dunn: bei den größten Defekttiefen sind im Schmelz zwar keine signifikanten Unterschiede zwischen schallgetriebenen und rotierend-oszillierenden Bürsten nachzuweisen; bei den mittleren Defekttiefen im Schmelz werden aber signifikant höhere Abrasionsdefekte durch die rotierend-oszillierende *Professional Care 8500™/Extra Soft™* als durch die schallgetriebene *Sonicare® Flexcare 900 series/Kleiner Bürstenkopf* nachgewiesen. Diese Ergebnisse werden in den Box-Whisker-Diagrammen der Abbildungen 25 und 26 im Anhang deutlich.

Im Dentin sind in den Balken-Diagrammen (Abbildungen 15 bis 18 sowie im Anhang 20 bis 23) für die schallgetriebene *Sonicare® Flexcare 900 series* deutlich höhere Abrasionsdefekte als bei der rotierend-oszillierenden *Professional Care 8500™* zu beobachten; höhere Abrasionsdefekte der *Sonicare® Flexcare 900 series* im Vergleich zur rotierend-oszillierenden *Professional Care 9500 Triumph™* sind hier ebenfalls zu erkennen, aber geringer ausgeprägt.

Im Dentin sind die größten Defekttiefen durch die *Sonicare® Flexcare 900 series/Kleiner Bürstenkopf* signifikant höher als bei der rotierend-oszillierenden *Professional Care 8500™* (Abbildungen 27 bis 30 im Anhang). Für die im Vergleich zur rotierend-oszillierenden *Professional Care 9500 Triumph™* höhere Abrasion ist

hingegen keine Signifikanz nachweisbar. Bei den mittleren Defekttiefen ergeben sich auch keine signifikanten Unterschiede zu der *Professional Care 8500™*.

### 5.3 Abrasion bei Bürsten mit unterschiedlichen Bürstenköpfen

Die Effekte unterschiedlicher Bürstenköpfe auf das Abrasionsverhalten können bei den baugleichen rotierend-oszillierenden Bürsten 1 und 2 (*Professional Care 8500™*) für normale (*Flexi Soft™*) und besonders weiche Bürstenköpfe (*Extra Soft™*) beobachtet werden. Bei den schallgetriebenen baugleichen Bürsten 5 und 6 (*Sonicare® Elite e9000*) sowie 7 und 8 (*Sonicare® Flexcare 900 series*) können die Effekte kleiner und großer Bürstenköpfe gezeigt werden. Die Ergebnisse des Mann-Whitney U-Test sind in der Tabelle 10 zusammengefasst. Dabei ist U der errechnete Kennwert und p die zugehörige Überschreitungswahrscheinlichkeit; das zugehörige Signifikanzniveau  $\alpha$  errechnet sich aus  $\alpha = 1 - p$ .

| Mann-Whitney U-Test |             | Bürsten | 1 - Professional Care 8500™/Flexi Soft™ |    | 5 - Sonicare® Elite e9000/Kleiner Bürstenkopf |    | 7 - Sonicare® Flexcare 900 series/Kleiner Bürstenkopf |   |
|---------------------|-------------|---------|---|----|---|----|---|---|
|                     |             |         | 2 - Professional Care 8500™/Extra Soft™ |    | 6 - Sonicare® Elite e9000/Großer Bürstenkopf  |    | 8 - Sonicare® Flexcare 900 series/Großer Bürstenkopf  |   |
|                     |             |         | U                                       | p  | U   | p  | U   | p |
| Schmelz             | 1-%-Quantil | 45      | 0,4837                                  | 37 | 0,1629  | 3  | 0,0002  |   |
|                     | 5-%-Quantil | 35      | 0,1952                                  | 32 | 0,0868  | 1  | 0,0001  |   |
|                     | Median      | 25      | 0,0557                                  | 44 | 0,3115  | 11 | 0,0016  |   |
|                     | Mittelwert  | 26      | 0,0604                                  | 46 | 0,3956  | 7  | 0,0008  |   |
| Dentin              | 1-%-Quantil | 43      | 0,4351                                  | 30 | 0,0606  | 16 | 0,0051  |   |
|                     | 5-%-Quantil | 44      | 0,4675                                  | 28 | 0,0482  | 26 | 0,0320  |   |
|                     | Median      | 43      | 0,4351                                  | 21 | 0,0141  | 7  | 0,0006  |   |
|                     | Mittelwert  | 44      | 0,4837                                  | 37 | 0,1629  | 46 | 0,3812  |   |

**Tabelle 10:** Abrasionsdefekte in Schmelz und Dentin  
Signifikante Kennwerte (p < 0,05) markiert

Für die normalen und besonders weichen Bürstenköpfe zeigt der Vergleich der Abrasionstiefen in Schmelz und Dentin in den Balkendiagrammen (Abbildungen

15 bis 18 sowie 20 bis 23 im Anhang) nur geringfügige Unterschiede. Entsprechend erreichte die Signifikanzprüfung mit dem Mann-Whitney U-Test in keinem Falle das geforderte Signifikanzniveau.

Dagegen weisen die kleinen und großen Bürstenköpfe beim Vergleich der Abrasionstiefen in Schmelz und Dentin bei gleichem Antriebskonzept, aber unterschiedlicher Bauart der Bürsten – siehe Balken-Diagramme – teilweise deutliche Unterschiede auf (Abbildungen 15 bis 18 sowie 20 bis 23 im Anhang).

Die Abrasionswerte der *Sonicare® Elite e9000* sind im Vergleich des kleinen Bürstenkopfes zum großen Bürstenkopf im Schmelz etwas, jedoch nicht signifikant erhöht.

Im Dentin ist der Substanzverlust durch den kleinen Bürstenkopf nur teilweise größer. Die größten Defekttiefen weisen unter Heranziehung des 1%-Quantils des Match-3D-Differenzbildes keinen signifikanten Unterschied auf, unter Heranziehung des 5%-Quantils (Abbildung 31, im Anhang) erreicht der stärkere Abrasionsgrad des kleinen Bürstenkopfes das Signifikanzniveau ( $p = 0,0482$ ).

Betrachtet man die mittleren Abrasionswerte unter Heranziehung des 50%-Quantils (Abbildung 32, im Anhang) ist hingegen die Abrasion des großen Bürstenkopfes signifikant höher ( $p = 0,0141$ ); wird der Mittelwert hinzugezogen, ist der Unterschied aber nicht signifikant.

Die *Sonicare® Flexcare 900 series* weist in Kombination mit dem großen Bürstenkopf (im Gegensatz zur *Sonicare® Elite e9000*) im Schmelz höhere Abrasionswerte als mit dem kleinen Bürstenkopf auf. Bei den größten Defekttiefen (Abbildungen 33 und 34, im Anhang) sind die Unterschiede bei den 1%- und 5%-Quantilen signifikant ( $p = 0,0002$  und  $p = 0,0001$ ).

Auch die mittleren Defekttiefen (Abbildungen 35 und 36, im Anhang) beim großen Bürstenkopf zeigen eine stärkere Abrasion als bei dem kleinen Bürsten-

kopf; die Werte erreichen das festgelegte Signifikanzniveau ( $p = 0,0016$  und  $p = 0,0008$ ), wenn 50%-Quantil und Mittelwert herangezogen werden. Allerdings findet sich beim kleinen Bürstenkopf durchweg ein artifizieller „Substanzzuwachs“.

Im Dentin sind die Werte wie bei der *Sonicare® Elite e9000* uneinheitlich. Im Fall der größten Defekttiefen (Abbildungen 37 und 38, im Anhang) verursacht der kleine Bürstenkopf in Kombination mit der *Sonicare® Flexcare 900 series* höhere Abrasionswerte als der große Bürstenkopf. Die Unterschiede sind bei 1%- und 5%-Quantil signifikant ( $p = 0,0051$  und  $p = 0,0320$ ).

Die Ergebnisse der mittleren Defekttiefen im Dentin sind inhomogen. Im Hinblick auf das 50%-Quantil sind die Abrasionswerte des großen Bürstenkopfes größer als die des kleinen Bürstenkopfes (Abbildung 39, im Anhang); der Unterschied ist signifikant ( $p = 0,0006$ ). Betrachtet man den Mittelwert des Differenzbilds zeigt hingegen der kleine Bürstenkopf eine leicht stärkere Abrasion, die aber nicht das festgelegte Signifikanzniveau erreicht.

#### **5.4 Abrasion bei Bürsten unterschiedlicher Konstruktionsausführung**

Die Effekte unterschiedlicher Konstruktionsausführung bei gleichem Antriebskonzept und gleichem Bürstenkopf lassen sich im Fall der schallgetriebenen Bürsten 5 und 7 (*Sonicare® Elite e9000* und *Sonicare® Flexcare 900 series* mit kleinem Bürstenkopf) und denselben Bürsten 6 und 8 mit großem Bürstenkopf beobachten. Die Ergebnisse des Mann-Whitney U-Tests fasst Tabelle 11 zusammen.

| Mann-Whitney U-Test |             | Bürsten                                       |        |  |        |
|---------------------|-------------|---|--------|--|--------|
|                     |             | 5 - Sonicare® Elite e9000/Kleiner Bürstenkopf |        | 6 - Sonicare® Elite e9000/Großer Bürstenkopf |        |
|                     |             | U   | p      | U  | p      |
| Schmelz             | 1-%-Quantil | 24  | 0,0320 | 18   | 0,0078 |
|                     | 5-%-Quantil | 34  | 0,1061 | 7  | 0,0006 |
|                     | Median      | 37  | 0,1629 | 13   | 0,0020 |
|                     | Mittelwert  | 38  | 0,1628 | 5  | 0,0004 |
| Dentin              | 1-%-Quantil | 5   | 0,0003 | 8  | 0,0009 |
|                     | 5-%-Quantil | 2   | 0,0001 | 3  | 0,0002 |
|                     | Median      | 1   | 0,0001 | 3  | 0,0002 |
|                     | Mittelwert  | 0   | 0,0001 | 0  | 0,0001 |

**Tabelle 11:** Unterschiedliche Abrasionsdefekte in Schmelz und Dentin  
Signifikante Kennwerte ( $p < 0,05$ ) markiert

Mit kleinem Bürstenkopf zeigt die *Sonicare® Elite e9000* im Schmelz bei den größten Defekttiefen höhere Werte als die *Sonicare® Flexcare 900 series* (Abbildung 40 im Anhang); diese Unterschiede werden jedoch nur im Fall des 1-%-Quantils signifikant ( $p = 0,0320$ ). Bei den mittleren Defekttiefen sind keine signifikanten Unterschiede nachweisbar.

Im Dentin weist hingegen die *Sonicare® Flexcare 900 series* mit kleinem Bürstenkopf bei den größten Defekttiefen (Abbildungen 41 und 42, im Anhang) deutlich höhere Werte als die *Sonicare® Elite e9000* auf. Die Unterschiede sind signifikant ( $p = 0,0003$  und  $p = 0,0001$ ), wenn die 1-% und die 5-%-Quantile betrachtet werden.

Auch bei den mittleren Defekttiefen im Dentin (Abbildungen 43 und 44, im Anhang) sind die Abrasionswerte der *Sonicare® Flexcare 900 series* deutlich höher als die Werte der *Sonicare® Elite e9000*. Die Unterschiede sind hier bei Heran-

ziehung des 50-%-Quantils und des Mittelwertes signifikant ( $p = 0,0001$  und  $p = 0,0001$ ).

Mit großem Bürstenkopf zeigt die *Sonicare® Flexcare 900 series* im Schmelz – anders als bei Bestückung mit dem kleinem Bürstenkopf – bei den größten Defekttiefen (Abbildungen 45 und 46, im Anhang) höhere Werte als die *Sonicare® Elite e9000*, diese Unterschiede sind beim 1-% und beim 5-%-Quantil signifikant ( $p = 0,0078$  und  $p = 0,0006$ ).

Auch bei den mittleren Defekttiefen (Abbildungen 47 und 48, im Anhang) verursacht die *Sonicare® Flexcare 900 series* mit großem Bürstenkopf im Schmelz eine höhere Abrasion als die *Sonicare® Elite e9000*, auch diese Unterschiede sind bei Heranziehung des Medians und des Mittelwertes signifikant ( $p = 0,0020$  und  $p = 0,0004$ ).

Im Dentin sind die Ergebnisse beider Bürstentypen mit großem Bürstenkopf ähnlich wie mit kleinem Bürstenkopf: bei den größten Defekttiefen (Abbildungen 49 und 50, im Anhang) zeigt die *Sonicare® Flexcare 900 series* eine deutliche und im Fall des 1-% und 5-%-Quantils signifikant stärkere Abrasion als die *Sonicare® Elite e9000* ( $p = 0,0009$  und  $p = 0,0002$ ).

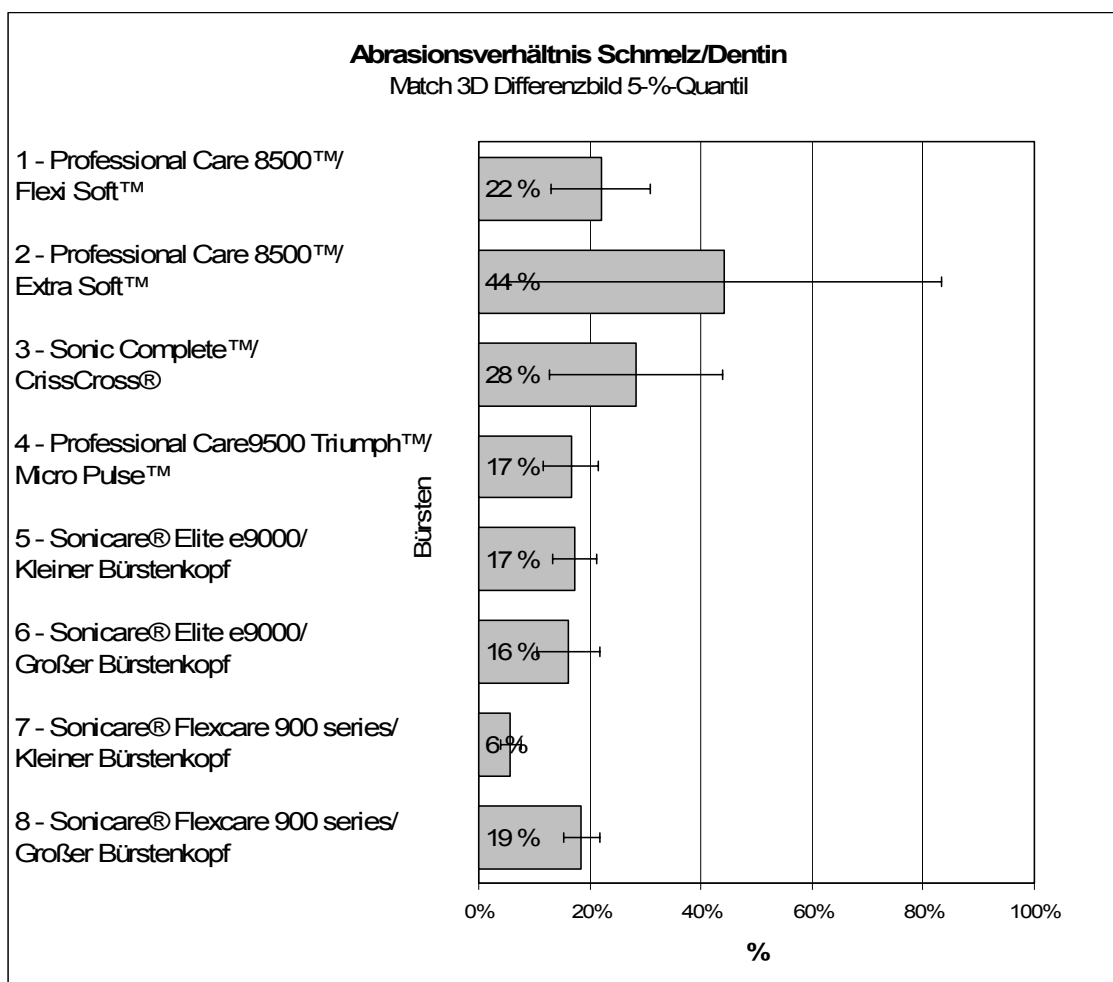
Dasselbe Bild ergibt sich bei den mittleren Defekttiefen (Abbildungen 51 und 52, im Anhang): mit großem Bürstenkopf weisen die *Sonicare® Flexcare 900 series* eine deutlich stärkere Abrasion als die *Sonicare® Elite e9000* auf; diese ist bei Median und Mittelwert signifikant ( $p = 0,0002$  und  $p = 0,0001$ ).

## 5.5 Abrasionsverhältnis Schmelz/Dentin

Bei der Betrachtung des Verhältnisses der Abrasivität im Schmelz zur Abrasivität im Dentin wurden nur die größten Defekttiefen herangezogen. Die Betrachtung der mittleren Defekttiefen ist nicht möglich, da die Messgenauigkeit der Match-3D-Differenzbilder nicht ausreicht, um Substanzverluste unter  $10 \mu\text{m}$  zu-

verlässig zu erfassen: Deshalb wurde bei einigen Bürsten im Schmelzbereich ein scheinbarer „Substanzzuwachs“ ermittelt. (Bei der Berechnung der Verhältnswerte der Abrasion im Schmelz zur Abrasion im Dentin traten daher negative Werte auf, die einen Vergleich verschiedener Werte nicht gestatten.)

Eine Übersicht über das Verhältnis der Abrasivität im Schmelz zur Abrasivität im Dentin auf der Grundlage der größten Defekttiefen bei den verschiedenen Bürsten-/Bürstenkopf-Kombinationen zeigen die Abbildung 19 sowie Abbildung 24 im Anhang.



**Abbildung 19:** Abrasionsverhältnis Schmelz/Dentin



Bei der *Sonicare® Flexcare 900 series/Kleiner Bürstenkopf* ist die Abrasivität im Dentin im Vergleich zum Schmelz deutlich überproportional, während die *Professional Care 8500™/Extra Soft™* eine unterproportionale Abrasivität im Dentin aufweist.

Die erste Stufe der statistischen Auswertung (mit dem Nonparametric One-Way ANOVA für Mehrfachvergleiche nach Kruskal-Wallis) zeigte, dass signifikante Abweichungen zwischen den verschiedenen Bürsten-/Bürstenkopf-Kombinationen im Abrasionsverhältnis Schmelz/Dentin bestehen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 12 zusammengefasst. H ist der errechnete Kennwert und p die zugehörige Überschreitungswahrscheinlichkeit; das entsprechende Signifikanzniveau  $\alpha$  ergibt sich aus  $\alpha = 1 - p$ .

|                |             | H     | p     |
|----------------|-------------|-------|-------|
| Schmelz/Dentin | 1-%-Quantil | 19,37 | 0,71% |
|                | 5-%-Quantil | 21,33 | 0,33% |

**Tabelle 12:** Abrasionsverhältnis Schmelz/Dentin  
Signifikante Kennwerte ( $p < 0,05$ ) markiert

In der zweiten Stufe der statistischen Auswertung mit dem Nonparametric-Multiple-Comparisons-Test nach Dunn konnte dann in Kreuztabellen gezeigt werden, welche Bürsten-/Bürstenkopf-Kombinationen signifikante Unterschiede aufweisen. Werte größer 1 im Dunn-Test entsprechen einer Irrtumswahrscheinlichkeit von unter 5 %.

Die Ergebnisse des Nonparametric-Multiple-Comparisons-Test nach Dunn für das Abrasionsverhältnis Schmelz zu Dentin (5%-Quantil) sind in der Tabelle 13 zusammengefasst (1%-Quantil im Anhang, Tabelle 18).

**Kennwerte Multiple-Comparisons-Test nach Dunn, Schmelz/Dentin, 5%-Quantil**

| Bürste   | Nr. | 1 | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    |
|--|-----|---|------|------|------|------|------|------|------|
| <i>Professional Care 8500™/Flexi Soft™</i>               | 1   |   | 0,18 | 0,13 | 0,13 | 0,02 | 0,22 | 0,99 | 0,17 |
| <i>Professional Care 8500™/Extra Soft™</i>               | 2   |   |      | 0,06 | 0,32 | 0,17 | 0,42 | 1,21 | 0,02 |
| <i>Sonic Complete™/CrissCross®</i>                       | 3   |   |      |      | 0,27 | 0,11 | 0,36 | 1,15 | 0,04 |
| <i>Professional Care 9500 Triumph™/Micro Pulse™</i>      | 4   |   |      |      |      | 0,16 | 0,09 | 0,88 | 0,31 |
| <i>Sonicare® Elite e9000/Kleiner Bürstenkopf</i>         | 5   |   |      |      |      |      | 0,25 | 1,04 | 0,15 |
| <i>Sonicare® Elite e9000/Großer Bürstenkopf</i>          | 6   |   |      |      |      |      |      | 0,79 | 0,40 |
| <i>Sonicare® Flexcare 900 series/Kleiner Bürstenkopf</i> | 7   |   |      |      |      |      |      |      | 1,19 |
| <i>Sonicare® Flexcare 900 series/Großer Bürstenkopf</i>  | 8   |   |      |      |      |      |      |      |      |

**Tabelle 13:** Abrasionsverhältnis Schmelz/Dentin  
Signifikante Kennwerte ( $p < 0,05$ ) markiert

Betrachtet man die 1%-Quantile, zeigt die *Sonicare® Flexcare 900 series/Kleiner Bürstenkopf* ein signifikant niedrigeres Abrasionsverhältnis Schmelz/Dentin als alle anderen Bürsten außer der *Sonic Complete™/CrissCross®*. Die Abrasion im Schmelz ist bei der *Sonicare® Flexcare 900 series/Kleiner Bürstenkopf* 13,9-fach niedriger als im Dentin, während bei den anderen Bürsten die Abrasion im Schmelz nur zwischen 2,9- und 4,9-fach niedriger ist als im Dentin. Das höhere Abrasionsverhältnis Schmelz/Dentin der *Professional Care 8500™/Extra Soft™* ist hingegen nur gegenüber der *Sonicare® Flexcare 900 series/Kleiner Bürstenkopf* signifikant. Bei Heranziehung des 5%-Quantils ist für das niedrigere Abra-

sionsverhältnis Schmelz/Dentin der *Sonicare® Flexcare 900 series/Kleiner Bürstenkopf* im Vergleich zu den Bürsten *Professional Care 8500™/Flexi Soft™* und *Professional Care 9500 Triumph™/Micro Pulse™* keine Signifikanz nachweisbar, während anders als beim 1%-Quantil im Vergleich zur *Sonic Complete™/CrissCross®* das Signifikanzniveau erreicht wird.

## 6 Diskussion

### 6.1 Ergebnisdiskussion

Die durchschnittlich gemessenen Abrasionswerte in Schmelz und Dentin entsprechen in ihrer ermittelten Größenordnung den in anderen In-vitro-Studien ermittelten Werten [61].

Das Abrasionsverhalten der verschiedenen Bürsten-/Bürstenkopf-Kombinationen zeigt erhebliche Unterschiede, wobei sich die Abrasivität im Schmelz nicht immer proportional zu der Abrasivität im Dentin verhält.

Bei den mittleren Defekttiefen im Schmelz übersteigen die Abrasionswerte kaum die Messgenauigkeit der kombinierten Scan-3D- und Match-3D-Methodik von 10 µm [53]; darüber hinaus ist von einer Materialungenauigkeit durch Abformmaterial und Modellherstellung in einer Größenordnung von ebenfalls 10 µm auszugehen [60]. Diese Abrasionswerte lassen damit eine Beurteilung der ermittelten Defekttiefen kaum zu. Bei den größten Defekttiefen liegen die Messwerte aber um den Faktor 2 bis 4 über dem Bereich der Messtoleranz, so dass hier eine Bewertung möglich ist. Im Schmelz führt die Kombination aus Schallantrieb, weiterentwickelter Konstruktion mit erhöhter Leistungsstärke (Amplitudenerhöhung bei gleicher Frequenz) und großem Bürstenkopf bei der *Sonicare® Flexcare 900 series* zu einer auffällig und signifikant höheren Abrasion als bei verschiedenen anderen Bürsten-/Bürstenkopf-Kombinationen. Dieser Befund überrascht zunächst, da die Bürsten-/Bürstenkopf-Kombination *Sonicare® Flexcare 900 series* mit großem Bürstenkopf im Dentin deutlich geringere Abrasionswerte als dieselbe Bürste mit kleinem Bürstenkopf erreicht. Hierauf wird bei der Bewertung der Abrasivitätsverhältnisse Schmelz/Dentin noch eingegangen.

Die gemessenen Abrasionswerte im Dentin liegen deutlich über dem Bereich der Messtoleranz, so dass hier die für den Schmelz im vorigen Abschnitt formulierten Bedenken entfallen.

Im Dentin zeigt sich deutlich, dass die *Sonicare® Flexcare 900 series* mit kleinem oder großem Bürstenkopf eine deutlich und in Kombination mit einem kleinen Bürstenkopf auch signifikant stärkere Abrasion als alle anderen getesteten Bürsten mit Ausnahme der *Professional Care 9500 Triumph* mit *Micro Pulse™* Bürstenkopf aufweist. Dieses Ergebnis lässt vermuten, dass nicht das Funktionsprinzip einer elektrischen Zahnbürste, sondern deren technisch-konstruktive Ausführung – vermutlich vor allem eine erhöhte Leistungsstärke (keine Frequenzerhöhung, aber eine Amplitudenerhöhung) – zu einer stärkeren Abrasivität bei dieser Bauart führt.

Der Paarvergleich der baugleichen Bürsten *5/6 Sonicare® Elite e9000* und *7/8 Sonicare® Flexcare 900 series* mit kleinem und großem Bürstenkopf isoliert die Bürstenkopfgröße als Faktor, der das Abrasionsverhalten wesentlich beeinflusst. Bei beiden Bürsten konnte eine deutlich und signifikant stärkere Abrasionswirkung des kleinen Bürstenkopfes nachgewiesen werden. Es liegt die Vermutung nahe, dass die auf die Zahnhartsubstanz einwirkenden Kräfte bei einem kleinen Bürstenkopf auf eine entsprechend kleinere Oberfläche verteilt werden und somit die Belastung pro Flächeneinheit ansteigt.

Der Paarvergleich der mit gleichem Funktionsprinzip, aber unterschiedlicher technisch-konstruktiver Ausführung – vermutlich vor allem eine erhöhte Leistungsstärke (keine Frequenz-, aber eine Amplitudenerhöhung) – arbeitenden Bürsten *5/7 Sonicare® Elite e9000* und *Sonicare® Flexcare 900 series* mit kleinem Bürstenkopf und derselben Bürsten *6/8* mit großem Bürstenkopf erlaubt es, die technisch-konstruktive Ausführung als Faktor zu identifizieren, der das Abrasionsverhalten wesentlich beeinflusst. Es konnte sowohl bei kleinem wie auch bei großem Bürstenkopf eine deutlich und signifikant stärkere Abrasionswirkung der *Sonicare® Flexcare 900 series* nachgewiesen werden. Wie bereits geschildert,

darf eine erhöhte Amplitude der Borstenbewegungen als Ursache der verstärkten Abrasivität dieses Bürstentyps vermutet werden.

Die teils deutlich stärkere Abrasion der *Professional Care 9500 Triumph* mit *Micro Pulse™* Bürstenkopf im Vergleich zu den übrigen Bürsten (außer der *Sonicare® Flexcare 900 series* mit großem und kleinem Bürstenkopf) verfehlt zwar aufgrund der Streuung der Messwerte das Signifikanzniveau, gibt aber dennoch einen Hinweis, dass die Verwendung von Silikonfilamenten als zusätzliche Reinigungselemente des Bürstenkopfes zu verstärktem Abrasionsverhalten führen kann. Die technischen Leistungsdaten der *Professional Care 9500 Triumph™* sind im Vergleich zum ebenfalls untersuchten Modell *Professional Care 8500™* (Bürsten 1 und 2) unverändert. Die Verwendung von weichen anstatt normalharten Borsten (*Extra Soft™* und *Flexi Soft™*) hat hingegen keinen Einfluss auf des Abrasionsverhalten.

Es lässt sich also abschließend feststellen, dass das Funktionsprinzip und die konstruktive Ausführung der Bürste, die Größe und die Beschaffenheit des Bürstenkopfes bzw. die Art der verwendeten Filamente unterschiedlichen Einfluss auf das Ausmaß der Schmelz- und Dentinabrasion haben.

Die Ermittlung des Verhältnisses der Abrasivität im Schmelz zur Abrasivität im Dentin ergab zunächst das überraschende Ergebnis, dass sich dieses Abrasionsverhältnis bei den verschiedenen Bürsten-/Bürstenkopf-Kombinationen deutlich und beim Vergleich der *Sonicare® Flexcare 900 series/Kleiner Bürstenkopf* mit allen anderen Kombinationen auch signifikant unterscheidet. Zu erwarten war ein proportional angeglichenes Abrasionsverhalten verschiedener Bürsten-/Bürstenkopf-Kombinationen in dem Sinne, dass Kombinationen mit einer hohen Abrasion im Dentin auch im Schmelz einen hohen Substanzabtrag bewirken. Insofern kann hier ein paradoxes Abrasionsverhalten festgestellt werden. Ein solch paradoxes Abrasionsverhalten fand aber auch schon Wülknitz beim Vergleich der REA- und RDA-Werte verschiedener Zahnpasten [75], ohne jedoch eine Deutung dieses Phänomens zu geben.

## **6.2 Kritische Würdigung der Fragestellung**

Anliegen der Studie war es, mögliche Unterschiede zwischen elektrischen Zahnbürsten mit unterschiedlichen Antriebskonzepten und Bürstenköpfen bezüglich ihres Abrasionsverhaltens an humanen Zähnen herauszufinden und zu quantifizieren.

Es konnte aufgezeigt werden, dass die verschiedenen getesteten Zahnbürsten und Bürstenköpfe erhebliche Unterschiede im Abrasionsverhalten aufweisen.

Aus den gewonnenen Daten ließe sich eine Rangliste der verwendeten Bürsten bzw. Bürstenköpfe bezüglich ihres Substanzabtrages im Dentin und im Schmelz erstellen. Jedoch müsste eine solche Rangliste kritisch betrachtet werden. Ihre Aussagekraft dürfte nicht überschätzt werden, da nur der Zahnhartsubstanzverlust, nicht aber die Reinigungswirkung der verschiedenen Bürsten untersucht wurde. So ist es möglich, dass wenig abrasive Bürsten nur eine unterdurchschnittliche Reinigungswirkung entfalten und umgekehrt. Die Ergebnisse dieser Studie – für sich allein betrachtet – lassen also kaum zu, definitive Empfehlungen zu bestimmten Bürsten-/Bürstenkopf-Kombinationen auszusprechen. Eine Synopsis der Ergebnisse der vorliegenden Studie mit Arbeiten, die die Reinigungswirkung der gleichen Bürsten-/Bürstenkopf-Kombinationen untersucht haben, sollte allerdings konkrete Empfehlungen ermöglichen.

## **6.3 Kritische Würdigung der Methodik**

### **6.3.1 In-vitro-Versuche versus In-vivo-Versuche**

Um aussagekräftige und valide Ergebnisse zu erreichen, muss zunächst entschieden werden, ob eine In-vitro- oder eine In-vivo-Studie in Bezug auf die Fragestellung sinnvoll ist. Es finden sich in der Literatur durchaus Studien, die den Verschleiß von Zahnhartsubstanzen in vivo beobachtet haben [59]. Dabei betrug die Zeitspanne der Untersuchung mehr als ein Jahrzehnt.

Jedoch haben In-vivo-Verfahren für die Fragestellung der vorliegenden Studie schwerwiegende Nachteile. Schon aus Gründen der Aktualität sollten die Ergebnisse innerhalb eines überschaubaren Zeitraumes gewonnen werden können. Dies ist vor allem im Hinblick auf die immer kürzeren Modelllaufzeiten und daraus resultierenden Neuerscheinungen auf dem Markt eine Notwendigkeit. So sind von den vor fünf Jahren angebotenen Zahnbürsten nur noch wenige in unveränderter Form im Handel erhältlich. Abrasionsstudien machen jedoch nur Sinn, wenn sie einen ausgedehnten Zeitraum überprüfen, da nach wenigen Wochen und Monaten noch nicht mit einem relevanten Abtrag gerechnet werden kann.

Ein weiterer Nachteil ist die Beeinflussung der Ergebnisse durch äußere Umstände. Die Patienten unterscheiden sich erheblich durch ihre unterschiedliche Compliance, ihre Putztechnik, den ausgeübten Anpressdruck und ihre Motivation im Allgemeinen. Auch muss bei klinischen Studien mit zum Teil großen Ausfall- bzw. Aussteigerquoten gerechnet werden. Schließlich dürfte die Rekrutierung eines ausreichend großen Patientenkollektivs für statistisch abgesicherte Ergebnisse schwierig sein.

Zudem ist die Erfassung der Messwerte im oralen Milieu erheblich erschwert. Hierfür gibt es mehrere Ursachen. So kann bei Verschleißmessungen derzeit nicht auf die Anfertigung von Repliken verzichtet werden, da eine direkte enorale Messwerterhebung mit hinreichender Genauigkeit nicht möglich ist [5]. Bei der Anfertigung von enoralen Repliken gibt es weiterhin den Nachteil, dass keine Referenzpunkte geschaffen werden können, was die spätere 3D-Analyse mit der derzeitigen Methode erschwert und die Präzision der gewonnenen Messwerte herabsetzt.

Bei der Fragestellung der hier vorliegenden Studie war also eine Longitudinalstudie in vivo nicht beabsichtigt, da innerhalb eines kurzen Zeitraumes ein Überblick über die Zahnhartsubstanzverluste gewonnen werden sollte.



Bei In-vitro-Studien können aber auch sehr aufwändige Bemühungen, die im oralen Milieu zusammenwirkenden physikalischen und chemischen Faktoren zu simulieren, die Vorgänge in vivo nicht vollständig nachbilden. So ist Mair der Auffassung, dass In-vitro-Versuche zwar zur Untersuchung grundlegender Abrasionsmechanismen geeignet sind; er stellt aber in Frage, ob unter klinischen Bedingungen auftretender Verschleiß überhaupt durch In-vitro-Versuche vorhergesagt werden kann [45].

Auch wenn In-vitro-Untersuchungen stets nur auf bestimmte Teilaspekte fokussiert werden können, so sind sie doch unentbehrlich, um die Eigenschaften neuer Produkte in der Zahnheilkunde zu evaluieren.

### 6.3.2 Proben

Zu beachten ist, dass in dieser Studie frisch extrahierte, unversehrte menschliche Zähne als Proben Verwendung fanden und nicht, wie in anderen Studien, Acrylblöcke [15; 16], Schmelz-/Dentinblöcke aus bovinen Zähnen [73; 74] oder plan geschliffene menschliche Zähne [38; 76]. Die Verwendung unversehrter menschlicher Zähne, also ohne vorherige Verarbeitung zu einem Materialblock, wurde gewählt, um durch die erhaltene Morphologie eine möglichst realitätsnahe Simulation zu ermöglichen. Dadurch sollten praxisrelevante Langzeitprognosen zu Substanzverlusten abgegeben werden können.

Da die unterschiedliche Makromorphologie von Inzisiven, Prämolaren und Molaren eine unterschiedliche Abrasionsstabilität bedingen könnte, wurden für die Untersuchung nur Molaren verwendet. Makromorphologische Unterschiede zwischen verschiedenen Molaren sowie interindividuelle Unterschiede der Makromorphologie könnten allerdings auch Einfluss auf die Abrasionsstabilität verschiedener Zähne haben; ebenso könnten interindividuelle Unterschiede in der Mineralisation und posteruptionen Schmelzreifung der Zahnhartsubstanzen eine unterschiedliche Abrasionsstabilität verschiedener Zähne bedingen. Die zu erwartende Streuung der Abrasionstiefen erforderte daher eine entsprechend große Probenzahl.

Die Verfügbarkeit von extrahierten menschlichen Zähnen ist allerdings in Zeiten verbesserter Mundhygiene erheblich eingeschränkt. Zudem werden meist nur kariöse und damit für die vorliegende Untersuchung unbrauchbare Zähne extrahiert. Für die Untersuchung boten sich daher vor allem Weisheitszähne an, die zumeist aus kariesprophylaktischer oder kieferorthopädischer Indikation extrahiert wurden. Die Verfügbarkeit menschlicher Zähne wird weiter dadurch eingeschränkt, dass diese nur kurzfristig gelagert werden können, ohne dass eine Veränderung der Eigenschaften ausgeschlossen werden kann. Experimente wie in der vorliegenden Untersuchung sind daher nur bei gesicherter kontinuierlicher Versorgung mit frischem Probenmaterial möglich.

Beachtet werden muss auch die bei menschlichen Zähnen grundsätzlich gegebene Infektionsgefahr. Diese könnte durch die von verschiedenen anderen Autoren beschriebene Lagerung in Ethanol, Isopropanol oder Thymol vermindert werden [22; 38; 76]. Um ein Austrocknen und Veränderungen der Eigenschaften der Proben zu verhindern, empfiehlt sich aber eine Lagerung der Proben in isotoner NaCl-Lösung, wie auch in verschiedenen vergleichbaren Studien praktiziert [36; 73; 74]. Die Infektionsgefahr erfordert allerdings eine besonders gewissenhafte und damit zeitaufwändige Handhabung der Proben.

Die Verwendung von bovinen Zähnen könnte zwar hinsichtlich der Eigenschaften einen adäquaten Ersatz darstellen [29], ist aber aufgrund der völlig unterschiedlichen Makromorphologie nur zur Gewinnung von Zahnhartsubstanzblöcken geeignet. Zur Gewinnung von Zahnhartsubstanzblöcken sind bovine Zähne durch die nahezu unbegrenzte Verfügbarkeit besser geeignet als menschliche Zähne. In Anbetracht des Einflusses der Makromorphologie auf die Charakteristik der Abrasion in einer realitätsnahen Putzsimulation kam bei der vorliegenden Studie also nur die Verwendung menschlicher Zähne in Betracht.

### 6.3.3 Abrasionsmittel

Die verwendete Zahnpasta Elmex<sup>®</sup> rot/mentholfrei ist auf dem europäischen Markt weit verbreitet und zeichnet sich durch gute bis sehr gute Reinigungsei-

genschaften bei moderaten bis geringen Abrasionswerten aus [75]. Zwar verwendete Imfeld eine standardisierte „Abrasive Slurry“ [29], jedoch erscheint die Benutzung einer weit verbreiteten Zahnpasta für eine realitätsnahe Putzsimulation eher angemessen, um realistische Vorhersagen zu den zu erwartenden Abrasionseffekten verschiedener Bürsten-/Bürstenkopf-Kombinationen machen zu können. Bei zahlreichen In-vitro-Abrasionsstudien wurden daher marktübliche Zahnpasten verwendet [3; 72]. Auch die Zahnpasta Elmex<sup>®</sup> rot/mentholfrei wurde bei mehreren In-vitro-Abrasionsstudien eingesetzt [73; 74].

#### 6.3.4 Anpressdruck

Es schien nahe liegend, die Zahnbürsten bezüglich des applizierten Anpressdruckes den jeweiligen Herstellerangaben gemäß einzusetzen, um für eine realitätsnahe Simulation eine sachgemäße Benutzung der Zahnbürsten zu garantieren. Die den Zahnbürsten beiliegenden Benutzerhinweise enthalten jedoch keine genauen Angaben oder Empfehlungen zur Belastung des Bürstenkopfes beim Putzvorgang. Eines der verwendeten Modelle (*Professional Care 9500 Triumph<sup>™</sup>* von BRAUN Oral B<sup>®</sup>) besitzt allerdings eine eingebaute Warnvorrichtung für überhöhten Anpressdruck, die bei ca. 2,5 N aktiviert wird.

Bei einer vom Hersteller BRAUN Oral B<sup>®</sup> veröffentlichten Studie zur Reinigungseffizienz elektrischer Zahnbürsten wird der Druck mit 1,8 - 2,1 N für eine rotierend-oszillierende Bürste sowie 1,1 - 1,4 N für eine Schallzahnbürste angegeben [11]. Um jedoch für alle Bürsten gleiche Voraussetzungen zu schaffen, wurde ein einheitlicher, niedriger bis mittlerer Anpressdruck für alle Bürsten gewählt. Zwar ist in Abrasionsstudien gelegentlich von einem höheren Anpressdruck wie etwa 2,5 N die Rede [73]; jedoch zeigte sich in anderen Studien, dass bei einem Anpressdruck von mehr als 1,5 N die Steigerung der Effizienz der Plaqueentfernung gegenüber geringeren Anpressdrücken unbedeutend [48] bzw. ein erhöhter Anpressdruck eher kontraproduktiv ist [70]. Der bei Anpressdrücken von über 2,5 N ausgelöste Alarm der *Professional Care 9500 Triumph<sup>™</sup>* muss als Hinweis auf ein Gefahrenpotential für den Benutzer bei höheren Anpressdrücken gewertet werden. So begrenzte Vieira bei einer Abrasionsstudie

mit säurebehandeltem Schmelz den Anpressdruck auf 1,5 N [72]. Demzufolge ist, unabhängig vom Abrasionsverhalten, kein erhöhter Anpressdruck zu empfehlen. Der für alle Zahnbürsten eher niedrige Anpressdruck von 1,2 N wurde auch gewählt, um bei einer realitätsnahen Putzsimulation die Schallzahnbürsten mit den hierfür empfohlenen niedrigeren Anpressdrücken gegenüber den rotierend-oszillierenden Zahnbürsten mit den hierfür empfohlenen höheren Anpressdrücken nicht durch einen überhöhten Substanzabtrag zu benachteiligen.

### 6.3.5 Simulationsapparatur und Bürstbewegung

Zur Simulation der Bürstbewegung wurde ein computergesteuerter 6-Achsen-Industrieroboter verwendet (Mitsubishi RV-E4NM, Mitsubishi Electric Corporation, Tokio, Japan). Die sechs Achsen ermöglichen eine naturgetreue Nachbildung der Bewegungsfreiheit des menschlichen Armes einschließlich des Schultergelenkes, wodurch eine realitätsnahe Bürstbewegung ermöglicht wurde. Diese konnte durch die in vielen anderen Studien verwendeten 2-Achsen-Simulationsapparaturen [7; 50; 51; 63] oder 4-Achsen-Roboter [8; 10; 11; 12] nicht erreicht werden. Zudem wird eine Variation der Gleitbewegung der Bürstenfilamente erreicht, die der klinischen Situation weitaus ähnlicher ist als eine oft simulierte ausschließliche Linearbewegung [15] oder eine ausschließliche Rotationsbewegung [16]. Trotz des komplexen Bewegungsmusters ist eine hohe Reproduzierbarkeit der Bürstenbewegungen gesichert, da es entsprechend den Herstellerangaben durch den Einsatz des Industrieroboters möglich ist, die Arbeitsbewegung mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,03$  mm für jeden Probendurchlauf zu wiederholen. In Untersuchungen von Duda wurde für die verwendete Apparatur eine noch höhere Positionierungsgenauigkeit von  $\pm 0,01$  mm ermittelt [13]. Der von Duda entwickelte computer- und robotergestützte Arbeitsplatz wurde inzwischen mehrfach für realitätsnahe Putzsimulationen genutzt [4; 6]. Somit ist durch die Verwendung eines 6-Achsen-Industrieroboters eine realistischere Einschätzung des Abrasionsverhaltens verschiedener Zahnbürsten zu erwarten.

### 6.3.6 Simulationsdauer

Der Simulationszeitraum von fünf Jahren wurde aus verschiedenen Gründen gewählt. Zunächst einmal muss davon ausgegangen werden, dass ein durchschnittlicher Benutzer nach dem Erwerb einer im Vergleich zur Handzahnbürste teuren elektrischen Zahnbürste diese über einen langen Zeitraum, vermutlich über die gesamte Lebensdauer des Gerätes, benutzen wird. Weiterhin konnte nach einer Kurzzeitsimulation nicht mit einem nennenswerten Substanzabtrag gerechnet werden, da in Vorversuchen zunächst ermittelt wurde, nach welchem Zeitaufwand makroskopisch erkennbare Veränderungen entstehen. So hatte sich der gewählte Simulationszeitraum orientierend aus den Vorversuchen und der angenommenen klinischen Verwendungsdauer der Geräte ergeben.

Andere Abrasionsstudien haben Substanzverluste gezeigt, die proportional zur Dauer der abrasiven Bearbeitung ansteigen. Deshalb wurde durch den langen Simulationszeitraum ein so großer Dentin- bzw. Schmelzabtrag erzielt, dass unterschiedliches Abrasionsverhalten verschiedener Bürsten-/Bürstenkopf-Kombinationen mit der gewählten Methodik und der damit verbundenen Mess-toleranz durch Abformung [60] sowie Scan- und Match-Verfahren [53] mit statistischer Signifikanz erfasst werden konnte.

### 6.3.7 Verwendung von Gipsrepliken

Die lineare Dimensionsstabilität für neuere Abdruck- und Gipsmaterialien wurde von Price mit 9  $\mu\text{m}$  beziffert [60], was als hinreichend genau zu betrachten ist.

Ein alternatives Verfahren, das ohne die Abformung der Proben und die Erstellung von Gipsrepliken auskommt, wäre die Besprühung der Proben mit MET-L-CHEK (Helling GmbH, Heidgraben, Deutschland). Mit diesem vor allem zur Dichtigkeits- und Rissprüfung in der Luft- und Raumfahrttechnik, aber auch zur Rissprüfung von Dentalkeramik [18] angewandten Verfahren würden die Proben die für eine Vermessung mit dem Laserscanner benötigte Opazität erreichen, ohne einen die Messung verfälschenden Substanzauftrag zu verursachen, weil sich nach dem Besprühen der Proben eine nach Herstellerangaben

uniforme einlagige Kristallschicht von weniger als 10  $\mu\text{m}$  ausbildet. Aufgrund der Notwendigkeit, die Proben vor und nach der Putzsimulation mit MET-L-CHEK zu besprühen und dann direkt zu vermessen, ist dieses Verfahren aber nur praktikabel, wenn ein Laserscanner vor Ort verfügbar ist. Vor allem aber ist es nicht wie bei der Arbeit mit Gipsrepliken möglich, den Laserscan der Ausgangsproben zu wiederholen, da diese in ihrer Ausgangsform nicht mehr existieren.

### 6.3.8 Laserscan 3D/Match 3D

Die Autoren Kreulen und van Amerongen haben sich 1991 mit den verschiedenen Verfahren zur Verschleißmessung auseinandergesetzt. Die Laserscan-Methode scheint nach ihrer Vorstellung das größte Potential für klinische Untersuchungen zu haben [40]. So weisen die häufig verwendeten mechanischen Sensoren zur Oberflächenvermessung im Vergleich zur Vermessung mit dem Laserscanner eine Vielzahl von Nachteilen auf. Bei der mechanischen Erfassung fährt ein Tastkopf oder Stylus die zu vermessende Oberfläche ab. Hierdurch kann es zu einer mechanischen Beschädigung der Objekt Oberfläche kommen, wenn der Tastkopf zu klein ist [56]. Auch ist das Verfahren zur profilometrischen dreidimensionalen Oberflächenerfassung fehleranfällig [57]. Größere Tastköpfe verringern hingegen die Auflösung des Systems [62]. Zudem kann es beim Vermessen von sehr unregelmäßigen Strukturen mit extremen Steigungen zur Verwindung der Abtastnadel kommen, wodurch weitere Artefakte entstehen können.

Die Auswahl der Bereiche, die zur Ermittlung der Substanzverluste herangezogen wurden, erfolgte unter zwei Gesichtspunkten: dies sind zum einen die technische Machbarkeit und zum anderen die klinische Relevanz der zu erwartenden Ergebnisse. So musste der Bereich im Übergang von der Einbettmasse zur Probe aus der Messung ausgegrenzt werden, da dieser Bereich einerseits bei partiell überschüssiger Einbettmasse zu einem veränderten Abrasionsverhalten führen kann und andererseits durch die in diesem Bereich vorhandenen starken

Neigungen ( $> 60^\circ$ ) eine exakte Erfassung durch den Laserscan 3D nicht möglich ist [52].

#### **6.4 Klinische Relevanz**

Die klinische Relevanz der aus den ausgewählten Messbereichen ermittelten Ergebnisse beruht auf folgenden Überlegungen: während die Messung der Substanzverluste im Schmelz keiner weiteren Erklärung bedarf, beruht die Relevanz der Substanzverluste im Bereich des Dentins bzw. des Bereiches zwischen der Schmelz-Zement-Grenze bis 1 mm apikal von dieser Grenze auf der Häufigkeit von Gingivarezessionen, die zu freiliegendem Dentin im Bereich der Zahnwurzel führen. So wurde in einer umfangreichen Studie von Albandar bei Patienten im Alter von 30 bis 90 Jahren eine durchschnittliche Häufigkeit von 58 % für Gingivarezessionen von 1 mm und mehr ermittelt [2]. Die Fokussierung der Untersuchung auf die bukkalen Flächen der Probenzähne ergibt sich aus der Beobachtung von Kassab, dass Gingivarezessionen hier häufiger auftreten als an den übrigen Zahnflächen [32].

Ob durch einen veränderten Simulationszeitraum andere Ergebnisse erzielt werden, müsste in weiteren Arbeiten untersucht werden, zum Beispiel, ob bei längerer Putzdauer der Zahnhartsubstanzverlust linear oder exponentiell ansteigt.

## 7 Zusammenfassung

Ziel der vorliegenden Untersuchung war es, verschiedene elektrische Zahnbürsten führender Hersteller bei einer realitätsnahen Langzeitputzsimulation im Hinblick auf ihre Abrasivität in Schmelz und Dentin zu untersuchen und vorhandene Unterschiede zu analysieren.

Dabei interessierte vor allem, ob das Abrasionsverhalten der Zahnbürsten primär von dem verwendeten Funktionsprinzip (oszillierend-rotierend versus schallaktiviert) abhängt oder ob eher die konstruktive Ausgestaltung eines Funktionsprinzips die Abrasivität der Zahnbürste bestimmt. Weiterhin sollte der Einfluss verschiedener Bürstenkopftypen (grosse/kleine Bürstenköpfe sowie Bürstenköpfe mit harten und weichen Filamenten oder mit Silikoneinsätzen) auf die Abrasivität geprüft werden. Schließlich sollte geklärt werden, ob sich die Abrasivität der untersuchten Bürsten im Schmelz proportional zur Abrasivität im Dentin verhält, ob also Bürsten, die zum Beispiel einen großen Substanzverlust im Schmelz verursachen, eine vergleichbare Wirkung im Dentin zeigen.

Zu diesem Zweck wurden achtzig unversehrte menschliche Molaren nach Einbettung auf acht Gruppen entsprechend den acht untersuchten Bürsten-/Bürstenkopf-Kombinationen randomisiert verteilt und einer Putzsimulation, die einer Dauer von fünf Jahren entspricht, mit einer handelsüblichen Zahnpasta unter Verwendung eines Sechs-Achsen-Industrieroboters unterzogen, der die Putzbewegungen des menschlichen Armes naturgetreu nachstellen konnte. Vor und nach der Putzsimulation wurden Abformungen der Proben genommen und daraus Gipsrepliken erstellt. Die Schmelz- und Dentinoberflächen wurden mit einem berührungsfrei arbeitenden dreidimensionalen Oberflächenmessgerät in einer Genauigkeit von 10 µm erfasst und die Veränderungen mit einer bildverarbeitenden Software quantifiziert.

Nach Putzvorgängen, die einer Dauer von fünf Jahren entsprechen, weist die *Sonicare® Flexcare 900 series* eine deutlich und signifikant stärkere Abrasivität als



alle anderen Bürsten auf, während das Vorgängermodell *Sonicare® Elite e9000* und die *Sonic Complete™* eher eine durchschnittliche Abrasivität zeigt. Kleine Bürstenköpfe sind bei den beiden konstruktiv unterschiedlichen *Sonicare®*-Schallzahnbürsten deutlich und signifikant stärker abrasiv als große Bürstenköpfe. Bei Bestückung mit gleichen (großen oder kleinen) Bürstenköpfen ist bei der *Sonicare® Flexcare 900 series* die Abrasivität deutlich und signifikant höher als bei ihrem Vorgängermodell *Sonicare® Elite e9000*. Die Abrasivität einer elektrischen Zahnbürste wird also nicht durch das Funktionsprinzip, sondern dessen konstruktive Ausgestaltung und die Leistungscharakteristik bestimmt. Die Bestückung der *Professional Care 8500* mit Bürstenköpfen mit normal harten oder weichen Borsten hat keinen Einfluss auf die Abrasivität. Lediglich der Einsatz von Bürstenköpfen mit zusätzlichen Silikoneinsätzen erhöht die Abrasivität, ohne aber das festgelegte Signifikanzniveau zu erreichen. Die Abrasivität der verschiedenen Bürsten-/Bürstenkopf-Kombinationen im Schmelz ist nicht, wie eigentlich erwartet, proportional zur ihrer Abrasivität im Dentin.

Die Abrasivität verschiedener Bürsten-/Bürstenkopf-Kombinationen ist offensichtlich ein multifaktorielles Geschehen, bei dem der Einfluss einzelner Faktoren aber durchaus zu erkennen und zu bewerten ist:

Eine gesteigerte Leistung bzw. eine erhöhte Amplitude der Bürstenkopfbewegungen führt bei Schallzahnbürsten ebenso zu erhöhter Abrasion wie ein kleinerer Bürstenkopf. Bei Bürsten mit rotierend-oszillierenden Bewegungen verursachen Silikoneinsätze im Bürstenkopf geringfügig größere Zahnhartsubstanzverluste. Weiche Bürstenköpfe zeigen hier keinen höheren Materialabtrag als harte Bürstenköpfe.

## 8 Literaturverzeichnis

1. Ainamo J, Xie Q, Ainamo A and Kallio P (1997) Assessment of the effect of an oscillating/rotating electric toothbrush on oral health. A 12-month longitudinal study.  
J Clin Periodontol 24 (1): 28-33
2. Albandar JM and Kingman A (1999) Gingival recession, gingival bleeding, and dental calculus in adults 30 years of age and older in the United States, 1988-1994.  
J Periodontol 70 (1): 30-43
3. Attin T, Deifuss H and Hellwig E (1999) Influence of acidified fluoride gel on abrasion resistance of eroded enamel.  
Caries Res 33 (2): 135-139
4. Baldys LA (2007) Studie zur standardisierten Analyse der Reinigungseffektivität von elektrischen Zahnbürsten.  
Med Diss Münster
5. Benz C, Mehl A and Hickel R (1995) The accuracy of the new cerc-camera.  
J Dent Res 74 (3): 934
6. Bolstorff C (2001) Entwicklung eines Arbeitsplatzes zur quantitativen Analyse der Putzleistung von Handzahnbürsten.  
Med Diss Münster
7. Boyd RL, McLey L and Zahradnik R (1997) Clinical and laboratory evaluation of powered electric toothbrushes: in vivo determination of average force for use of manual and powered toothbrushes.  
J Clin Dent 8 (3 Spec No): 72-75
8. Danser MM, Driesen GM, Timmerman MF and Van der Weijden GA (2000) A laboratory and clinical investigation comparing 2 oscillating/rotating electric toothbrushes.  
J Clin Periodontol 27 (4): 277-283
9. Dentino AR, Derderian G, Wolf M, Cugini M, Johnson R, Van Swol RL, King D, Marks P and Warren P (2002) Six-month comparison of powered versus manual toothbrushing for safety and efficacy in the absence of professional instruction in mechanical plaque control.  
J Periodontol 73 (7): 770-778
10. Driesen GM, Warren PR, Bielfeldt U and Helbig G (2001) A laboratory comparison of the efficacy of battery-operated, non-rechargeable power toothbrushes.  
Am J Dent 14 Spec No: 5B-8B

11. Driesen GM, Warren PR and Hilfinger P (1998) Cleaning efficacy of a new electric toothbrush.  
Am J Dent 11 (Spec No): 7-11
12. Driesen GM, Warren PR, Hilfinger P, Ernst CP and Willershausen B (1996) The development of the Braun Oral-B Ultra Plaque Remover: an in vitro robot study.  
Am J Dent 9 Spec No: 13-17
13. Duda S (2001) Entwicklung eines computer- und robotergestützten Arbeitsplatzes zur standardisierten Untersuchung der Reinigungseffektivität von Handzahnbürsten.  
Med Diss Münster
14. Dunn OJ (1964) Multiple comparisons using rank sums.  
Technometrics 6: 241-252
15. Dyer D, Addy M and Newcombe RG (2000) Studies in vitro of abrasion by different manual toothbrush heads and a standard toothpaste.  
J Clin Periodontol 27 (2): 99-103
16. Dyer D, MacDonald E, Newcombe RG, Scratcher C, Ley F and Addy M (2001) Abrasion and stain removal by different manual toothbrushes and brush actions: studies in vitro.  
J Clin Periodontol 28 (2): 121-127
17. Farkas W (2002) Zahnhygiene: In aller Munde  
Zeit Online 09/2002, 54. 2002
18. Fischer H, Karaca F and Marx R (2002) Detection of microscopic cracks in dental ceramic materials by fluorescent penetrant method.  
J Biomed Mater Res 61 (1): 153-158
19. Flemmig TF, Petersilka GJ, Mehl A, Hickel R and Klaiber B (1998) The effect of working parameters on root substance removal using a piezoelectric ultrasonic scaler in vitro.  
J Clin Periodontol 25 (2): 158-163
20. Flemmig TF, Petersilka GJ, Mehl A, Hickel R and Klaiber B (1998) Working parameters of a magnetostrictive ultrasonic scaler influencing root substance removal in vitro.  
J Periodontol 69 (5): 547-553
21. Golding PS (1982) The development of the toothbrush. A short history of tooth cleansing. Part 1.  
Dent Health (London) 21 (4): 25-27

22. Gray GB, Carey GP and Jagger DC (2006) An in vitro investigation of a comparison of bond strengths of composite to etched and air-abraded human enamel surfaces.  
J Prosthodont 15 (1): 2-8
23. Grossman E and Proskin H (1997) A comparison of the efficacy and safety of an electric and a manual children's toothbrush.  
J Am Dent Assoc 128 (4): 469-474
24. Gschoßmann K (2002) Laseroptische Untersuchungen zum In-vivo-Kauflächenverschleiß von metallfreien Artglass<sup>®</sup>-Kronen im Front- und Seitenzahnggebiet.  
Med Diss München
25. Gustafson BE, Quensel CE, Uensel CE, Lanke LS, Lundqvist C, Grahnen H, Bonow BE and Krasse B (1954) The Vipeholm dental caries study; the effect of different levels of carbohydrate intake on caries activity in 436 individuals observed for five years.  
Acta Odontol Scand 11: 232-264
26. Heanue M, Deacon SA, Deery C, Robinson PG, Walmsley AD, Worthington HV and Shaw WC (2003) Manual versus powered toothbrushing for oral health.  
Cochrane Database Syst Rev (1): CD002281
27. Hellstadius K, Asman B and Gustafsson A (1993) Improved maintenance of plaque control by electrical toothbrushing in periodontitis patients with low compliance.  
J Clin Periodontol 20 (4): 235-237
28. Hellwig E, Klimek J und Attin T (2003)  
Einführung in die Zahnerhaltung 3 ed.  
Urban & Fischer bei Elsevier
29. Imfeld T (2001) Comparison of the mechanical effects of a toothbrush and standard abrasive on human and bovine dentine in vitro.  
J Clin Dent 12 (4): 92-96
30. Jepsen S (1998) The role of manual toothbrushes in effective plaque control: advantages and limitations In: Lang NP, Attstrom R and Loe H (eds).  
Quintessence: Chicago, 121-137
31. Joshipura KJ, Kent RL and DePaola PF (1994) Gingival recession: intra-oral distribution and associated factors.  
J Periodontol 65 (9): 864-871

32. Kassab MM and Cohen RE (2003) The etiology and prevalence of gingival recession.  
J Am Dent Assoc 134 (2): 220-225
33. Kaup M, Niermann J und Ott K (1999) Reinigungsfähigkeit elektrischer Zahnbürsten bei nicht-eugnather Zahnstellung.  
Dtsch Zahnärztl Z 54(2): 103-107
34. Keller HP, Dörfer C.E und Reich E (2004) Viel Arbeit für die Normenschmiede.  
Zahnärztl Mitt 94: 382-383
35. Khocht A, Simon G, Person P and Denepitiya JL (1993) Gingival recession in relation to history of hard toothbrush use.  
J Periodontol 64 (9): 900-905
36. Kielbassa AM, Hellwig E and Meyer-Lueckel H (2006) Effects of irradiation on in situ remineralization of human and bovine enamel demineralized in vitro.  
Caries Res 40 (2): 130-135
37. Kocher T, Griewing B und Lösche W (1999) Parodontitis marginalis und kardiovaskuläre Erkrankungen.  
Dtsch Ärztebl 96: 58-61
38. Kodaka T, Kobori M, Hirayama A and Abe M (1999) Abrasion of human enamel by brushing with a commercial dentifrice containing hydroxyapatite crystals in vitro.  
J Electron Microsc (Tokyo) 48 (2): 167-172
39. Körber K (1995) Funktionslehre In: Zahnärztliche Prothetik.  
Georg Thieme Verlag: Stuttgart, New York, 3-7
40. Kreulen CM and van Amerongen WE (1991) Wear measurements in clinical studies of composite resin restorations in the posterior region: a review.  
ASDC J Dent Child 58 (2): 109-123
41. Kruskal WH and Wallis WA (1952) Use of ranks in one-criterion variance analysis.  
J Am Stat Assoc 47: 583-621
42. Kunzelmann KH (1996) Verschleißanalyse und -quantifizierung von Füllungsmaterialien in vivo und in vitro.  
Habil Schr München
43. Litonjua LA, Andreana S, Bush PJ, Tobias TS and Cohen RE (2004) Wedged cervical lesions produced by toothbrushing.  
Am J Dent 17 (4): 237-240

44. Litonjua LA, Andreana S and Cohen RE (2005) Toothbrush abrasions and noncarious cervical lesions: evolving concepts. *Compend Contin Educ Dent* 26 (11): 767-4, 776
45. Mair LH, Stolarski TA, Vowles RW and Lloyd CH (1996) Wear: mechanisms, manifestations and measurement. Report of a workshop. *J Dent* 24 (1-2): 141-148
46. Mann HB and Whitney DR (1947) On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other. *Annals of Mathematical Statistics* 18: 50-60
47. Mayer R (1990) Elektrische Zahnbürste – Handzahnbürste, ein Vergleichstest. *ZWR* 99 (3): 188-192
48. McCracken GI, Janssen J, Swan M, Stehen N, de Jager M and Heasman PA (2003) Effect of brushing force and time on plaque removal using a powered toothbrush. *J Clin Periodontol* 30 (5): 409-413
49. McCracken GI, Preshaw PM, Heasman L, Stacey F, Stehen N and Heasman PA (2004) Efficacy of plaque removal of the Sonicare Elite versus the Sonicare Advance from hard-to-reach sites. *J Clin Periodontol* 31 (11): 1007-1011
50. McLey L, Boyd RL and Sarker S (1997) Clinical and laboratory evaluation of powered electric toothbrushes: laboratory determination of relative abrasion of three powered toothbrushes. *J Clin Dent* 8 (3 Spec No): 76-80
51. McLey L, Boyd RL, and Sarker S (1997) Clinical and laboratory evaluation of powered electric toothbrushes: relative degree of bristle end-rounding. *J Clin Dent* 8 (3 Spec No): 86-90
52. Mehl A, Gloger W, Kunzelmann KH and Hickel R (1997) A new optical 3-D device for the detection of wear. *J Dent Res* 76 (11): 1799-1807
53. Mehl A, Gloger W, Kunzelmann KH und Hickel R (1996) Entwicklung eines neuen optischen Oberflächenmessgerätes zur präzisen dreidimensionalen Zahnvermessung. *Deutsch Zahnärztl Z* (51): 23-27
54. Menezes de MM, Turssi CP, Hara AT, Messias DC and Serra MC (2004) Abrasion of eroded root dentine brushed with different toothpastes. *Clin Oral Investig* 8 (3): 151-155

55. Owen TL (1972) A clinical evaluation of electric and manual toothbrushing by children with primary dentitions. *ASDC J Dent Child* 39 (1): 15-21
56. Pelka M, Krämer N und Kunzelmann KH (1993) Oberflächenveränderungen verschiedener Modellmaterialien durch mechanische Profilometrie. *Dtsch Zahnärztl Z* 48: 488-491
57. Pelka M, Krämer N und Kunzelmann KH (1995) Meßfehler bei der 3D-Erfassung von Oberflächen durch mechanische Profilometrie. *Dtsch Zahnärztl Z* 50: 725-728
58. Petersilka GJ, Bell M, Mehl A, Hickel R and Flemmig TF (2003) Root defects following air polishing. *J Clin Periodontol* 30 (2): 165-170
59. Pintado MR, DeLong R, Ko CC, Sakaguchi RL and Douglas WH (2000) Correlation of noncarious cervical lesion size and occlusal wear in a single adult over a 14-year time span. *J Prosthet Dent* 84 (4): 436-443
60. Price RB, Gerrow JD, Sutow EJ and MacSween R (1991) The dimensional accuracy of 12 impression material and die stone combinations. *Int.J Prosthodont.* 4 (2): 169-174
61. Remizov SM and Pruzhanskii LI (1990) The effect of toothbrushes on human dental enamel and dentin wear. *Stomatologija (Mosk)* (4): 4-6
62. Roberts MJ and Soderholm KJ (1989) Comparison of three techniques for measuring wear of dental restorations. *Acta Odontol Scand* 47 (6): 367-374
63. Sarker S, McLey L and Boyd RL (1997) Clinical and laboratory evaluation of powered electric toothbrushes: laboratory determination of relative interproximal cleaning efficiency of four powered toothbrushes. *J Clin Dent* 8 (3 Spec No): 81-85
64. Scheinin A and Makinen KK (1977) Sugar studies at Turku. *Dtsch Zahnärztl Z* 32 (5 Suppl 1): 76-83
65. Schweisheimer W (1969) Before the toothbrush was discovered. *Quintessenz* 20 (7): 149-150
66. Seichter U (1987) Parodontopathien, Zahncremes und Natriumlaurylsulfat. *Zahnärztl Mitt* 77 (20): 2253-2256

67. Sicilia A, Arregui I, Gallego M, Cabezas B and Cuesta S (2002) A systematic review of powered vs manual toothbrushes in periodontal cause-related therapy.  
J Clin Periodontol 29 Suppl 3: 39-54
68. Siegel S and Castellan NJ (1988) Nonparametric statistics for the behavioral sciences 2 ed.  
McGraw-Hill Book Company
69. Stoltze K and Bay L (1994) Comparison of a manual and a new electric toothbrush for controlling plaque and gingivitis.  
J Clin Periodontol 21 (2): 86-90
70. Van der Weijden GA, Timmerman MF, Versteeg PA and Piscoer M (2004) High and low brushing force in relation to efficacy and gingival abrasion.  
J Clin Periodontol 31 (8): 620-624
71. Vicentini BC, Braga SR and Sobral MA (2007) The measurement in vitro of dentine abrasion by toothpastes.  
Int Dent J 57 (5): 314-318
72. Vieira A, Lugtenborg M, Ruben JL and Huysmans MC (2006) Brushing abrasion of eroded bovine enamel pretreated with topical fluorides.  
Caries Res 40 (3): 224-230
73. Wiegand A, Begic M and Attin T (2006) In vitro evaluation of abrasion of eroded enamel by different manual, power and sonic toothbrushes.  
Caries Res 40 (1): 60-65
74. Wiegand A, Lemmrich F and Attin T (2006) Influence of rotating-oscillating, sonic and ultrasonic action of power toothbrushes on abrasion of sound and eroded dentine.  
J Periodontal Res 41 (3): 221-227
75. Wülknitz P (1997) Cleaning power and abrasivity of european toothpastes  
Adv Dent Res 11 (4): 576-579
76. Zimmer S, Barthel CR, Coffman L, Raab WH and Hefferren JJ (2005) Evaluation of dentin abrasion during professional tooth cleaning in an in vitro model.  
J Clin Periodontol 32 (9): 947-950



## 9 Anhang

### 9.1 Tabellen

Kennwerte Multiple-Comparisons-Test nach Dunn, Schmelz, 1-%-Quantil

| Bürste   | Nr. | 1 | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    |
|--|-----|---|------|------|------|------|------|------|------|
| <i>Professional Care 8500™/Flexi Soft™</i>               | 1   |   | 0,02 | 0,24 | 0,44 | 0,11 | 0,18 | 0,39 | 0,84 |
| <i>Professional Care 8500™/Extra Soft™</i>               | 2   |   |      | 0,22 | 0,48 | 0,13 | 0,17 | 0,38 | 0,88 |
| <i>Sonic Complete™/CrissCross®</i>                       | 3   |   |      |      | 0,70 | 0,36 | 0,05 | 0,16 | 1,10 |
| <i>Professional Care 9500 Triumph™/Micro Pulse™</i>      | 4   |   |      |      |      | 0,34 | 0,65 | 0,86 | 0,41 |
| <i>Sonicare® Elite e9000/Kleiner Bürstenkopf</i>         | 5   |   |      |      |      |      | 0,30 | 0,52 | 0,75 |
| <i>Sonicare® Elite e9000/Großer Bürstenkopf</i>          | 6   |   |      |      |      |      |      | 0,22 | 1,05 |
| <i>Sonicare® Flexcare 900 series/Kleiner Bürstenkopf</i> | 7   |   |      |      |      |      |      |      | 1,27 |
| <i>Sonicare® Flexcare 900 series/Großer Bürstenkopf</i>  | 8   |   |      |      |      |      |      |      |      |

**Tabelle 14:** Größte Abrasionsdefekte im Schmelz  
Signifikante Kennwerte ( $p < 0,05$ ) markiert

## Kennwerte Multiple-Comparisons-Test nach Dunn, Schmelz, Mittelwert

| Bürste   | Nr. | 1 | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    |
|--|-----|---|------|------|------|------|------|------|------|
| <i>Professional Care 8500™/Flexi Soft™</i>               | 1   |   | 0,47 | 0,15 | 0,17 | 0,22 | 0,44 | 0,61 | 0,54 |
| <i>Professional Care 8500™/Extra Soft™</i>               | 2   |   |      | 0,63 | 0,31 | 0,70 | 0,93 | 1,11 | 0,07 |
| <i>Sonic Complete™/CrissCross®</i>                       | 3   |   |      |      | 0,33 | 0,07 | 0,30 | 0,48 | 0,71 |
| <i>Professional Care 9500 Triumph™/Micro Pulse™</i>      | 4   |   |      |      |      | 0,40 | 0,62 | 0,80 | 0,38 |
| <i>Sonicare® Elite e9000/Kleiner Bürstenkopf</i>         | 5   |   |      |      |      |      | 0,22 | 0,41 | 0,78 |
| <i>Sonicare® Elite e9000/Großer Bürstenkopf</i>          | 6   |   |      |      |      |      |      | 0,18 | 1,00 |
| <i>Sonicare® Flexcare 900 series/Kleiner Bürstenkopf</i> | 7   |   |      |      |      |      |      |      | 1,18 |
| <i>Sonicare® Flexcare 900 series/Großer Bürstenkopf</i>  | 8   |   |      |      |      |      |      |      |      |

**Tabelle 15:** Mittlere Abrasionsdefekte im Schmelz  
Signifikante Kennwerte ( $p < 0,05$ ) markiert

## Kennwerte Multiple-Comparisons-Test nach Dunn, Dentin, 1-%-Quantil

| Bürste   | Nr. | 1 | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    |
|--|-----|---|------|------|------|------|------|------|------|
| <i>Professional Care 8500™/Flexi Soft™</i>               | 1   |   | 0,06 | 0,12 | 0,52 | 0,24 | 0,17 | 1,22 | 0,73 |
| <i>Professional Care 8500™/Extra Soft™</i>               | 2   |   |      | 0,06 | 0,47 | 0,18 | 0,24 | 1,19 | 0,68 |
| <i>Sonic Complete™/CrissCross®</i>                       | 3   |   |      |      | 0,41 | 0,12 | 0,30 | 1,13 | 0,62 |
| <i>Professional Care 9500 Triumph™/Micro Pulse™</i>      | 4   |   |      |      |      | 0,29 | 0,71 | 0,72 | 0,21 |
| <i>Sonicare® Elite e9000/Kleiner Bürstenkopf</i>         | 5   |   |      |      |      |      | 0,42 | 1,01 | 0,50 |
| <i>Sonicare® Elite e9000/Großer Bürstenkopf</i>          | 6   |   |      |      |      |      |      | 1,43 | 0,92 |
| <i>Sonicare® Flexcare 900 series/Kleiner Bürstenkopf</i> | 7   |   |      |      |      |      |      |      | 0,51 |
| <i>Sonicare® Flexcare 900 series/Großer Bürstenkopf</i>  | 8   |   |      |      |      |      |      |      |      |

**Tabelle 16:** Größte Abrasionsdefekte im Dentin  
Signifikante Kennwerte ( $p < 0,05$ ) markiert

**Kennwerte Multiple-Comparisons-Test nach Dunn, Dentin, Mittelwert**

| Bürste   | Nr. | 1 | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    |
|--|-----|---|------|------|------|------|------|------|------|
| <i>Professional Care 8500™/Flexi Soft™</i>               | 1   |   | 0,06 | 0,48 | 0,30 | 0,31 | 0,15 | 0,85 | 0,89 |
| <i>Professional Care 8500™/Extra Soft™</i>               | 2   |   |      | 0,43 | 0,37 | 0,26 | 0,09 | 0,94 | 0,98 |
| <i>Sonic Complete™/CrissCross®</i>                       | 3   |   |      |      | 0,80 | 0,17 | 0,34 | 1,37 | 1,41 |
| <i>Professional Care 9500 Triumph™/Micro Pulse™</i>      | 4   |   |      |      |      | 0,63 | 0,46 | 0,56 | 0,61 |
| <i>Sonicare® Elite e9000/Kleiner Bürstenkopf</i>         | 5   |   |      |      |      |      | 0,17 | 1,20 | 1,24 |
| <i>Sonicare® Elite e9000/Großer Bürstenkopf</i>          | 6   |   |      |      |      |      |      | 1,03 | 1,07 |
| <i>Sonicare® Flexcare 900 series/Kleiner Bürstenkopf</i> | 7   |   |      |      |      |      |      |      | 0,04 |
| <i>Sonicare® Flexcare 900 series/Großer Bürstenkopf</i>  | 8   |   |      |      |      |      |      |      |      |

**Tabelle 17:** Mittlere Abrasionsdefekte im Dentin  
Signifikante Kennwerte ( $p < 0,05$ ) markiert

## Kennwerte Multiple-Comparisons-Test nach Dunn, Schmelz/Dentin, 1%-Quantil

| Bürste   | Nr. | 1 | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    |
|--|-----|---|------|------|------|------|------|------|------|
| <i>Professional Care 8500™/Flexi Soft™</i>               | 1   |   | 0,03 | 0,20 | 0,09 | 0,05 | 0,07 | 1,07 | 0,07 |
| <i>Professional Care 8500™/Extra Soft™</i>               | 2   |   |      | 0,18 | 0,07 | 0,02 | 0,04 | 1,07 | 0,10 |
| <i>Sonic Complete™/CrissCross®</i>                       | 3   |   |      |      | 0,11 | 0,15 | 0,14 | 0,89 | 0,27 |
| <i>Professional Care 9500 Triumph™/Micro Pulse™</i>      | 4   |   |      |      |      | 0,04 | 0,02 | 1,00 | 0,16 |
| <i>Sonicare® Elite e9000/Kleiner Bürstenkopf</i>         | 5   |   |      |      |      |      | 0,02 | 1,04 | 0,12 |
| <i>Sonicare® Elite e9000/Großer Bürstenkopf</i>          | 6   |   |      |      |      |      |      | 1,03 | 0,14 |
| <i>Sonicare® Flexcare 900 series/Kleiner Bürstenkopf</i> | 7   |   |      |      |      |      |      |      | 1,17 |
| <i>Sonicare® Flexcare 900 series/Großer Bürstenkopf</i>  | 8   |   |      |      |      |      |      |      |      |

**Tabelle 18:** Abrasionsverhältnis Schmelz/Dentin  
Signifikante Kennwerte ( $p < 0,05$ ) markiert

## 9.2 Diagramme

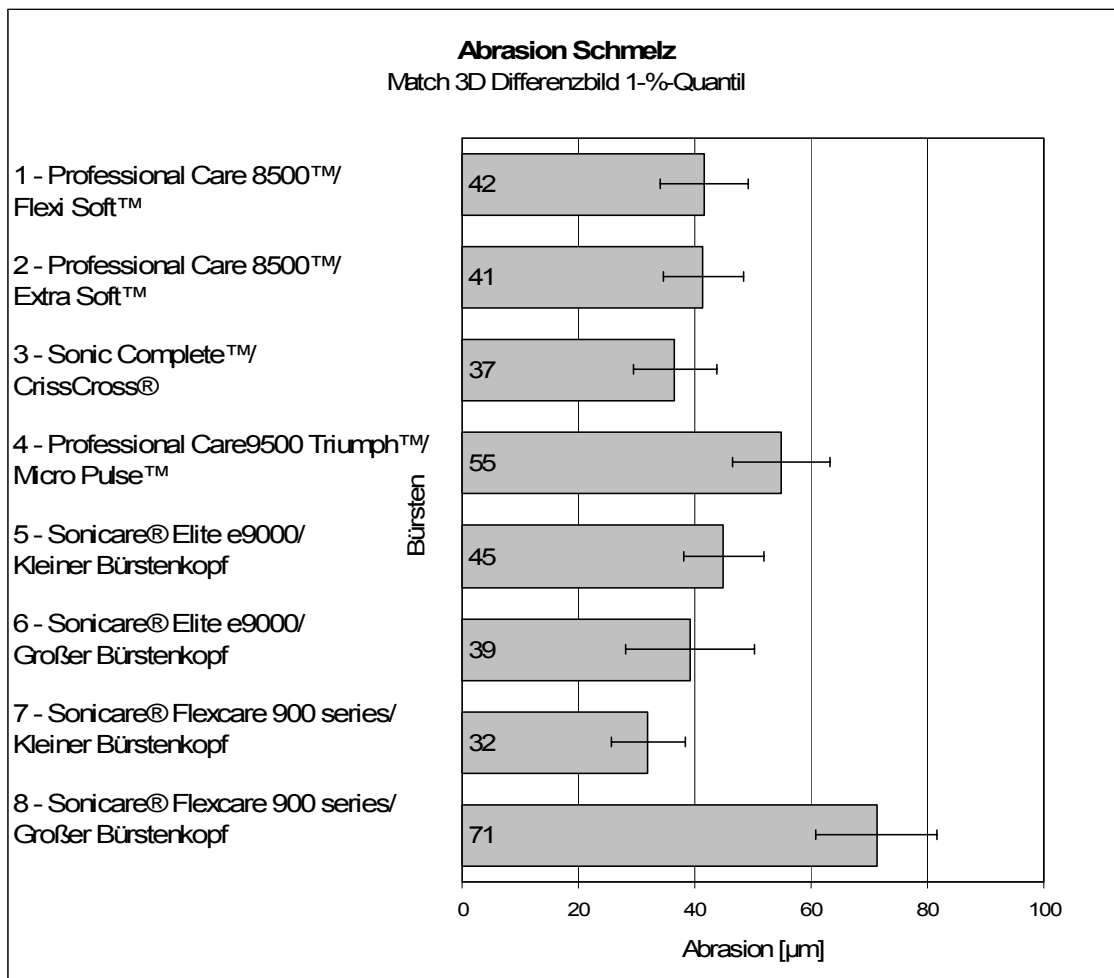
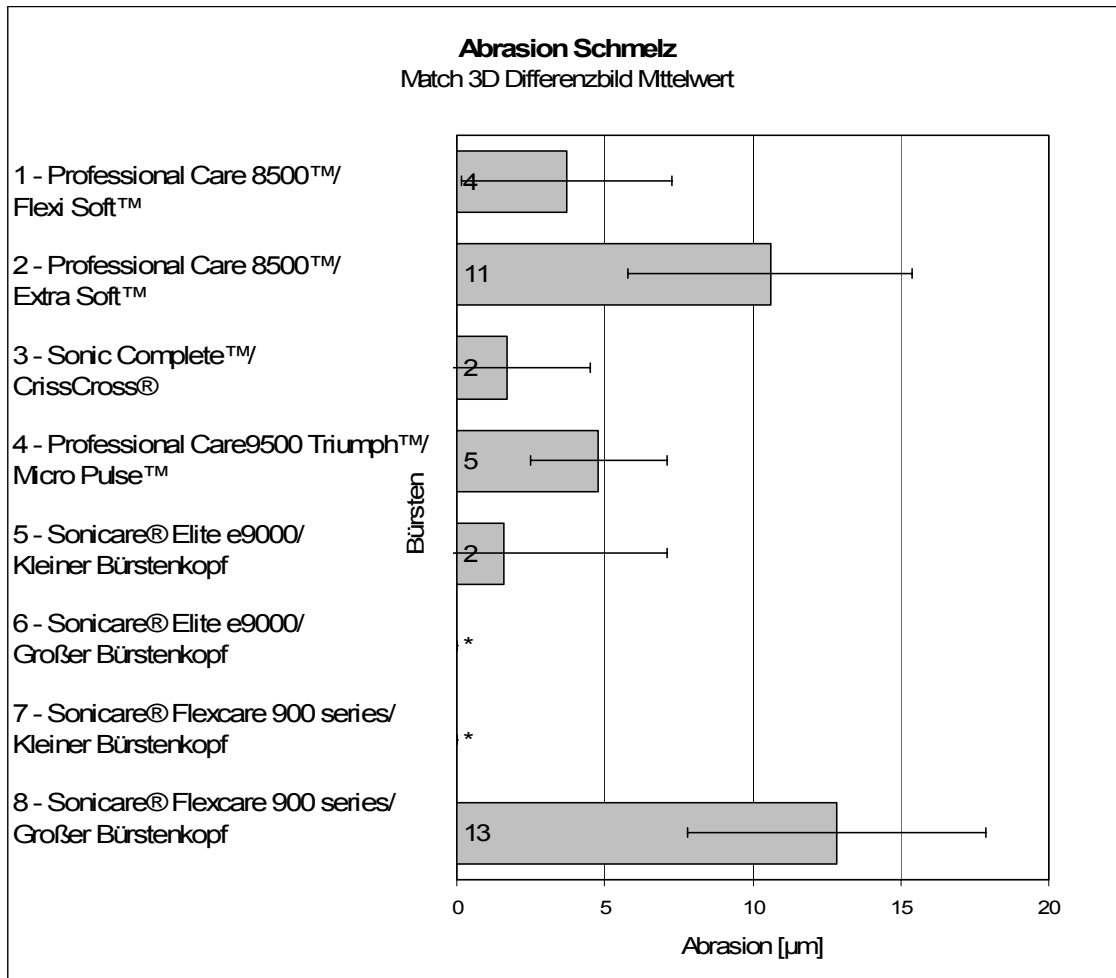
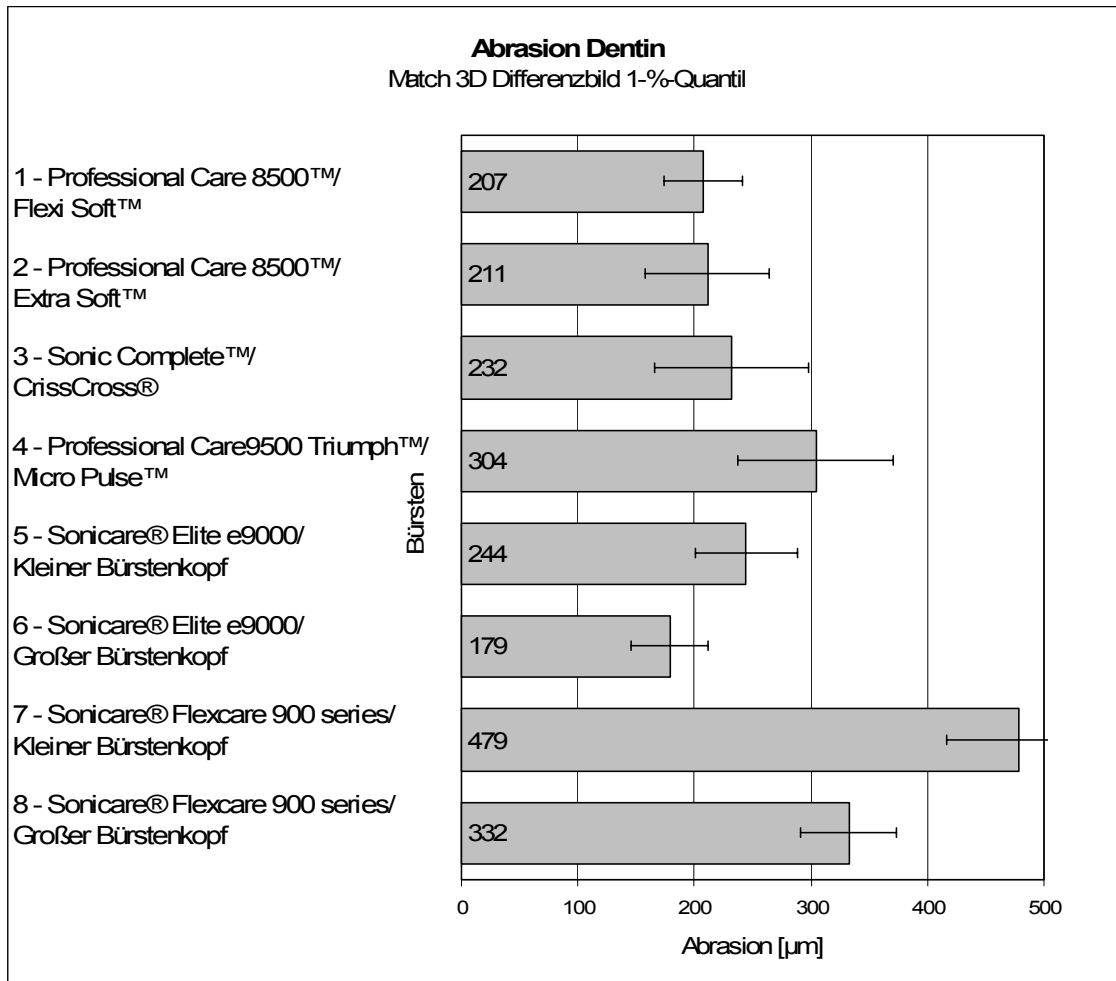


Abbildung 20: Größte Defekttiefen im Schmelz

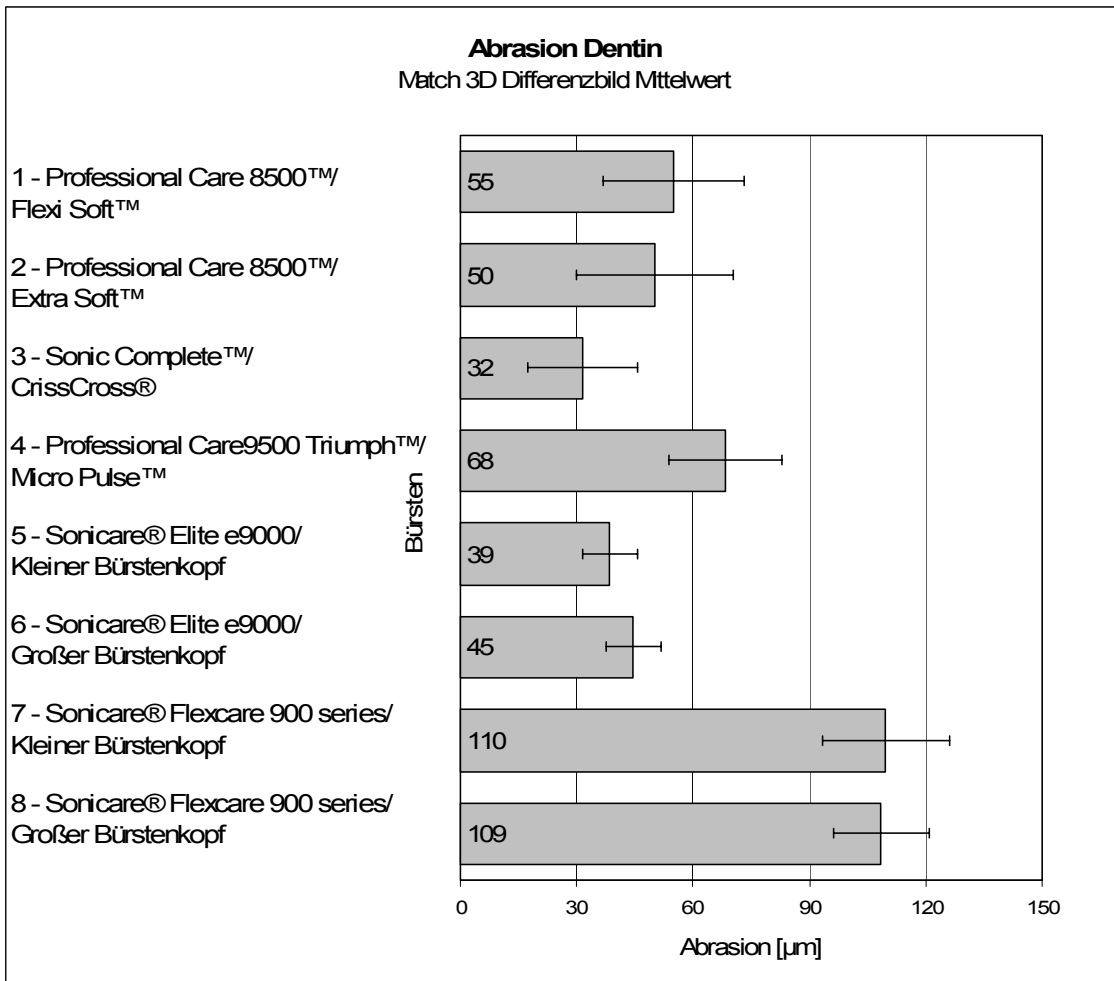


**Abbildung 21:** Mittlere Defekttiefen im Schmelz (\*Messgenauigkeit des Scan-3D-Verfahrens beträgt 10 µm; negative Werte wurden als Artefakte ausgeschlossen)

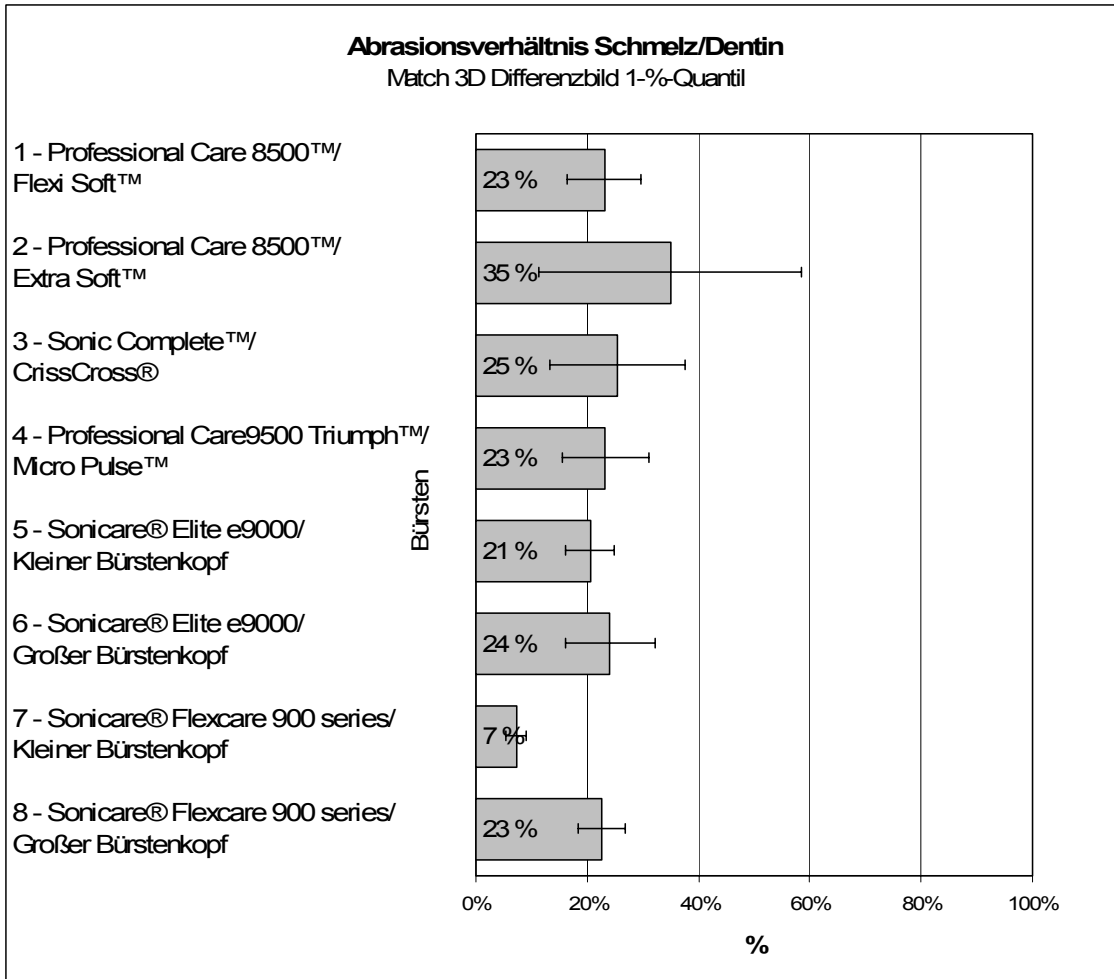


**Abbildung 22:** Größte Defekttiefen im Dentin

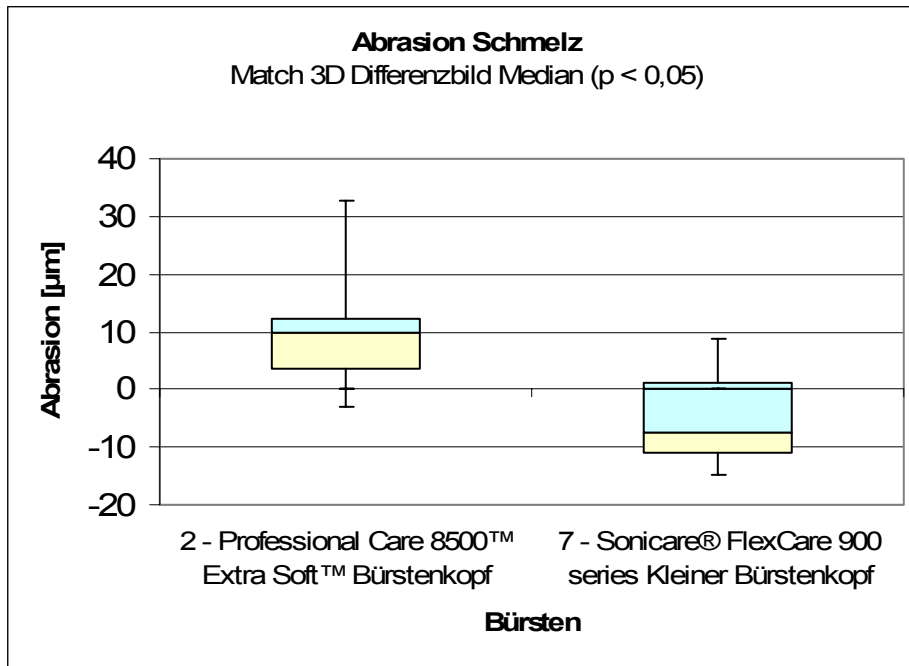




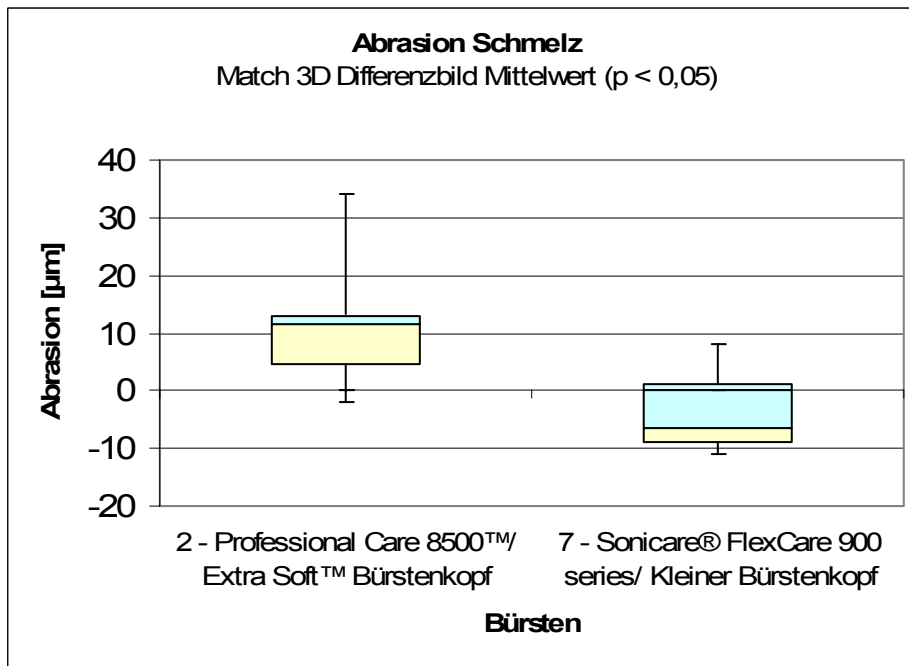
**Abbildung 23:** Mittlere Defekttiefen im Dentin



**Abbildung 24:** Abrasionsverhältnis Schmelz/Dentin



**Abbildung 25:** Mittlere Defekttiefen der Bürsten 2 und 7 im Schmelz



**Abbildung 26:** Mittlere Defekttiefen der Bürsten 2 und 7 im Schmelz

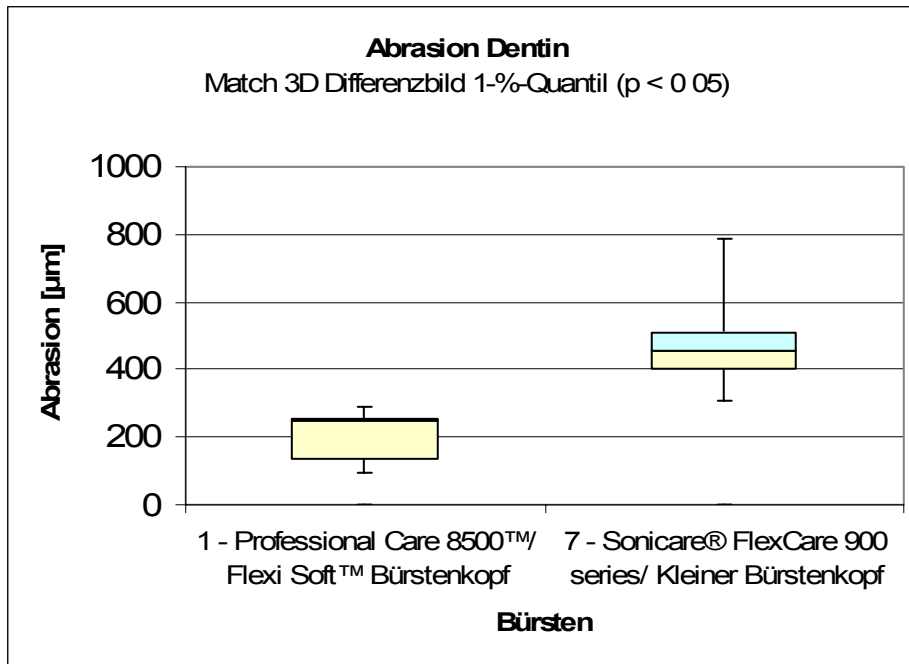


Abbildung 27: Größte Defekttiefen der Bürsten 1 und 7 im Dentin

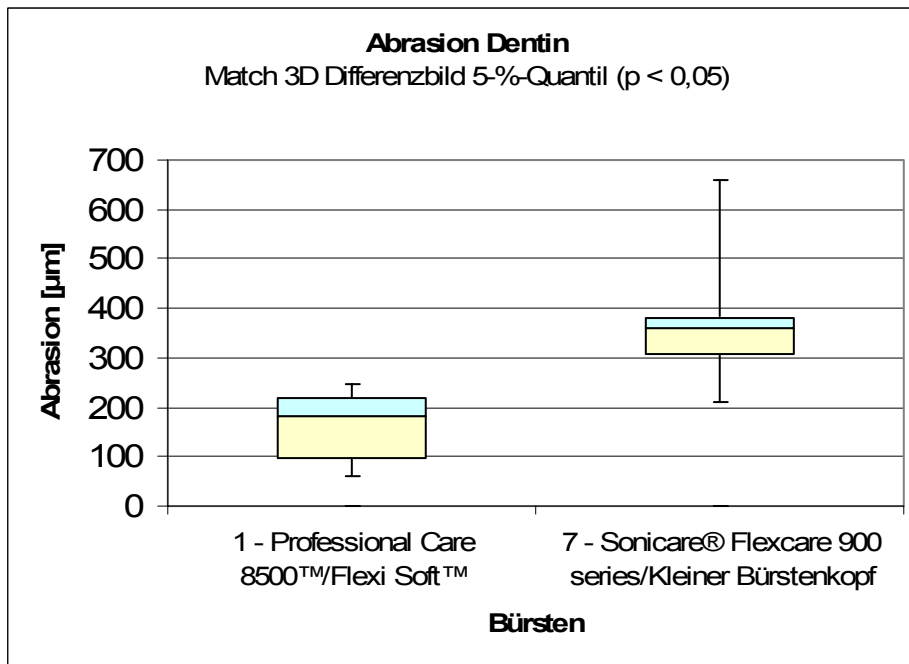
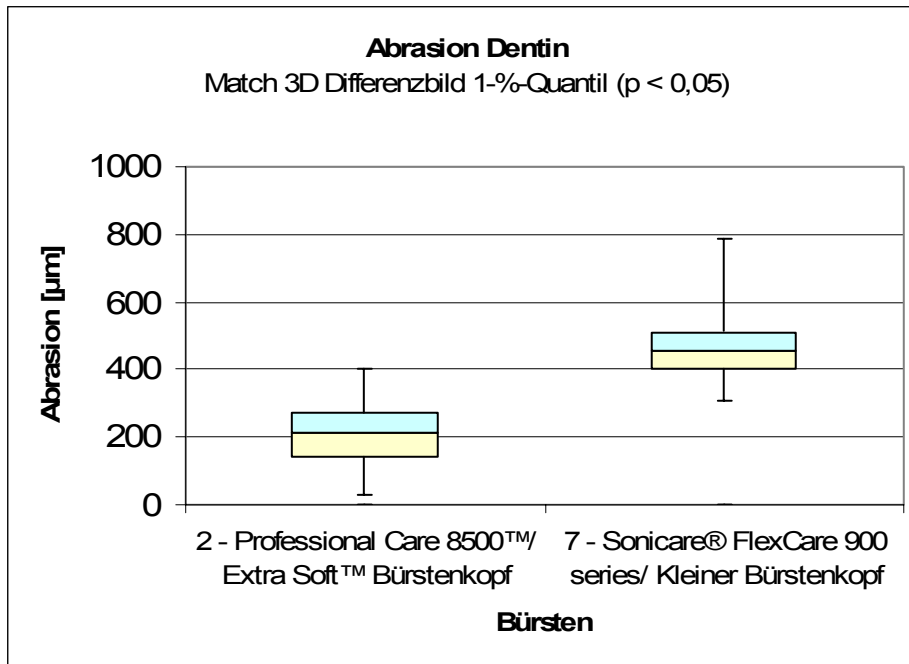
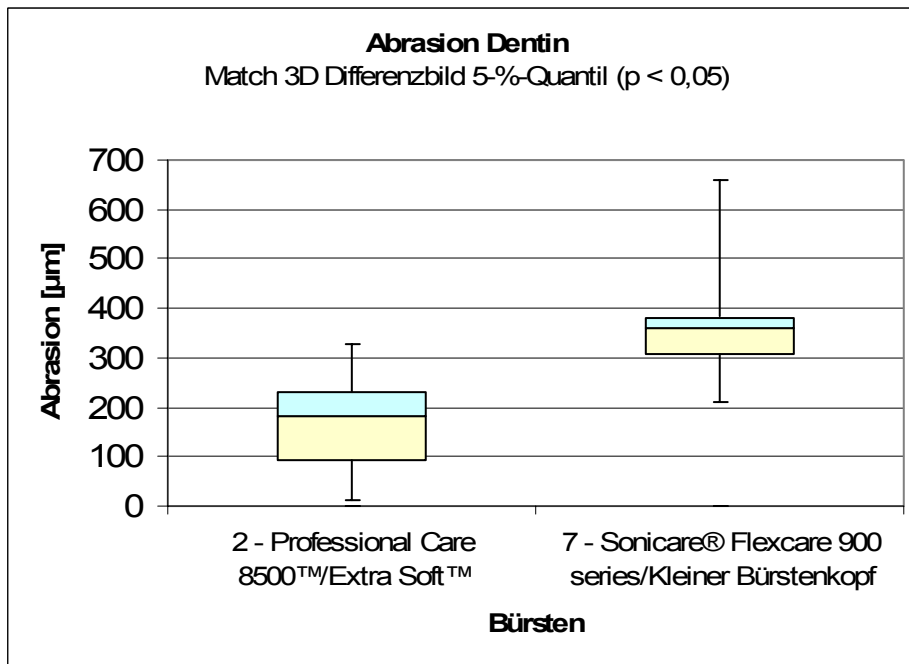


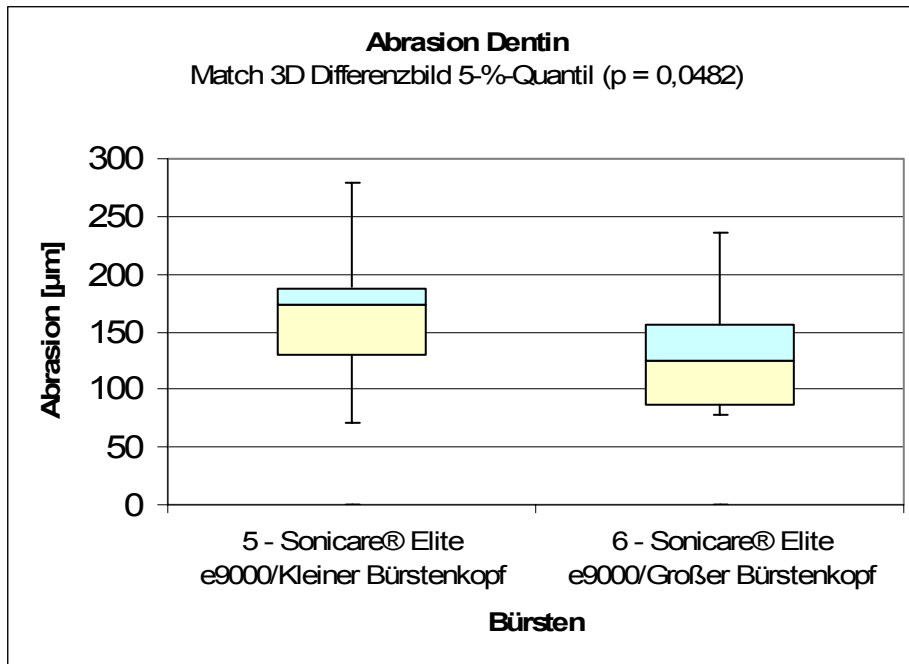
Abbildung 28: Größte Defekttiefen der Bürsten 1 und 7 im Dentin



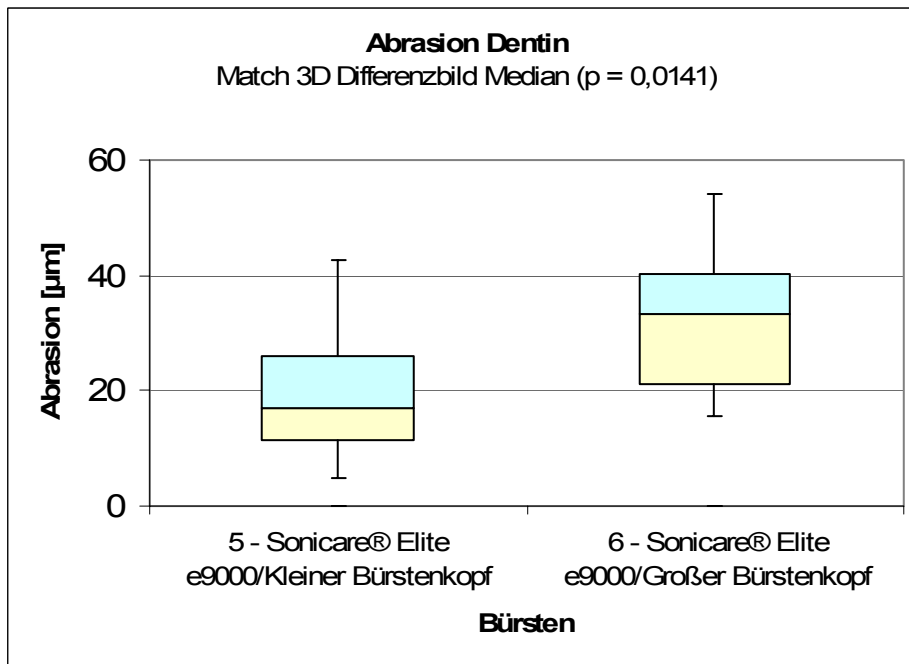
**Abbildung 29:** Größte Defekttiefen der Bürsten 2 und 7 im Dentin



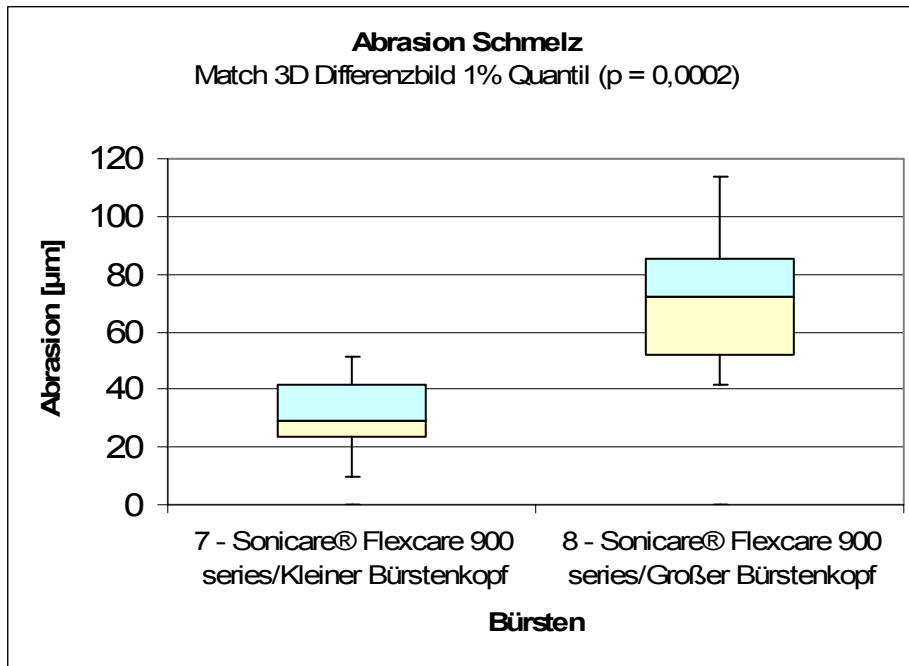
**Abbildung 30:** Größte Defekttiefen der Bürsten 2 und 7 im Dentin



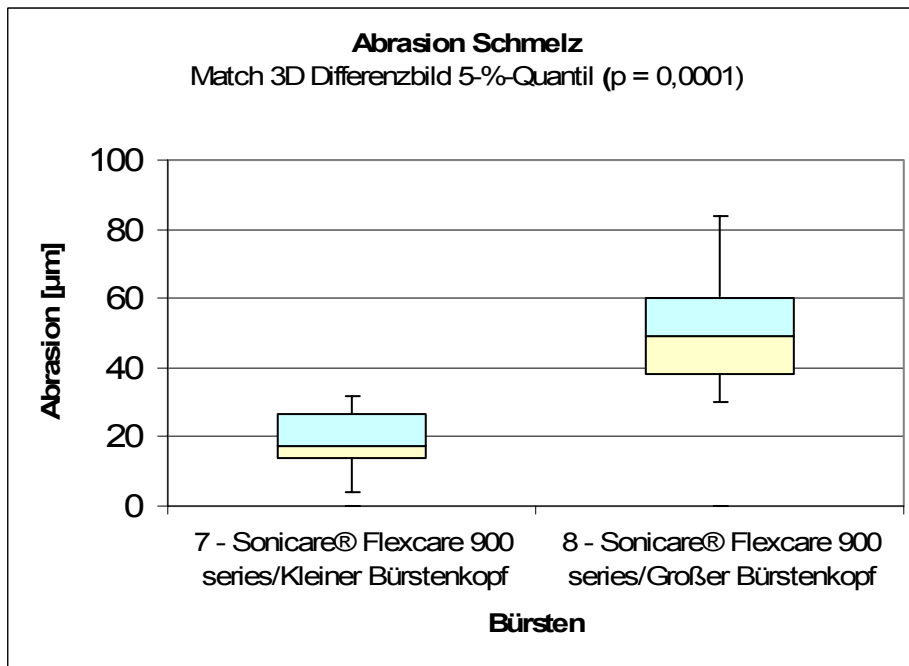
**Abbildung 31:** Größte Defekttiefen der Bürsten 5 und 6 im Dentin



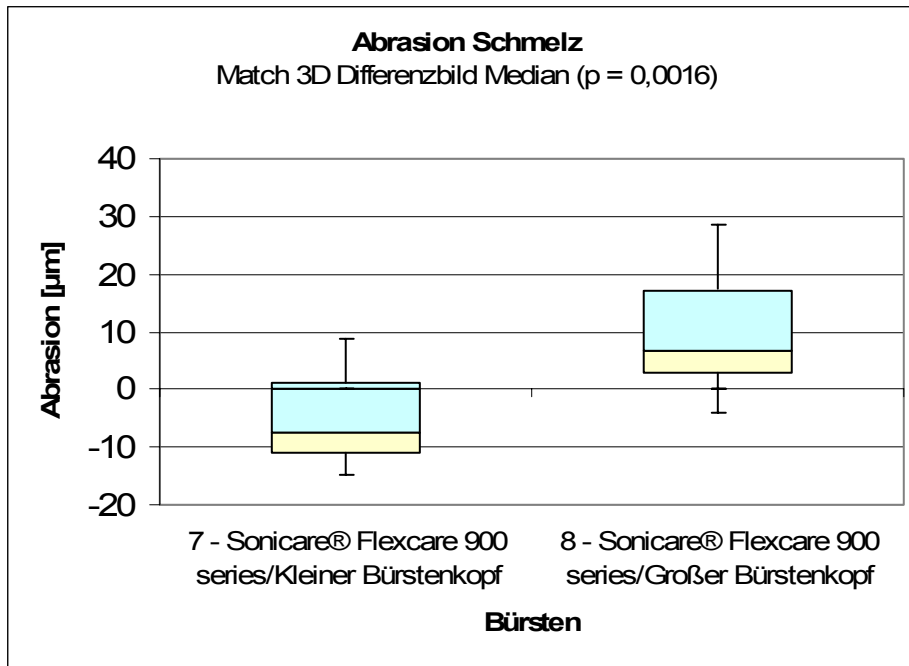
**Abbildung 32:** Mittlere Defekttiefen der Bürsten 5 und 6 im Dentin



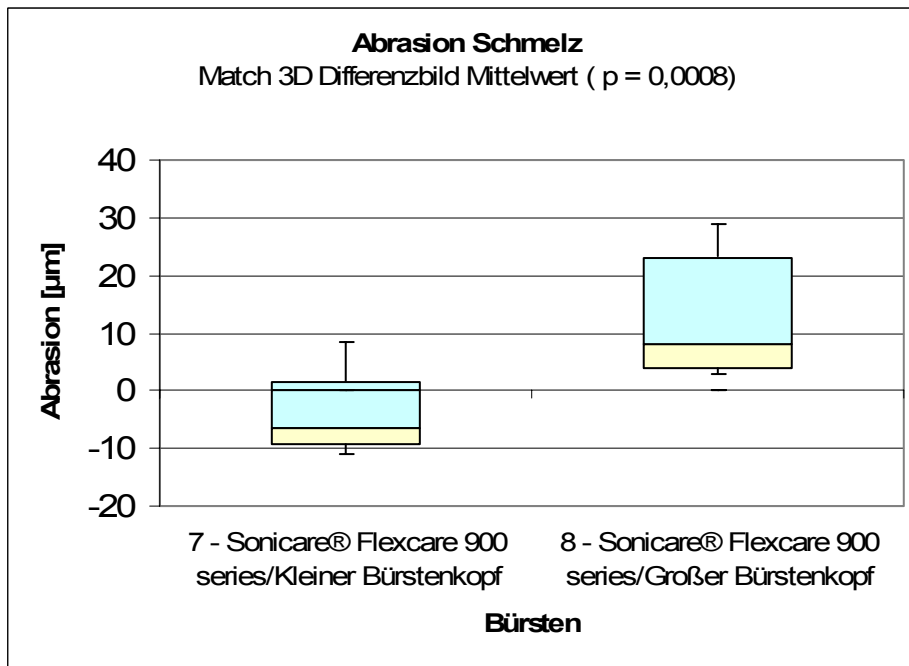
**Abbildung 33:** Größte Defekttiefen der Bürsten 7 und 8 im Schmelz



**Abbildung 34:** Größte Defekttiefen der Bürsten 7 und 8 im Schmelz



**Abbildung 35:** Mittlere Defekttiefen der Bürsten 7 und 8 im Schmelz



**Abbildung 36:** Mittlere Defekttiefen der Bürsten 7 und 8 im Schmelz



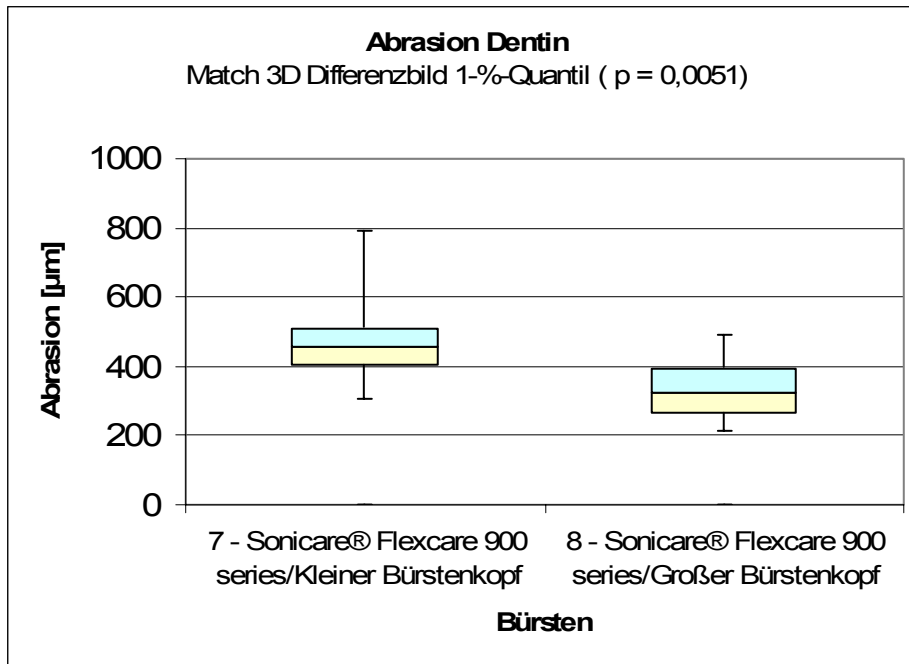


Abbildung 37: Größte Defekttiefen der Bürsten 7 und 8 im Dentin

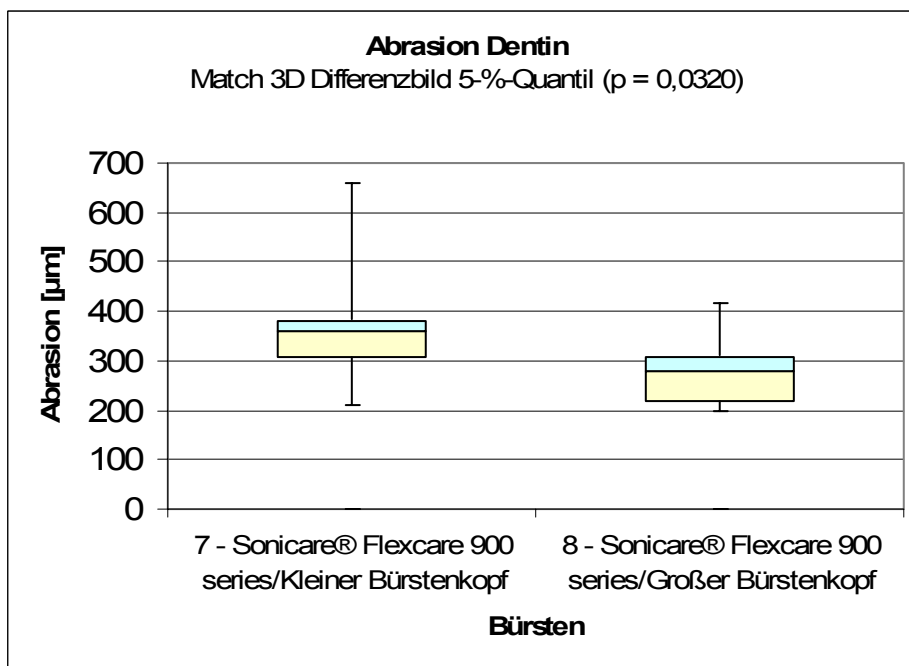
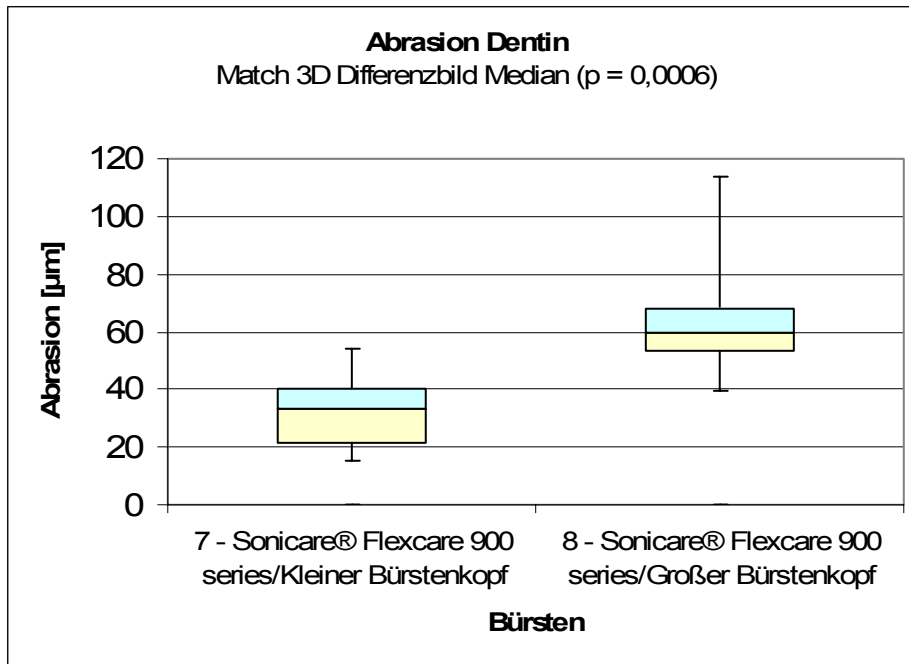
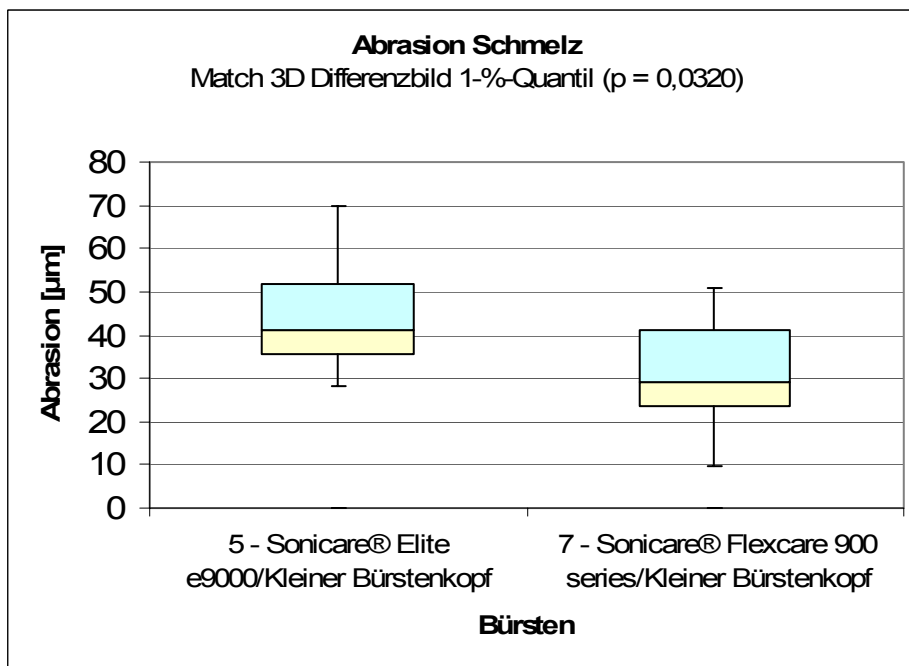


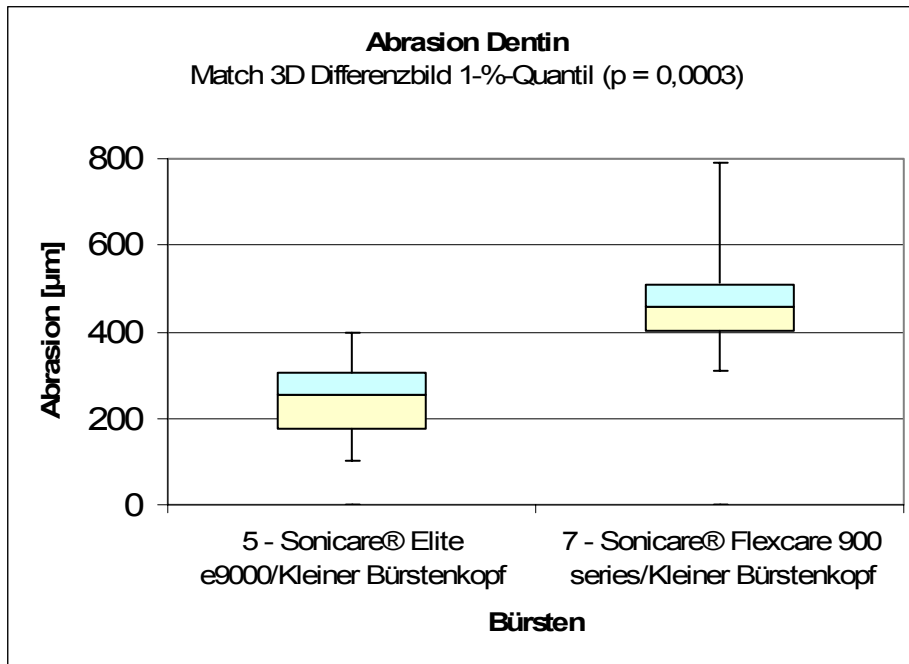
Abbildung 38: Größte Defekttiefen der Bürsten 7 und 8 im Dentin



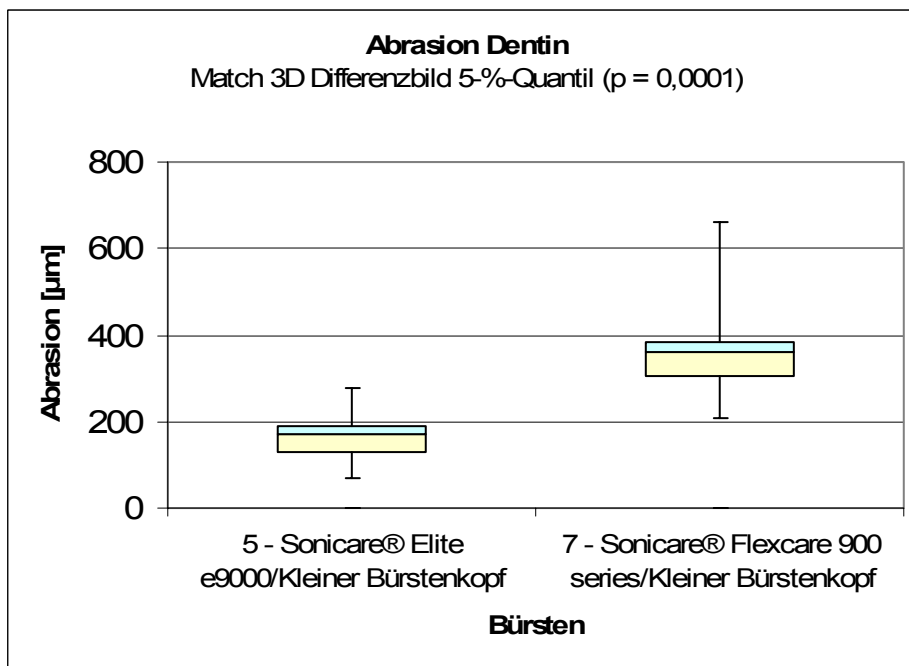
**Abbildung 39:** Mittlere Defekttiefen der Bürsten 7 und 8 im Dentin



**Abbildung 40:** Mittlere Defekttiefen der Bürsten 5 und 7 im Schmelz



**Abbildung 41:** Größte Defekttiefen der Bürsten 5 und 7 im Dentin



**Abbildung 42:** Größte Defekttiefen der Bürsten 5 und 7 im Dentin

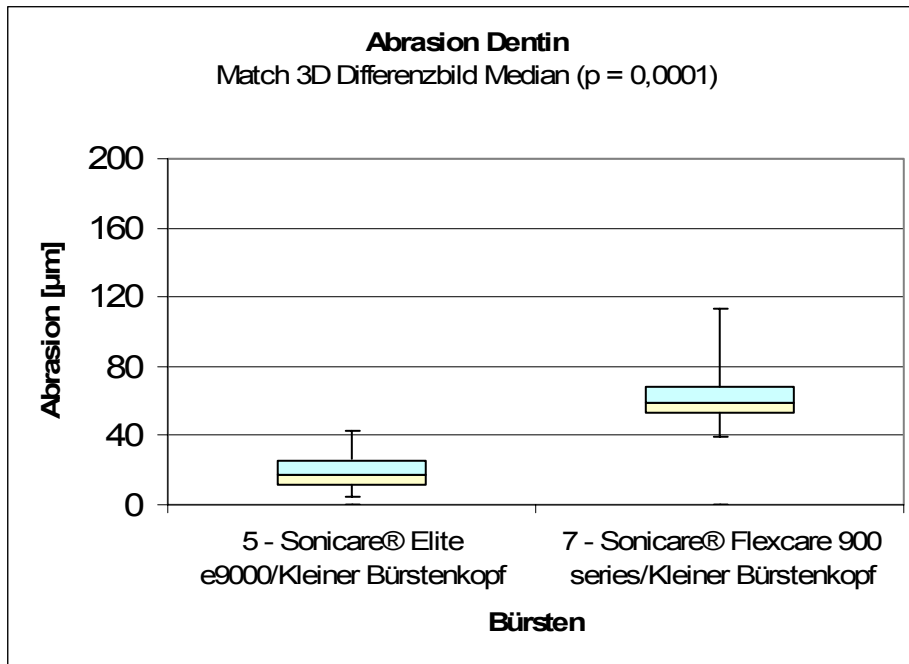


Abbildung 43: Mittlere Defekttiefen der Bürsten 5 und 7 im Dentin

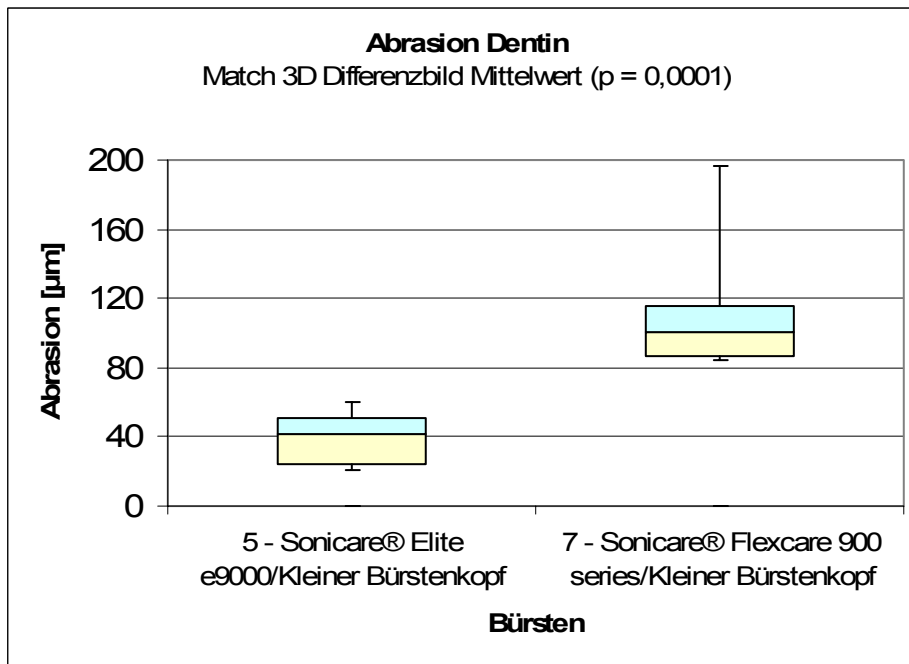
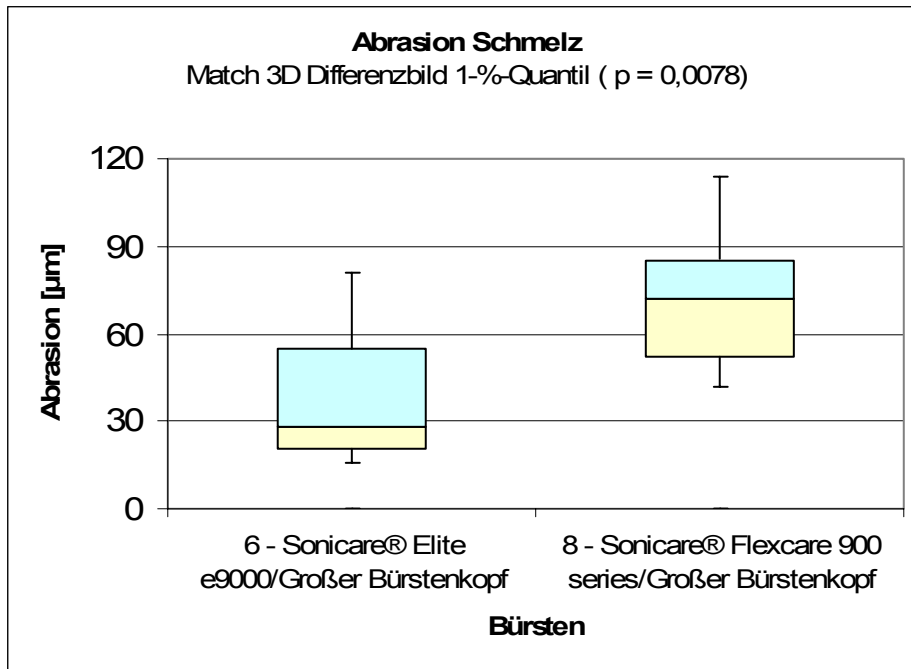
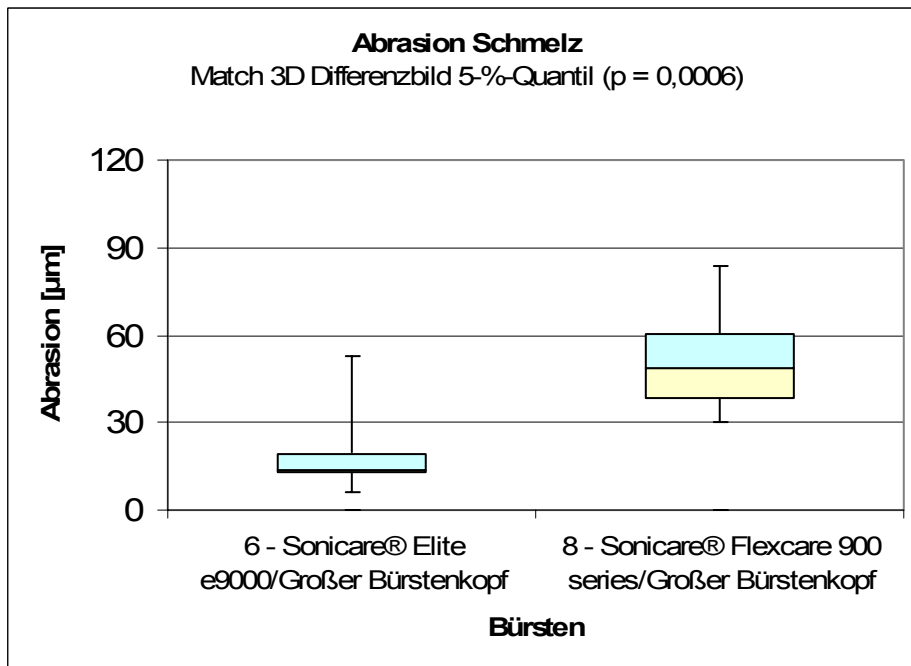


Abbildung 44: Mittlere Defekttiefen der Bürsten 5 und 7 im Dentin



**Abbildung 45:** Größte Defekttiefen der Bürsten 6 und 8 im Schmelz



**Abbildung 46:** Größte Defekttiefen der Bürsten 6 und 8 im Schmelz

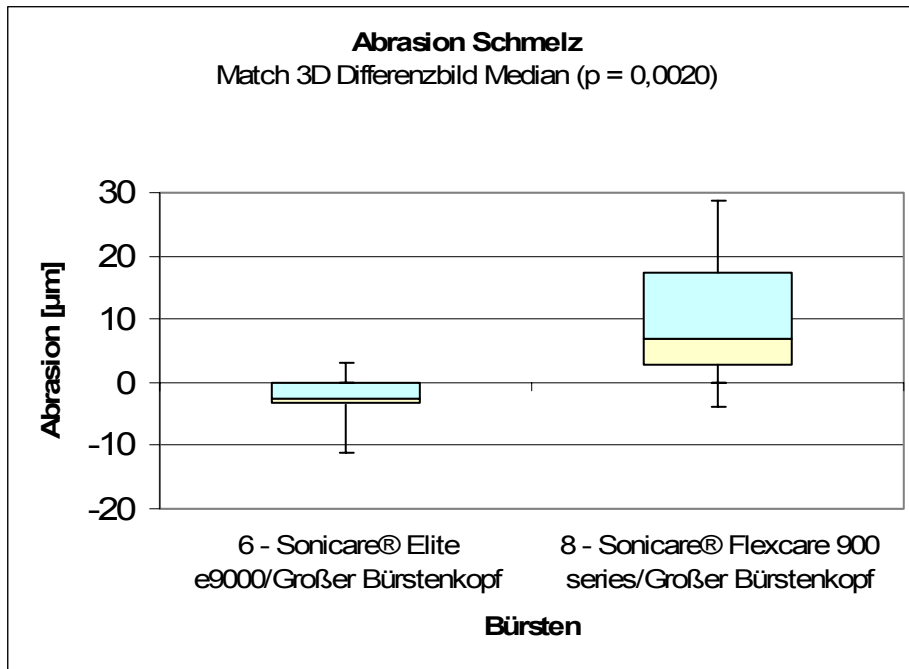


Abbildung 47: Mittlere Defekttiefen der Bürsten 6 und 8 im Schmelz

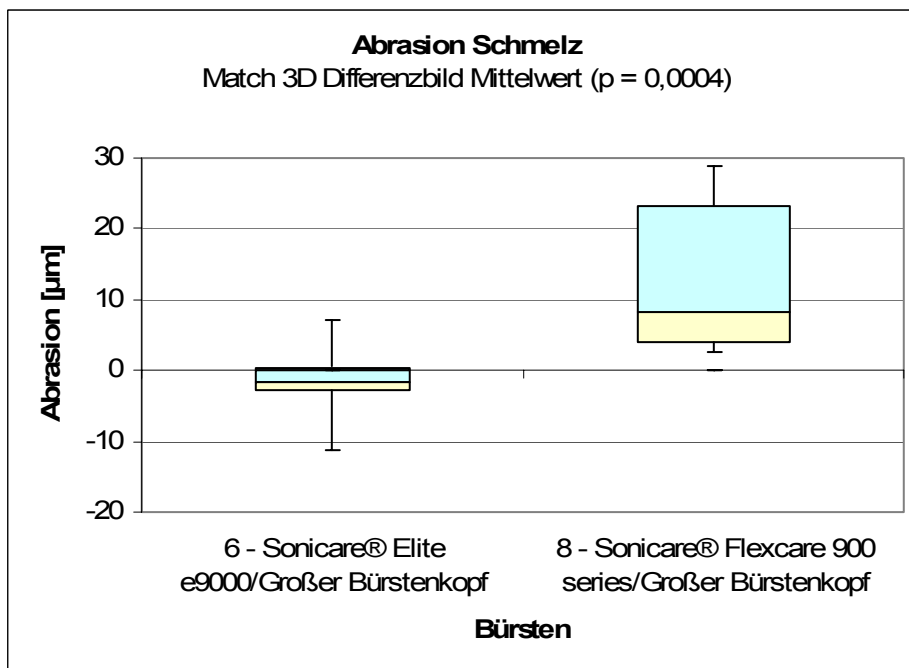


Abbildung 48: Mittlere Defekttiefen der Bürsten 6 und 8 im Schmelz

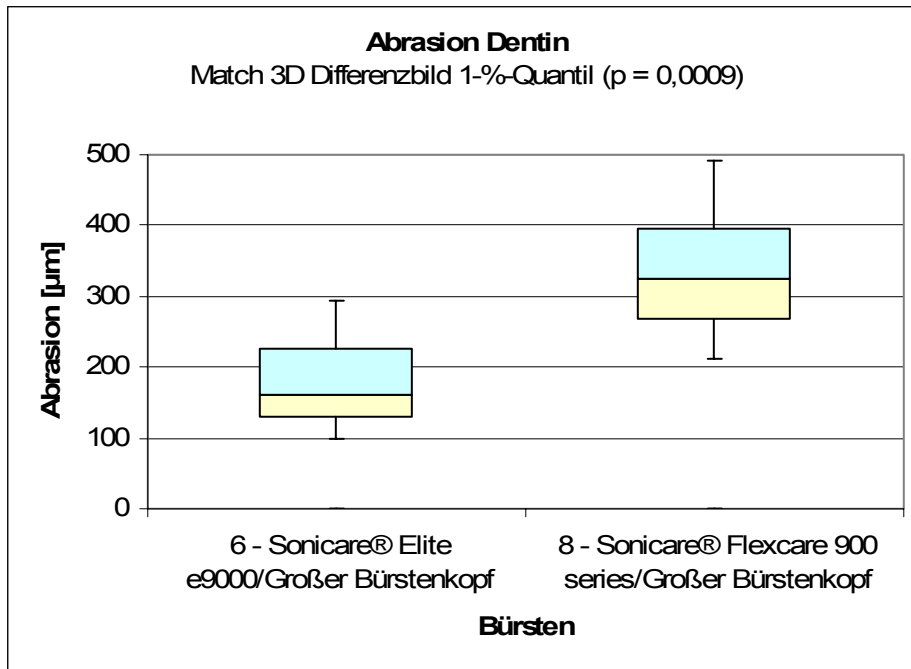


Abbildung 49: Größte Defekttiefen der Bürsten 6 und 8 im Dentin

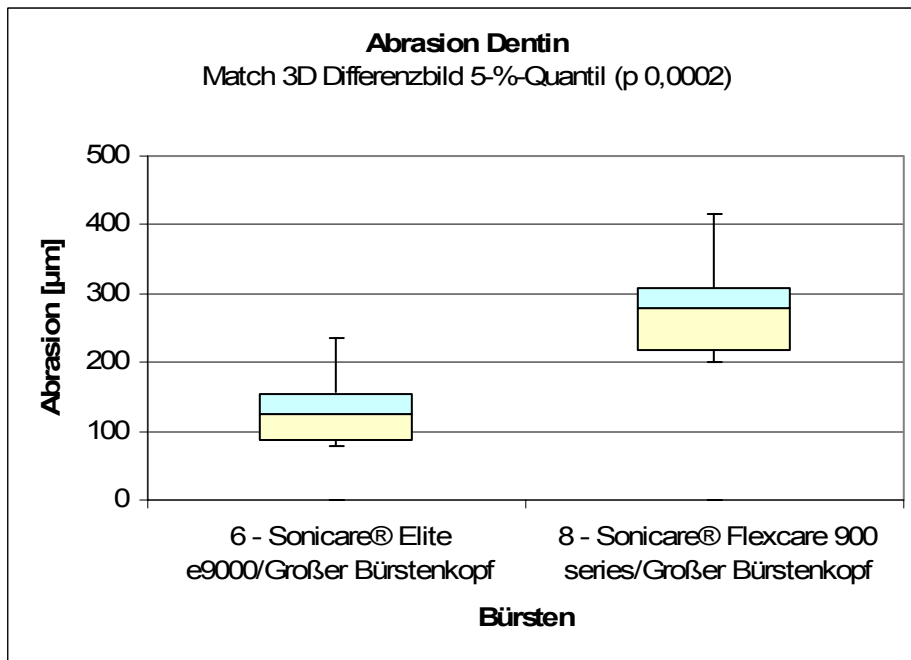


Abbildung 50: Größte Defekttiefen der Bürsten 6 und 8 im Dentin

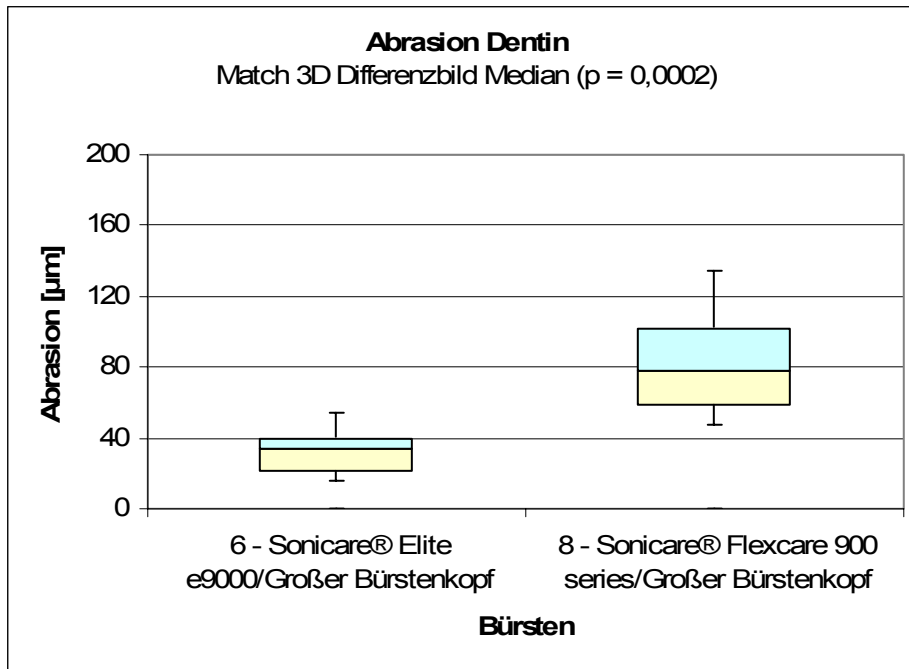


Abbildung 51: Mittlere Defekttiefen der Bürsten 6 und 8 im Dentin

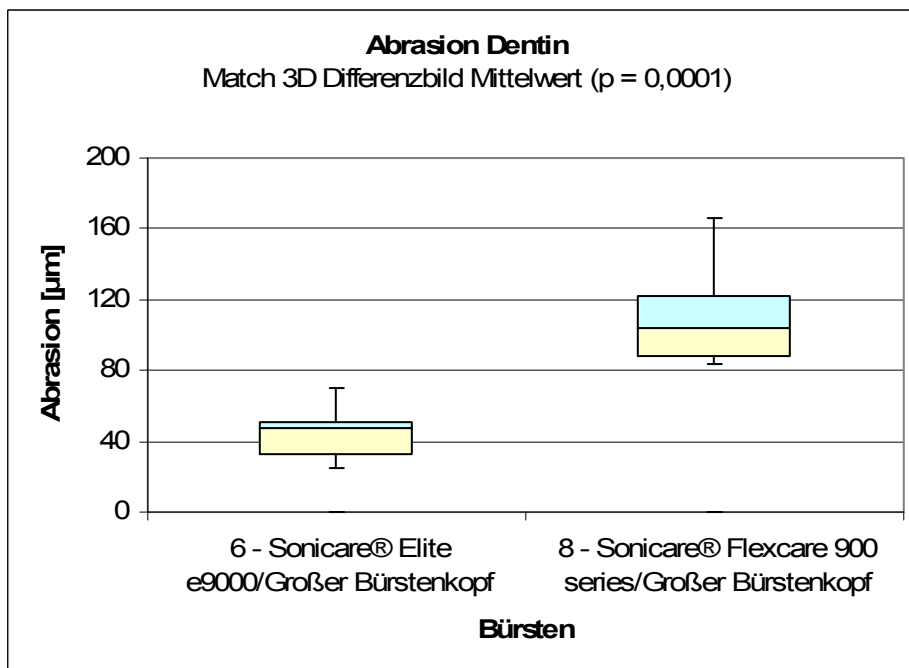


Abbildung 52: Mittlere Defekttiefen der Bürsten 6 und 8 im Dentin



## 10 Danksagung

Mein Dank gilt Herrn Professor Dr. Ott für die freundliche Überlassung des interessanten Themas. Außerdem schulde ich ihm Dank für die großzügige Bereitstellung der Räumlichkeiten, der Apparaturen und der Materialien. Ohne die Herstellung der Kontakte zur LMU München durch Herrn Professor Ott und die dadurch ermöglichte Nutzung des Laserscan-3D-Gerätes und der Match-3D-Software hätte die Untersuchung nicht durchgeführt werden können.

Herrn Oberarzt Dr. Kaup danke ich nicht nur für sein Interesse am Fortgang der Arbeit und für fruchtbare Diskussionen, sondern auch für seine ergebnisorientierten Vorschläge, durch die auftretende Probleme stets einer schnellen und praktikablen Lösung zugeführt wurden. Er war mir jederzeit ein echter Ansprechpartner. Seine wissenschaftliche Kompetenz und seine vorbildliche Betreuung dieser Arbeit verdienen höchste Anerkennung. Zudem bewies er großes Engagement und hohe Flexibilität bei der Vermessung der Proben.

Herrn Dr. Duda danke ich für die Einbringung seiner Erfahrungen im Umgang mit dem Industrieroboter und dessen Programmierung sowie für seine unkomplizierten, praktischen Hinweise und Lösungsansätze.

Meinem Onkel, Herrn Prof. Dr. Werner Baumeister (Flensburg) danke ich für seine umfassende Beratung in allen Fragen der statistischen Auswertung.

Schließlich danke ich Herrn Dr. Schubert (Krefeld) für seine qualifizierten Ratschläge und vor allem für die zuverlässige und schnelle Bereitstellung einer beträchtlichen Anzahl von extrahierten Zähnen.

## 11 Lebenslauf