

Aus der Poliklinik für Zahnerhaltung und Parodontologie
der Universität München
Vorstand: Prof. Dr. R. Hickel

**DREI-MEDIEN-ABRIEB VON KOMPOSITEN
IN EINER 2 ACHSEN-ZAHNBÜRSTMASCHINE**

Dissertation
zum Erwerb des Doktorgrades der Zahnheilkunde
an der Medizinischen Fakultät der
Ludwig-Maximilians-Universität zu München

Vorgelegt von
Andreas Singer
aus München
1996

Mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät
der Universität München

Berichterstatter: Prof. Dr. R. Hickel

Mitberichterstatter: Prof. Dr. I. Rudzki-Janson
Prof. Dr. E.-R. Weissenbacher

Mitbetreuung durch den
promovierten Mitarbeiter: OA Dr. K.-H. Kunzelmann

Dekan: Prof. Dr. med. Dr. h.c. K. Peter

Tag der mündlichen Prüfung: 30.04.1996

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung und Problemstellung	1
2 Literaturübersicht	3
2.1 Verschleißmechanismen dentaler Füllungsmaterialien	3
2.2 Dentin- und Schmelzabrieb durch Zahnbürste und -paste	5
2.3 Zahnbürsten/Zahnpastenabrasion verschiedener dentaler Füllungsmaterialien	9
2.4 Übersicht über In-vitro-Zahnbürsten/Zahnpastenabriebstudien	15
3 Material und Methode	21
3.1 Prüfkörper	21
3.1.1 verwendete Füllungsmaterialien	21
3.1.2 Prüfkörperherstellung	22
3.2 Versuchsaufbau	25
3.2.1 Zahnbürstmaschine	25
3.3 Versuchsdurchführung	30
3.4 Herstellung des Abrasivmediums	31
3.5 Quantitative Abriebsmessung	32
3.6 Morphologische Verschleißanalyse	36

4 Ergebnisse	37	5 Diskussion	69
4.1 Experimentelle Kompositmaterialien (Resine)	37	5. 1 Quantitative Abriebsmessung	69
4.1.1 Volumetrischer Verschleiß im zeitlichen Verlauf	39	5. 2 Abriebswerte im zeitlichen Verlauf	70
4.1.2 Ranking der Resine in Bezug auf ihre Abrasionsfestigkeit	39	5. 3 Einfluß der Bürstenbewegungsart auf die Abriebswerte	71
4.1.3 Einfluß von Wasserlagerungszeitraum und Bürstbewegungsart auf das Verschleißverhalten der Resine	43	5. 4 Unterschiedliche Abrasionsfestigkeit der getesteten Füllungsmaterialien	72
4.1.4 Wasseraufnahmen der Resine	44	5. 5 Einfluß des Wasserlagerungszeitraums auf die Abriebsfestigkeit	73
4.2 Überwiegend mikrogefüllte Kompositmaterialien	44	5. 6 Wasseraufnahme der Kompositmaterialien	74
4.2.1 Abriebsverhalten im zeitlichen Verlauf	44	5. 7 Betrachtung der Oberflächen mit dem Rasterelektronenmikroskop	75
4.2.2 Ranking von Durafill® und Heliomolar radiopaque® in Bezug auf ihre Abrasionsfestigkeit	45	5. 8 Potential der 2 Achsen-Zahnbürstmaschine und Optionen für die Zukunft	77
4.2.3 Einfluß von Wasserlagerungszeitraum und Bürstbewegungsart auf das Verschleißverhalten von Durafill® und Heliomolar radiopaque®	47	5. 9 Diskussion der Fehlermöglichkeiten	78
4.2.4 Wasseraufnahmen der überwiegend mikrogefüllten Kompositmaterialien	47	5.10 Schlußfolgerung	80
4.3 Hybridkompositmaterialien	48	6 Zusammenfassung	81
4.3.1 Abriebsverhalten im zeitlichen Verlauf	48	7 Literaturverzeichnis	83
4.3.2 Ranking der Hybridkompositmaterialien in Bezug auf ihre Abrasionsfestigkeit	52	8 Tabellarischer Anhang	91
4.3.3 Einfluß von Wasserlagerungszeitraum und Bürstbewegungsart auf das Verschleißverhalten der Hybridkompositmaterialien	53		
4.3.4 Wasseraufnahmen der Hybridkompositmaterialien	54		
4.4 Zusammenfassendes Ranking aller getesteten Füllungsmaterialien in Bezug auf ihre Verschleißfestigkeit	54		
4.5 Ergebnisse der morphologischen Verschleißanalyse	56		

1 Einleitung und Problemstellung

Der Beurteilung von dentalen Füllungsmaterialien kommt in der konservierenden Zahnheilkunde eine zentrale Bedeutung zu. Die dadurch gewonnenen Erkenntnisse dienen der Entwicklung neuer Werkstoffe, leisten konstruktive Verbesserungen bestehender Füllungsmaterialien, desweiteren lassen sich Richtlinien für Indikation und Anwendung ableiten.

Um ein Füllungsmaterial zufriedenstellend einsetzen zu können, spielt neben den biologischen Eigenschaften dessen Resistenz gegen die Degradation im oralen Milieu eine große Rolle (ROULET 1976). Der Verschleiß dieser Zahnrestorationen wird hauptsächlich durch Faktoren wie mechanische Kaubelastung, Korrosion, Erosion und durch die Auswirkungen der mundhygienischen Maßnahmen verursacht (HEATH & WILSON 1976).

ROULET (1987) sieht in den in vitro durchgeführten Verschleißtests eine der großen Herausforderungen für die zahnärztliche Materialforschung. Klinische Langzeituntersuchungen können zwar durch Labortests nicht ersetzt werden, sie sind aber der raschen Materialprüfung und Weiterentwicklung hinderlich, da die Resultate erst nach Jahren zur Verfügung stehen (DICKSON 1979).

Deshalb wurde an der Poliklinik für Zahnerhaltung und Parodontologie der Universität München ein mehrstufiges In-vitro-Testverfahren zur Evaluation dentaler Kompositfüllungsmaterialien entwickelt. Die überwiegend durch mechanische Kaubelastung verursachten Verschleißmechanismen im okklusalen Kontaktpunktbereich (SOLTESZ et al 1979/80/81, HARRINGTON et al 1982, JÖRGENSEN 1982, KREJCI et al 1990) können durch einen speziell konstruierten, computergesteuerten Kaukraftsimulator untersucht werden. Mit Hilfe der von DE GEE et al (1986) beschriebenen Methode, die sich in den letzten Jahren als internationales Standardverfahren etabliert hat, wurde mittels der Acta-Abrasionsmaschine der Abrieb im okklusalen Füllungsbereich durch Nahrungsbestandteile nachgeahmt.

In der sogenannten Demastikationszone ist es hauptsächlich die Abrasion, welche für die mechanische Komponente des Verschleißes verantwortlich ist (POWELL et al 1975, ROULET 1987, KREJCI et al 1990). Dabei handelt es sich um eine Dreimedienabrasion, bei der die Antagonistenzähne kaum einen direkten Kontakt mit der Füllungs Oberfläche aufweisen. Der Verschleiß wird durch ein Abrasivmedium, wie durch die Zahnpaste beim Zähneputzen oder durch Nahrungsbestandteile verursacht. Um die Auswirkungen von Zahnbürste und Zahnpaste auf zervikale Füllungen, mit hoher klinischer Relevanz, in Labortests untersuchen zu können, wurde an der Poliklinik für Zahnerhaltung und Parodontologie in München eine computergesteuerte 2 Achsen-Zahnbürstmaschine entwickelt.

Das Ziel dieser vorliegenden Untersuchung war daher, unter Berücksichtigung aller bisher gewonnenen Ergebnisse, einen hoch standardisierten In-vitro-Zahnbürsten/Zahnpasten-abriebtest zu entwickeln.

Dazu wurde die computergesteuerte 2 Achsen-Zahnbürstmaschine (KUNZELMANN 1995), die es ermöglicht, mittels einer speziell entwickelten Software, verschiedenartige zweidimensionale Zahnbürstenbewegungen durchzuführen, optimiert.

Unter Anwendung dieser Drei-Medien-Abriebsmaschine sollte die Abrasionsresistenz und das Abriebverhalten verschiedener dentaler Kompositfüllungsmaterialien, unter hoch standardisierten Versuchsbedingungen und mit einer hohen Reproduzierbarkeit, verglichen werden.

Desweiteren bedurfte es der Abklärung in welcher Art und Weise das Abriebverhalten von Kompositen von Versuchsparameter wie Anzahl der Bürstzyklen, Art der Bürstbewegung und Wasserlagerungszeitraum der Prüfkörper beeinflusst wird.

2 Literaturübersicht

2.1 Verschleißmechanismen dentaler Füllungsmaterialien

Das Verschleißphänomen von Materialien ist ein sehr komplexer Prozeß und stellt Ingenieure sowie Zahnmediziner vor noch ungelöste Probleme. So ist die Verschleißfestigkeit von dentalen Füllungsmaterialien unbestritten eines der Hauptkriterien für deren klinische Tauglichkeit. Der einzige Weg um dieses Phänomen zu verstehen oder sogar das Ausmaß des zu erwartenden Verschleißes vorhersagen zu können, besteht in der Kenntnis der einzelnen Mechanismen welche, zur beobachteten Verschleißerscheinung beitragen (ROULET 1987).

Das Deutsche Institut für Normung e.V. definiert den Begriff " Verschleiß " als einen "fortschreitenden Materialverlust aus der Oberfläche eines festen Körpers, hervorgerufen durch mechanische Ursachen, d.h. Kontakt und Relativbewegung eines festen, flüssigen oder gasförmigen Gegenkörpers" (DIN 50 320).

Es ist bekannt, daß der Verschleiß von einem oder einer Kombination folgender Verschleißmechanismen hervorgerufen wird (POWELL et al 1975, ROULET 1987, SULONG & AZIZ 1990).

- * Adäsiver Verschleiß, verursacht durch das unmittelbare Aufeinandergleiten von zwei Körpern, wobei adhäsive Haftkräfte entstehen, mit der Folge der entsprechenden Verschleißerscheinungen. Die wichtigste Form dieses Zwei-Körper-Verschleißsystems stellen, in der Zahnmedizin, die Gleitbewegungen bei Zahnkontakt dar, wie sie bei Artikulationsbewegungen bzw. Zähneknirschen (Parafunktionen) auftreten.
- * Abrasiver Verschleiß: Bei diesem Drei-Körper-Abrasionssystem haben die Verschleißpartner keinen direkten Kontakt miteinander. Ursache für den auftretenden Verschleiß ist ein Medium in Form eines Abrasivstoffes, welcher sich zwischen den beiden Partnern befindet und einen Abtrag auf der Oberfläche verursacht. Solche Abrasionsvorgänge treten bei der Nahrungszerkleinerung oder beim Zähneputzen auf.

- * Verschleiß durch Korrosion, bedingt durch chemische Veränderungen an der Oberfläche.
- * Verschleiß durch Erosion; Auswaschung auf der Oberfläche durch Feststoffe oder Flüssigkeiten.
- * Verschleiß durch Ermüdung, wie zum Beispiel Ribbildung unter der Oberfläche durch mechanische Dauerbelastung, mit der Folge von Abplatzungen.

Zur besseren Unterscheidung von Verschleißerscheinungen auf der Zahnoberfläche wurde von LUTZ et al (1984) eine Differenzierung in Okklusionskontaktbereiche (OCA = occlusal contact area) und in kontaktfreie Okklusionsbereiche (CFA = contact free area) vorgenommen.

Die vorherrschende Verschleißart in CFA stellt die Drei-Körper-Abrasion durch Nahrungszerkleinerung und Zahnbürsten dar. Im Falle der Zahnbürsten/ Zahnpastenabration wird ein loses Abrasivmedium (Zahnpaste) zwischen den Borsten der Bürste und der zu abradierenden Oberfläche (Zahn oder Füllungsmaterial) eingebracht. Durch mechanische Bewegungen der Bürste bzw. Borsten werden die Abrasivpartikel auf der Antagonistenoberfläche verschoben und verursachen dadurch einen Verschleiß an der Oberfläche sowie den Bürstenborsten.

Nach ASMUSSEN (1985) werden Zahnfüllungen der Klasse III und IV hauptsächlich durch diese Bürstenabration beansprucht, während okklusale Füllungen durch die Nahrungszerkleinerung abradert werden. Ähnliches gilt für Zahnhalsfüllungen (Klasse V).

Laut HARRISON (1984) besteht eine Abhängigkeit zwischen dem Ausmaß der Drei-Medien-Abrasion und Faktoren wie Typ und Form der Bürste bzw. Borsten, Art des Abrasives, Anlagekraft sowie Frequenz mit der die Bürste über eine Oberfläche bewegt wird.

2.2 Dentin- und Schmelzabrieb durch Zahnbürste und -paste

Bereits Anfang dieses Jahrhunderts wurde durch MILLER (1907) eine der ersten In-vitro-Studien über die abrasive Wirkung von Zahnbürsten/Zahnpasten publiziert. Es konnte durch einfaches Bürsten von Zähnen per Hand ein Substanzabtrag qualitativ nachgewiesen werden. Seit diesem Zeitpunkt verbesserten viele Wissenschaftler die Versuchsmethoden, um die Auswirkungen von Zahnbürste und Zahnpaste auf die physiologischen Substanzen, wie Dentin und Schmelz, zu untersuchen. Dabei wurden Zahnbürstmaschinen konstruiert, um die Versuchsanordnungen zu standardisieren und eine möglichst hohe Reproduzierbarkeit zu erreichen (BJÖRN & LINDHE 1966, STOOKEY & MUHLER 1968, ASHMORE et al 1972, DAVIS & WINTER 1976, REISSTEIN et al 1978, SLOP et al 1983, SVINNSETH et al 1987). Verschiedene Parameter wie Art und Konzentration des Abrasivmediums, Härte und Anlagedruck der Zahnbürstborsten, sowie Zahl der Bürstzyklen konnten variiert werden.

Laut BJÖRN & LINDHE (1966) scheint die Zahnbürste allein eine nur sehr geringe abrasive Wirkung zu haben. Dieser Befund konnte durch HOTZ (1983) und DE-BOER et al (1985), die nach Bearbeitung von Dentinproben mit Zahnbürste und Wasser überhaupt keinen Substanzverlust feststellen konnten, bestätigt werden. Aufgrund dieser Erkenntnis wurde ein Abrasivmedium, vorwiegend Zahnpasten, in die Zahnbürstenabtragsversuche eingeführt. In einer Studie von BARBAKOW et al (1989) wurden 32 in der Schweiz erhältliche Zahnpasten bezüglich deren Abrasionswirkung auf Dentin und Schmelz untersucht. Die Pasten zeigten große Unterschiede in Bezug auf ihre abrasive Wirkung. Zu ähnlichen Ergebnissen kamen auch STOOKEY & MUHLER (1968), HOTZ (1983, 1985), MURRAY et al (1986) und SVINNSETH et al (1987). Nach Ansicht von HOTZ (1983) muß deshalb angenommen werden, daß die in den Zahnpasten enthaltenen Abrasivpartikel für die Traumatisierung der Zahnschmelz verantwortlich sind.

1972 untersuchten ASHMORE et al die Oberflächenrauigkeit von planen Dentinklötzen vor und nach einem 10 minütigen Putzvorgang mit verschiedenen Arten von Calciumcarbonat. Dabei konnte eine Abhängigkeit des Abrasionsmaßes vom Typ des verwendeten CaCO_3 nachgewiesen werden. DAVIS & WINTER (1976) stellten in ihrer Untersuchung fest, daß feine Abrasivpartikel eine geringere Abnutzung als ein Abrasivmedium mit groben Partikeln

verursachen. Diese Feststellung konnten DE-BOER et al (1985) in ihrer Zahnbürsten/Zahnpastenabstrationsstudie, unter Verwendung verschiedener Zahnpasten mit Abrasivpartikelgrößen von 7-15 µm, bestätigen.

HARTE & MANLY (1975, 1976) zeigten, daß unterschiedlich verwendete Konzentrationen der Abrasivsubstanz einen erheblichen Einfluß auf die relativ gemessene Abrasivität haben. Sie ermittelten eine Verdoppelung der Abnützung, wenn eine Zahnpaste um 50% verdünnt wurde. Dieses Verhalten führten sie auf Zahnpastenbestandteile zurück, die eine Verminderung der Abrasivität in unverdünnten Pasten verursachen. Verglichen mit Speichel und Carboxymethylcellulose (= künstlicher Speichel) unterdrückt Glycerin die Abrasivität der Zahnpasten um 88%. Auch HOTZ (1983) berichtet in seiner Untersuchung von einem deutlichen Einfluß des Verdünnungsgrades der Pasten auf deren abrasive Wirkung. Eine Veränderung des Verdünnungsverhältnisses von 1 : 2 (Paste : künstlicher Speichel) auf 1 : 4 führte jedoch zu einer 50% igen Reduktion der Abrasivität. Ob die Pasten mit Speichel oder destillierten Wasser verdünnt werden, hat keine Auswirkung auf deren relative Abrasivität (BJÖRN 1966, ASHMORE et al 1972). Eine Verdünnung mit Carboxymethylcellulose verursacht eine bessere und konstante Homogenität des Gemisches (Hotz 1983). Außerdem wird dadurch die Sedimentation der Abrasivpartikel in den Suspensionsgefäßen der Bürstmaschinen reduziert (HEATH & WILSON 1976).

Laut HARTE & MANLY (1976) verursachen harte Zahnbürstborsten eine bis zu 3,6 mal höhere Dentinabnützung als weiche. Dagegen zeigte sich bei HOTZ (1983) mit drei unterschiedlichen Zahnbürstsorten sehr ähnliche Abrasionswerte.

Im weiteren hatte die Umgebungstemperatur der Versuchsanordnung Einfluß auf die Zahnbürsten/Zahnpastenabstration. Untersuchungen bei 37°C waren um 28% weniger abrasiv als jene die bei Zimmertemperatur durchgeführt wurden. HARTE & MANLY (1976) versuchten diesen Unterschied mit einer verringerten Steifigkeit der Zahnbürstborsten bei erhöhter Temperatur zu erklären.

Nach Ansicht von STOOKEY & MUHLER (1968) spiegelt sich eine Steigerung des Anlagedruckes der Zahnbürstborsten auf der Probenoberfläche in einer erhöhten Dentin- und

Schmelzabstration wieder. 1983 ermittelte HOTZ eine deutlich gesteigerte Abrasionswirkung bei Verdoppelung des Auflagegewichtes der Zahnbürste.

In einer weiteren Zahnbürsten/Zahnpastenabstrationsstudie ermittelten SLOP et al (1983) mit einer speziell konstruierten Bürstmaschine, durch quantitative Messungen, die Abhängigkeit zwischen der Schmelzabnützung und der Anzahl der ausgeführten Bürstzyklen. Es konnte ein nicht linearer Zusammenhang festgestellt werden. Das vor Versuchsbeginn durchgeführte Glätten der Schmelzoberfläche wurde als Ursache für dieses Phänomen angesehen.

Es besteht kein festes Verhältnis, so DAVIS & WINTER (1976) zwischen dem Dentin- und Schmelzabstrationsverhalten. Dies konnten sie in einer Vergleichsstudie durch Anwendung verschiedener Abrasivsubstanzen beim Bürstvorgang nachweisen. Eine Übersicht über die relative Abrasivität von verschiedenen Mineralpulvern in experimentellen und prophylaktischen Zahnpasten in Bezug auf Dentin und Schmelz gibt Tabelle 2.1.

Mineralpulver in Abrasionspaste	Schmelzabstration in %	Dentinabstration in %
Aluminiumoxidtrihydrat	26	46
Bimsstein	1.582	337
Kalziumpyrophosphat	418	104
Kieselsäure	135	53
Kreide (Referenzabrasiv)	100	100
Kreide (grobes Kalzit)	116	142
Zirconiumsilikat	2.299	635

Tab. 2.1: Relative Abrasivität verschiedener Mineralpulver bei Dentin und Schmelz
(nach DAVIS und WINTER 1976).

JOHANNSEN et al (1993) bestimmten in einer klinischen Untersuchung an Oberkieferfrontzähnen, mittels Laserreflexions-Technik, die Reinigungseffektivität verschiedener Zahnpastenputzkörper und konnten Übereinstimmung mit den Ergebnissen aus ihren In-vitro-Zahnbürsten/Zahnpastenabrasionsstudien feststellen. Dabei waren Zahnpasten mit Natriumbikarbonat weniger effektiv und abrasiv als jene die Aluminiumsilikat, Kalziumkarbonat und Dikalziumphosphatdihydrat oder Silikondioxid und Dikalziumphosphatdihydrat als Putzkörper beinhalten.

Verschiedenste Methoden kamen bei der Auswertung der Zahnbürsten/Zahnpastenabration bezüglich der Zahnhartsubstanzen zur Anwendung. REISSSTEIN et al (1978) untersuchten mit Hilfe des Rasterelektronenmikroskopes die Abrasionseffekte des Zähneputzens mit Zahnpaste bzw. physiologischer Salzlösung an der Schmelz-Zement-Grenze extrahierter Zähne, indem sie in einem begrenzten Areal die durch das Bürsten entstandenen Furchen zählten.

Nach gründlicher Reinigung und 18 stündiger Trocknung der Dentinproben in einem Wärmeschrank bei 37°C und 25% relative Luftfeuchtigkeit bestimmte HOTZ (1983, 1985) durch Wiegen den Substanzverlust. Laut HEFFERREN (1976) rät das Laboratory Abrasion Committee of the American Dental Association von dieser Meßmethode ab. Die durch dieses Verfahren bestimmten Resultate sind, so BARBAKOW et al (1989), irreführend, besonders weil es schwierig ist den Wasserverlust der Dentinproben zu kontrollieren. Sie konnten in einer Vergleichsstudie erhebliche Differenzen zwischen den von HOTZ (1985) gewonnenen und ihren, mittels Radiotracer-Technik (GRABENSTETTER et al 1958, STOOKEY & MUHLER 1968, HARTE & MANLY 1975, 1976, HEFFERREN 1976, SLOP et al 1983) bestimmten, Ergebnissen nachweisen. Bei dieser von GRABENSTETTER et al (1958) entwickelten Meßtechnik, wird die Menge des abradierten P^{32} aus radioaktiv markierten Dentin bzw. Schmelzproben quantitativ bestimmt. DAVIS konnte 1975 mit Zahnbürstenabrationstests vor und nach Bestrahlung der Dentinproben zeigen, daß die Abnützungswiderstand durch die radioaktive Markierung vermindert wird. Seiner Ansicht nach sind deshalb mittels radioaktiver Isotopen markierte Zähne nicht die ideale Probenform zur Simulation der in vivo Verhältnisse in einem Labortest. In einer weiteren Studie (1976) verwendete er deshalb, wie auch BJÖRN & LINDHE (1966), ASHMORE et al (1972), DE-

BOER et al (1985) und SVINNSETH et al (1987), einen Perthometer um den durch das Bürsten mit Zahnpaste verursachten Substanzverlust an Dentin und Schmelz zu messen. Bei dieser angewandten profilometrischen Meßmethode wird das Oberflächenrelief der Probenkörper mit einem Diamantstylus abgetastet und aufgezeichnet. Das abradierte Volumen kann durch zweimalige Messung (vor und nach dem Bürstvorgang) oder in Relation zu einem außerhalb der Bürstspur befindlichen Referenzpunkt bestimmt werden.

2.3 Zahnbürsten/Zahnpastenabration verschiedener dentaler Füllungsmaterialien

Bei der Auswertung dieser Zahnbürsten/Zahnpastenabrationstests konzentrierte man sich neben der Bewertung der Oberflächenrauigkeit mittels Licht- (FRANZ 1974, ALBERS 1977) und Rasterelektronenmikroskopen (MEINERS 1974, SOLTESZ et al 1980, LAMBRECHTS & VAN HERLE 1982, DE DEE et al 1985, DJKEN et al 1983, 1987) unter anderem auf die Beurteilung des Substanzabtrages der Probenkörper. Dieser wurde durch die Umrechnung des durch den Bürstvorgang erzeugten Gewichtverlustes der Prüfkörper und mit Hilfe der spezifischen Materialdichte auf das abradierte Volumen (SOLTESZ et al 1980, BROWN 1981, ANKER 1982, HARRINGTON et al 1982), sowie durch profilometrische Auswertung (HEATH & WILSON 1976, HARRINGTON et al 1982, LAMBRECHTS & VAN HERLE 1982, EHRNFORD 1983, DE GEE et al 1985) quantitativ bestimmt.

Wie bereits bei den Dentin- und Schmelzabrationstudien (BJÖRN & LINDHE 1966, HOTZ 1983) dargestellt werden konnte, verursachte die Probenbearbeitung der Kompositfüllungsmaterialien mit Zahnbürste und Wasser praktisch keinen meßbaren Substanzverlust, nur vereinzelte Kratzspuren waren unter dem Rasterelektronenmikroskop sichtbar (DIJKEN et al 1983). In den von FRANZ (1974) durchgeführten Bürstversuchen zeigten die verwendeten Zahnpasten eine Schleifwirkung mit unterschiedlicher Abriebtiefe, die aber immer mit einer Erhöhung der Oberflächenrauigkeit und einem Verlust an Oberflächenglanz der Proben aus Verblendkunststoff bzw. Kompositfüllungsmaterialien verbunden waren. Laut Angaben von MEINERS et al (1974), HEATH & WILSON (1976), SOLTESZ et al (1980) kann die Oberflächenrauigkeit und der Verlust des Oberflächenglanzes des Füllungsmaterials allein durch die Zahnbürsten/Zahnpastenabration

verursacht werden. Zu ähnlichen Ergebnissen kommt auch ALBERS (1977) indem er in einem Labortest den Abrasionseinfluß verschiedener Zahnpasten auf einige Kompositmaterialien untersuchte. Als Meßparameter verwendete er die Rillen- und Wellentiefe der Prüfkörperoberfläche. Er kam zu dem Ergebnis, daß die Zusammensetzung der Zahnpaste den Abrasionsverlust beeinflusst.

Nach Ansicht von SCHMITZ et al (1973) hat, bei Verwendung identischer Zahnpasten, die Borstenart (Natur oder Kunststoff) keinen Einfluß auf den Abrieb. Jedoch hängt die Abnutzung von der Anzahl der Borsten pro Bürste und von der Bürstzeit ab. Bei identischer Zahnbürste und -paste beeinflusst der Anlagedruck der Borsten die Abnutzung des Probenkörpers. Zu ähnlichen Ergebnissen kommen auch HEATH & WILSON (1976) indem sie durch schrittweise Steigerung der Anlagekraft von 2 auf 8 N eine Erhöhung des Substanzverlustes an ihren Proben nach Bürsten mit Zahnpaste feststellen konnten. Überstieg jedoch die angewendete Kraft den Wert von 7 N, so nahm die Verschleißrate wieder ab. Dieses Phänomen wurde durch das beobachtete Auseinanderspreitzen der Bürstenborsten interpretiert. Folglich wird weniger Abrasivmedium bzw. Abrasivpartikel pro Bürstbewegung über die Probenoberfläche transportiert und somit ist ein geringerer Abriebsverlust zu verzeichnen.

Obgleich der Gesamtmaterialverlust der dentalen Kompositfüllungsmaterialien klinisch von untergeordneter Bedeutung ist, erlangt die durch das Bürsten erreichte Rauigkeit der Füllungsoberfläche, in Hinblick auf Plaqueretention und Verfärbung, große Bedeutung (LEINFELDER et al 1980, EHRNFORD 1983). ANKER konnte 1982 durch seine morphologischen Oberflächenuntersuchungen mit Hilfe des Rasterelektronenmikroskopes zeigen, daß die durch Anwendung einer Zahnbürstmaschine entstandenen Oberflächencharakteristika von Kompositprüfkörpern in direkter Verbindung mit der darin enthaltenen Füllpartikelgröße stehen. Dabei wiesen die konventionellen Komposit mit einer Partikelgröße von 2 bis 5 µm, sowie die Hybridkomposit, eine Kombination von Makro- und Mikrofüllern, nach ausreichend langer Zahnbürsten/Zahnpastenabrasion eine gleich raue Oberfläche auf. Die mikrogefüllten Füllungsmaterialien zeigten, abgesehen von häufig auftretenden Poren, jedoch eine relativ glatte und glänzende Oberfläche (LAMBRECHTS & VAN HERLE 1982, EHRNFORD 1983). Nach Untersuchungen von

DIJKEN et al (1983) behalten die mikrogefüllten Harze ihre, durch vorheriges Polieren erworbene glatte Oberflächenstruktur auch nach dem Bürsten mit einem Abrasivmedium bei. In einer weiteren Zahnbürsten/ Zahnpastenabrasionsstudie bestätigte DIJKEN & RUYTER (1987) die von ANKER (1982) gewonnenen Ergebnisse, indem sie durch profilometrische Auswertung und rasterelektronenmikroskopische Betrachtung einen beachtlichen Anstieg der Oberflächenrauigkeit, besonders bei den makrogefüllten Kompositmaterialien feststellen konnten. Die konventionellen und Hybridkomposite zeigten das typische Bild von herausragenden Füllpartikeln aus einer abradierten Harzmatrix. Die unterschiedliche Härte zwischen der Matrix und den in ihr eingebetteten Füllstoffen ist, nach Meinung von MEINERS et al 1974, ANKER 1982, DIJKEN et al 1983 und KREJCI et al 1990, der Grund für das durch den Bürstvorgang erzeugte materialspezifische Oberflächenrelief. Die weichere Matrix abradiert dabei stärker als die harten anorganischen Füllpartikel und dadurch werden diese an der Probenoberfläche prominent bzw. ragen aus der Harzmatrix heraus.

Nicht nur bei den konventionellen Kompositfüllungsmaterialien, sondern auch bei den Silikat- und Glasinomermementen, ermittelten HARRINGTON et al 1982, nach Ausführung von 60.000 Bürstzyklen mit einer Zahnbürstmaschine, eine erhebliche Zunahme der Oberflächenrauigkeit. Im Gegensatz dazu konnten sie bei geschnittenen Amalgamprobenoberflächen nach dem Bürsten eine verbesserte Oberflächenglätte nachweisen. Auch in der Versuchsanordnung von HEATH & WILSON (1976) zeigten die Amalgamprüfkörper, die mit einem Sandpapier (Korngröße 600 Grit) vorbehandelt wurden, eine Verbesserung der Oberflächenrauigkeit durch Bürsten mit einer Calciumcarbonat enthaltenen Zahnpaste.

Bei der Polymerisation von Kompositmaterialien gegen ein Matrizenband (HARRINGTON et al 1982) oder gegen eine Glasplatte (DE GEE et al 1985) wurde eine sehr glatte Probenoberfläche erreicht. Die dadurch erzeugte, harzmatrixreiche und füllkörperarme, oberste Materialschicht abradiert signifikant schneller als der Rest des Probenkörpers. Deshalb empfehlen DE GEE et al (1985) diese, ungefähr 200 µm starke, Schicht nach der Polymerisation naß und mit niedriger Drehzahl zu entfernen. Desweiteren stellten DE GEE et al (1985) eine Verbesserung der Abrasionsresistenz der Harzmatrix von konventionellen und mikrogefüllten Kompositfüllungsmaterialien durch eine Hitzebehandlung fest. Eine

Nachvergütung der Proben bei 125°C für eine Stunde erbrachte die besten Ergebnisse. Ein Auszug der Ergebnisse findet sich in Tabelle 2.2.

Füllungsmaterial:	Handelsname:	Materialverschleiß in µm/h bei einer Nachvergütungstemperatur von		
		37°C	125°C	225°C
Mikrofüller-Komposit:	-Silar ®	0,9	0,65	0,7
PMMA :	-Vertex ®	5,5	4,3	k.A.
ungefülltes Kunstharz :	-Enamel Bond ®	0,65	0,3	k.A.

Tab. 2.2: Materialverschleiß (µm/h) nach einer Stunde (= 2.600 Bürstzyklen) und einstündiger Hitzebehandlung bei verschiedenen Temperaturen (nach DE GEE et al 1985), mit k.A.= keine Angaben.

Idealerweise sollte ein zahnärztliches Restaurationsmaterial eine möglichst ähnliche Abrasionsresistenz wie Zahnschmelz aufweisen. Deshalb untersuchten HEATH & WILSON (1976) in ihrer Zahnbürsten/Zahnpastenabstrationsstudie verschiedene Füllungsmaterialien im Vergleich zu Schmelz. Dabei war Gold das einzige Material, welches weniger abradierete als die Zahnhartsubstanz. Amalgam zeigte eine um 50% höhere Abrasionsrate. Die konventionellen Komposit, sowie ein getesteter Silikatzement, abradierten 2 - 4 mal stärker als der Zahnschmelz.

DE GEE et al ermittelten 1985 bei den mikrogefüllten Kompositfüllungsmaterialien eine 5 - 10 mal schnellere Abnutzung als bei konventionellen Kompositen. Zu ähnlichen Ergebnissen kamen SOLTESZ et al (1980), ANKER (1982), HARRINGTON et al (1982) und EHRNFORD (1983) in ihren, unter vergleichbaren Testbedingungen durchgeführten, Untersuchungen.

Bei den Versuchen von HOTZ (1975), ALBERS (1977), SOLTESZ et al (1980) und HARRINGTON et al (1982) zeigten die getesteten Kompositmaterialien durchwegs eine größere Abrasionsresistenz als Amalgam, was nicht mit In-vivo-Beobachtungen übereinstimmt. (POWELL et al 1975, LUTZ et al 1985, ROULET 1987). Bezüglich dieser klinischen Korrelation schnitten die Resultate, der durch HEATH & WILSON (1976), BROWN (1981) und DE GEE et al (1985) durchgeführten Studien, mit am besten ab.

BROWN bestimmte 1981 in seiner Zahnbürsten/Zahnpastenabstrationsstudie die Materialabnutzung, indem er den, durch Wiegen der Probenkörper ermittelten, Gewichtsverlust auf Volumenprozentverluste umrechnete. Nach 10.000 Bürstzyklen mit Sensodyne® als Abrasivmedium zeigten die verwendeten Füllungsmaterialien unterschiedliche Abrasionswerte. Die Ergebnisse finden sich in Tabelle 2.3:

Füllungsmaterial:	Handelsname:	Volumenprozentverluste:
konventionelles Komposite:	- Consiac ®	1,1 %
inhomogene Mikrofüller - Komposit:	- Isopast ®	8,1 %
	- Silar ®	8,4 %
ungefülltes Kunstharz:	- Sevriton®	15,2 %
konventionelles Amalgam:	- keine Angabe	0,7 %

Tab. 2.3: Volumenprozentverluste nach 10.000 Bürstzyklen (nach BROWN 1981).

Tabelle 2.4 gibt eine Übersicht über den, von DE GEE et al (1985), durch einen einstündigen Bürstvorgang (= 2.600 Bürstzyklen) erzeugten und durch Profilometrie bestimmten Materialverlust.

Probenmaterial:	Handelsname:	Materialverlust in $\mu\text{m/h}$
PMMA :	-Vertex ®	5,5
Mikrofüller-Komposit :	-Durafill ®	0,7
	-Isopast ®	0,8
	-Silar ®	0,9
ungefülltes Kunstharz :	-Enamel Bond ®	0,65
konventionelles Komposit :	-Nuvafile ®	0,08
	-Concise ®	0,2
	-Fotofil ®	0,4
Amalgam :	-Amalcap ®	0,2
Dentin :		13,0
Schmelz :		0,0

Tab. 2.4: Materialverlust in $\mu\text{m/h}$ nach einstündigem Bürstvorgang (= 2.600 Bürstzyklen) nach DE GEE et al (1985).

Laut DE GEE et al (1985) abradieren die konventionellen Kompositmaterialien während der ersten Bürststunde relativ schneller als in den darauffolgenden stündlichen Bürstintervallen. Diese Feststellung stimmt mit den von HARRINGTON et al (1982) gewonnenen Ergebnissen überein. Verglichen mit der, durch die ersten 20.000 Bürstzyklen, verursachten Materialabnutzung, so HARRINGTON et al (1982), waren die Abrasionswerte im darauffolgendem Bürstintervall (ebenfalls 20.000 Zyklen) um 30% reduziert. Erklärt wird dieses beobachtete Verhalten indem der, durch den Bürstvorgang verursachte, Abrieb des Harzmatrixmaterials zwischen den harten Füllpartikeln anfangs schnell voranschreitet und sich je weiter die Partikel aus der organischen Matrix herausragen vermindert. Diese

hervorstehenden harten Füllpartikel behindern den weiteren Abrasionsvorgang und verlangsamen dadurch den Gesamtabrasionsvorgang (MEINERS et al 1974, SOLLTESZ et al 1980, HARRINGTON et al 1982, LAMBRECHTS & VAN HERLE 1982, DE GEE et al 1985). Diese aus der Matrixoberfläche herausragenden anorganischen Füllpartikel können jedoch das Kompositmaterial nicht völlig vor weiterer Abrasion schützen. Die Makrofüllkörper verlieren, durch die verlangsamt fortschreitende Abrasion des Matrixmaterials schließlich ihren Halt und werden durch die Zahnbürstborsten aus der Matrix herausgebrochen (MEINERS et al 1974).

Bei den mikrogefüllten Kompositen ist der Ablauf des Abrasionsprozesses dem der konventionellen ähnlich, nur bestehen die 0,04 bis 0,15 μm großen Füllpartikel (LUTZ et al 1983) zum Teil aus vopolymerisiertem Matrixmaterial, das mit sehr feinen anorganischen Zuschlägen versetzt ist (SOLLTESZ et al 1980). Laut DE GEE et al (1985) ist anscheinend die Differenz zwischen der Abrasionsresistenz von Harzmatrix und Mikrofüllkörpermaterial nicht groß genug, um sich bei der profilometrischen Messung bemerkbar zu machen. So konnten sie bei mikrogefüllten Kompositfüllungsmaterialien einen annähernd linearen Zusammenhang zwischen dem Substanzverlust und den angewendeten Bürstzyklen beobachten.

SOLLTESZ et al (1980) und DE GEE et al (1985) stellten bei homogenen Amalgamproben einen kontinuierlichen Substanzabtrag fest.

2.4 Übersicht über In-vitro-Zahnbürsten/Zahnpastenabriebstudien

Um die bisherigen Ergebnisse der Abrasionsstudien vergleichen zu können, ist die genaue Kenntnis der Versuchsanordnung, der entscheidenden Versuchsparameter sowie die verwendete Meßtechnik unabdingbar. Für die Entwicklung eines neuen In-vitro-Zahnbürsten/Zahnpastenabriebstestes zeigten sich diese Informationen ebenfalls als sehr hilfreich. Eine Zusammenstellung der verschiedenen In-vitro-Zahnbürsten/ Zahnpastenabriebsstudien ist in Tabelle 2.5 wiedergegeben.

Tab. 2.5: Zusammenstellung der In-vitro-Zahnbürsten/Zahnpastenabriebstudien

Autoren	Probenmaterial	Versuchs-anordnung	Bürstenart	Auflagegewicht	Anzahl der Bürstzyklen	Abrasivsubstanz	Verdünnungs-verhältnis	Mess-technik
Auker (1982)	verschiedene Komposite	speziell konstr. Bürstmaschine	k.A.	430 g	16.000 bzw. 240.000	Zahnpaste	45 mg Paste in 45 ml dest. H ₂ O	Gewichtsverlust auf Volumenverlust umgerechnet und REM
Albers (1977)	verschiedene Komposite & Amalgam	elektrische Zahnbürste	Ziegenhaar	20 g	k.A.	Zahnpaste	20 g Paste in 50 ml dest. H ₂ O	Lichtmikroskop & Profilometrie
Ashmore et al (1972)	Dentin	speziell konstr. Bürstmaschine	Nylon	75 g	1.000	Zahnpaste	Paste : dest. H ₂ O 1 : 2	Profilometrie
Barbakow et al (1989)	Dentin & Schmelz	speziell konstr. Bürstmaschine	k.A.	150 g	2.000 bei Dentin, 5.000 bei Schmelz	Zahnpaste	25 g Paste in 50 ml dest. H ₂ O	Radiotracer-Technik
Björn & Lindhe (1966)	Dentin	speziell konstr. Bürstmaschine	synthetische Borsten, mittelhart	200 g	21.000 bzw. 42.000	Zahnpaste	k.A.	Profilometrie
Brown (1981)	verschiedene Komposite & Amalgam	k.A.	k.A.	200 g	10.000	Zahnpaste	k.A.	Gewichtsverlust auf Volumen-prozentverlust umgerechnet
Cancro et al (1980)	konventionelles Komposit	speziell konstr. Bürstmaschine	k.A.	560 g	30.000	Zahnpaste bzw. Bimsstein	k.A.	Gewichtsmessung
Davis & Winter (1976)	Schmelz	speziell konstr. Bürstmaschine	k.A.	200 g	10.000	Zahnpaste & verschiedene Mineralpulver	Paste : dest. H ₂ O 2 : 1 Pulver : Lösung 4 : 11	Profilometrie

Tab. 2.5 (Fortsetzung): Zusammenstellung der In-vitro-Zahnbürsten/Zahnpastenabriebstudien

Autoren	Probenmaterial	Versuchs-anordnung	Bürstenart	Auflagegewicht	Anzahl der Bürstzyklen	Abrasivsubstanz	Verdünnungs-verhältnis	Mess-technik
De-Boer et al (1985)	Wurzelidentin	speziell konstr. Bürstmaschine	Nylon, weich bzw. mittelhart	200 g	10.000	Zahnpaste	3 g Paste in 7 g H ₂ O	Profilometrie
De Gee et al (1985)	verschiedene Komposite, Amalgam, Dentin & Schmelz	speziell konstr. Bürstmaschine	k.A.	125 g	7.800-28.6000	Zahnpaste	k.A.	Profilometrie & REM
Ehrnford (1983)	verschiedene Komposite	speziell konstr. Bürstmaschine	Nylon, weich	870 g	12.000	Zahnpaste	Paste : H ₂ O 1 : 3	Lichtmikroskop & REM
Franz (1974)	Verblendkunststoffe & versch. Komposit	elektrische Zahnbürste	Ziegenhaar	k.A.	k.A.	Zahnpaste	20 g Paste in 50 ml H ₂ O	Lichtmikroskop & Profilometrie
Grubensietter et al (1958)	Wurzelidentin & Schmelz	speziell konstr. Bürstmaschine	Nylon, mittelhart	150 g	1.000 bei Dentin, 10.000 bei Schmelz	Zahnpaste	k.A.	Radiotracer-Technik
Harrington et al (1982)	Verschiedene Komposite	speziell konstr. Bürstmaschine	Oral B 60	k.A.	3 x 20.000	Zahnpaste	30g Paste in 70ml 0,5%iger CMC-Lösung	Gewichtsmessung & Profilometrie
Harte & Manly (1975, 1976)	Dentin	speziell konstr. Bürstmaschine	Nylon hart bzw. mittelhart	10 g	k.A.	CaHPO ₄ , 2 H ₂ O, SiO ₂ , Al(OH) ₃ & C ₆ HPO ₄	Glycerin- & CMC-Lösung (1:1) mit 20% od. 40% Abrasivsubstanz	Radiotracer-Technik
Heath & Wilson (1976, 1977)	verschiedene Komposite, Gold, Schmelz.	speziell konstr. Bürstmaschine	Nylon, hart	500 g	20.000	Standardzahnpastensuspension	22% Zahnpaste in 0,5%iger CMC-Lösung	Profilometrie & REM

Tab. 2.5 (Fortsetzung): Zusammenstellung der In-vitro-Zahnbürsten/Zahnpastenabriebsstudien

Autoren	Probenmaterial	Versuchs- anordnung	Bürstentart	Auflagegewicht	Anzahl der Bürstzyklen	Abrasivsubstanz	Verdünnungs- verhältnis	Mießtechnik
Helfferien (1976)	Wurzeldentin	speziell konstr. Bürstmaschine	Nylon, mittelhart	150 g	10.000	Zahnpaste	25 g Paste in 40 ml dest. H ₂ O	Radiotracer- Technik
Holz (1975)	verschiedene Komposite, Amalgam	elektrische Zahnbürste	extrahart	500 g	k.A.	Bimsstein	k.A.	Gewichtsmessung
Holz (1983, 1985)	Dentin	speziell konstr. Bürstmaschine	k.A.	20 g bzw. 40 g	86.400	Zahnpaste	Paste : Lösung 1 : 2 (bzw. 1:3 & 1:4)	Gewichtsmessung
Kanter et al (1982)	verschiedene Komposite	speziell konstr. Bürstmaschine	Nylon, weich	65 g	4.320-21.600	k.A.	k.A.	Gewichtsmessung & Profilometrie
Krejci et al (1990)	verschiedene Komposite	elektrische Zahnbürste	Nylon, extrahart	200 g	120.000	Zahnpaste	Paste : dest. H ₂ O 1 : 2	3 D-Verschleiß- messung & REM
Lambrechts & Vanherle (1982)	verschiedene Komposite	speziell konstr. Bürstmaschine	k.A.	k.A.	k.A.	Zahnpaste	k.A.	Profilometrie & REM
McConnell & Conroy Vanherle (1967)	Zahnwurzel, Silikatzement, Gold, Amalgam & Acrylharz	speziell konstr. Bürstmaschine	Nylon	167 g & 250 g	k.A.	Zahnpaste	Paste : dest. H ₂ O 1 : 2	Gewichtsmessung
Meiners et al (1974)	verschiedene Komposite	bürsten per Hand	Nylon, mittelhart	k.A.	k.A.	Zahnpaste	k.A.	REM
Murray et al (1986)	Acrylharz, Wurzeldentin & Schmelz	speziell konstr. Bürstmaschine	Oral B 40	200 g	50.000 (Schmelz) 5.000 (Acrylharz & Wurzeldentin)	Zahnpaste	30 ml Paste in 22,5 ml dest. H ₂ O	Lichtmikroskop & Profilometrie

Tab. 2.5 (Fortsetzung): Zusammenstellung der In-vitro-Zahnbürsten/Zahnpastenabriebsstudien

Autoren	Probenmaterial	Versuchs- anordnung	Bürstentart	Auflagegewicht	Anzahl der Bürstzyklen	Abrasivsubstanz	Verdünnungs- verhältnis	Mießtechnik
Redmalm & Ryden (1984)	Plexiglas & Wurzeldentin	speziell konstr. Bürstmaschine	Nylon	235 g	12.000	Zahnpaste	25 g Paste in 50 ml H ₂ O	Laserreflexion Radiotracer- Technik
Reisner et al (1978)	Schmelz & Zement	speziell konstr. Bürstmaschine	Nylon, weich	k.A.	500-1.000 Umdrehungen	Zahnpaste	Paste : H ₂ O 1 : 2	REM
Slop et al (1983)	Schmelz	speziell konstr. Bürstmaschine	Nylon, mittelhart	200 g	500-90.000	Zahnpaste	3 g Paste in 7 ml H ₂ O	Radiotracer- Technik
Soltesz et al (1980)	verschiedene Komposite & Amalgam	speziell konstr. Bürstmaschine	k.A.	200g	k.A.	Zahnpaste	Paste : H ₂ O 1 : 2	Gewichtsmessung & REM
Stookey & Mühler (1968)	Dentin & Schmelz	speziell konstr. Bürstmaschine	Nylon, mittelhart	150 g	500-10.000	Zahnpaste	25 g Paste in 50 ml 1,0 %iger CMC-Lösung	Radiotracer- Technik
Svinseth et al (1987)	Dentin	speziell konstr. Bürstmaschine	Nylon	200 g	1.000	Zahnpaste	20 g Paste in 10 ml 0,5 %iger CMC-Lösung	Profilometrie
van Dijken et al (1983)	verschiedene Komposite	elektrische Zahnbürste	k.A.	400 g	1.100	Zahnpaste & Bimsstein	4 g Zahnpaste & 2 g Bimsstein in 6 ml dest. H ₂ O	REM
van Dijken & Ruyter (1987)	verschiedene Komposite	elektrische Zahnbürste	k.A.	427 g	8.000	Zahnpaste	149 g Paste in 150 ml dest. H ₂ O	Profilometrie & REM
Victorin (1972)	Acrylharz	speziell konstr. Bürstmaschine	Nylon, Prolon & Naturborsten	450 g	k.A.	Zahnpaste	Paste : dest. H ₂ O 1 : 1	Gewichtsmessung Profilometrie & REM

Tab. 2.5 (Fortsetzung): Zusammenstellung der In-vitro-Zahnbürsten/Zahnpastenabriebstudien

Autoren	Probenmaterial	Versuchs- anordnung	Bürstenart	Auflagegewicht	Anzahl der Bürstzyklen	Abrasivsubstanz	Verdünnungs- verhältnis	Messtechnik
Willems et al (1991)	verschiedene Komposite & Amalgam	speziell konstr. Bürstmaschine	Oral B. mittelhart	150 g	k.A.	Zahnpaste	k.A.	Profilometrie & REM

In der Tabelle 2.5 verwendete Abkürzungen:

CMC Carboxymethylcellulose

konstr. konstruiert

k.A. keine Angaben

REM Rasterelektronenmikroskop

3 Material und Methode

3.1 Prüfkörper

3.1.1 verwendete Füllungsmaterialien

Von jedem der in Tabelle 3.1 näher beschriebenen Kompositen sowie experimentellen, lichthärtbaren Füllstoffmischungen (Resine) wurden je 20 Prüfkörper hergestellt.

Füllungsmaterial	Batchnummer	Hersteller	Füllstofftyp	Füllergehalt
Arabesk®	Ch.B.:3815	Fa. Voco, D-27457 Cuxhaven	anorganische Füllstoffe	60,0 % (Vol.) 76,0 % (Gew.)
Blend a Lux®	Ch.: 40 31 TG.: 288841	Fa. Blend a Med, D-66773 Schwalbach	Glasfüller Aerosil	80,0 % (Gew.)
Heliomolar radiopaque®	Ch. B.: 560701	Fa. Vivadent, Schaan, Liechtenstein	Siliciumdioxid Ytterbiumtrifluorid	48,0 % (Vol.) 77,0 % (Gew.)
Tetric®	Ch. B.: 560563	Fa. Vivadent, Schaan, Liechtenstein	feinteiliger Ba-Silikatglas pyrogenes Siliciumdioxid sphäroides Mischoxid Ytterbiumtrifluorid	62,8 % (Vol.)
Pertac Hybrid®	Ch. B.: 0015	Fa. Espe, D-82229 Seefeld	fein gemahlener Quarz Yttriumfluorid disperses Siliciumdioxid	61,0 % (Vol.) 80,0 % (Gew.)
Durafill®	Ch. B.: 042	Fa. Heraeus Kulzer, D-61273 Wehrheim	vorpolymerisierte Füllkörper	37,5 % (Vol.)
Estilux Hybrid VS®	CH. B.: 044	Fa. Heraeus Kulzer, D-61273 Wehrheim	Ba-Al-Silikatglas Li-Al-Silikatglaskeramik hoch disperses Siliciumdioxid	68,4 % (Vol.) 84,0 % (Gew.)

Charisma®	Ch. B.: 057	Fa. Heraeus Kulzer, D-61273 Wehrheim	weiches Spezialbariumglas	59,4 % (Vol.)
Resin I		Fa. Heraeus Kulzer, D-61273 Wehrheim	Ba-Al-SiO ₂ -Glas, grob, silanisiert in BOWEN/TEGDMA 80:20	79,0 % (Gew.)
Resin II		Fa. Heraeus Kulzer, D-61273 Wehrheim	Ba-Al-SiO ₂ -Glas, grob, silanisiert in BOWEN/TEGDMA 80:20	50,0 % (Gew.)
Resin III		Fa. Heraeus Kulzer, D-61273 Wehrheim	Ba-Al-SiO ₂ -Glas, feinst, silanisiert in BOWEN/TEGDMA 80:20	77,0 % (Gew.)
Resin IV		Fa. Heraeus Kulzer, D-61273 Wehrheim	Ba-Al-SiO ₂ -Glas, feinst, silanisiert in BOWEN/TEGDMA 80:20	50,0 % (Gew.)

Tab. 3.1: Übersicht über die in der Zahnbürstenabstrationsstudie verwendeten Materialien.

3.1.2 Prüfkörperherstellung

Zur Herstellung der Prüfkörper (Außenmaße 13 mm x 16 mm, Dicke 2,5 mm) wurde eine aus V2A-Edelstahl bestehende Negativform verwendet (Abb. 3.1). Die Innenseite der eingefrästen Vertiefung ist konisch, um die fertigen Prüfkörper besser entnehmen zu können. Ein schematischer Schnitt durch die Negativform mit montiertem Prüfkörper ist Abbildung 3.2 zu entnehmen.

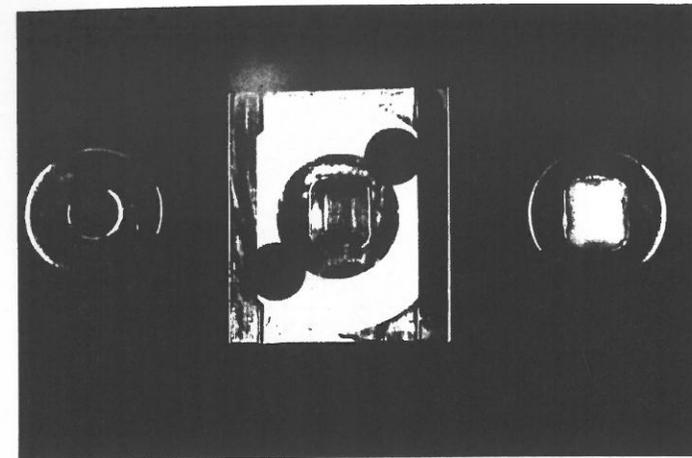


Abb. 3.1: Probenträger (links), Negativform zur Prüfkörperherstellung mit Halterung für Probenträger (Mitte) und auf Unterlegscheibe befestigter Prüfkörper (rechts).

Die Füllungsmaterialien wurden in drei Schichten in die eingefräste Vertiefung appliziert, wobei jede Schicht mit einer Polymerisationslampe (Translux Cl®, Fa. Heraeus Kulzer, Wehrheim) je 40 Sekunden ausgehärtet wurde. Diese so hergestellten Prüfkörper wurden auf Probenträger (Unterlegscheiben 9021 V2A, Außendurchmesser 30 mm & Innendurchmesser 10,5 mm), mit dem gleichen lichthärtenden Füllungsmaterial wie der Prüfkörper selbst, befestigt (Abb. 3.1 & Abb. 3.2). Um Retentionsstellen für Schmutzpartikel bzw. Abrasivmedium so gering wie möglich zu halten, wurden in einem zusätzlichen Arbeitsschritt etwaige auftretende Spalten zwischen Prüfkörper und Probenträger mit dem jeweiligen Füllungsmaterial verschlossen und ausgehärtet.

Nach Fertigstellung der Proben wurden diese zur Endpolymerisation für 180 Sekunden in ein Dentacolor®-XS-Lichtgerät (Fa. Heraeus Kulzer, Wehrheim) eingebracht.

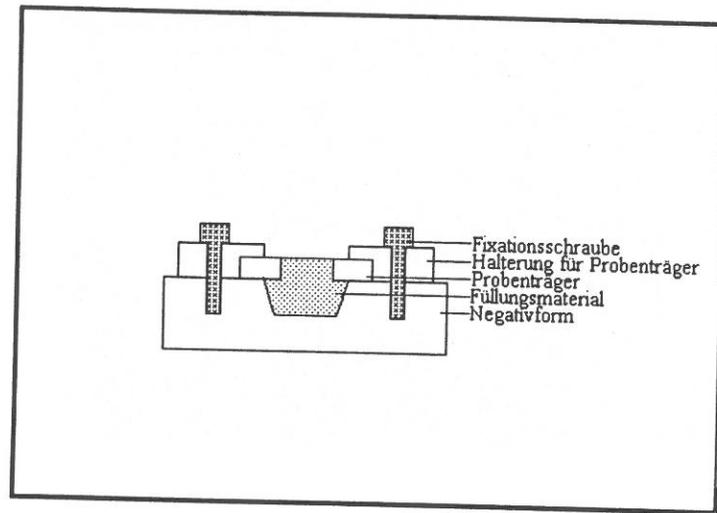


Abb. 3.2: Schematischer Schnitt durch die Negativform mit fertig gestellten Prüfkörper.

Zur Entfernung der Sauerstoffinhibitionsschicht wurden die Proben nach der Vergütung für ca. 30 Sekunden mit einer Bimsstein-Wasser-Suspension und einer Zahnbürste (Oral B P 40, mittelhart) per Hand gebürstet.

Die Oberflächen der Prüfkörper, welche der Bürstbeanspruchung ausgesetzt werden, wurden maschinell (Surfex 68201, Fa. Wirtz, Düsseldorf) unter fließendem Wasser mit Schleifpapierscheiben (Fa. Leco, St. Joseph, USA) der Körnung 400 und zuletzt 600 Grit plan geschliffen (Abb. 3.3).

Nach Abspülen unter Leitungswasser wurden die Proben im Ultraschallbad (T-14, Fa. L & R Manufacturing Company, New Jersey, USA) in deionisiertem Wasser für 2 Minuten gereinigt und bis zur ersten Gewichtsmessung für 24 Stunden bei 37°C im Thermoschrank (Fa. Bauer, München) gelagert.

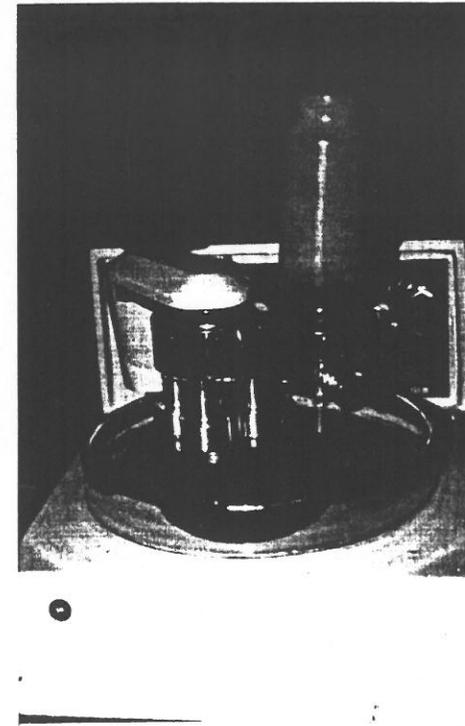


Abb. 3.3: Schleifmaschine zum Planschleifen der Prüfkörperoberflächen.

3.2 Versuchsaufbau

3.2.1 Zahnbürstmaschine

Für den Drei-Medien-Abriebsversuch wurde die an der Poliklinik für Zahnerhaltung und Parodontologie in München entwickelte computergesteuerte 2 Achsen-Zahnbürstmaschine verwendet (Abb. 3.4).

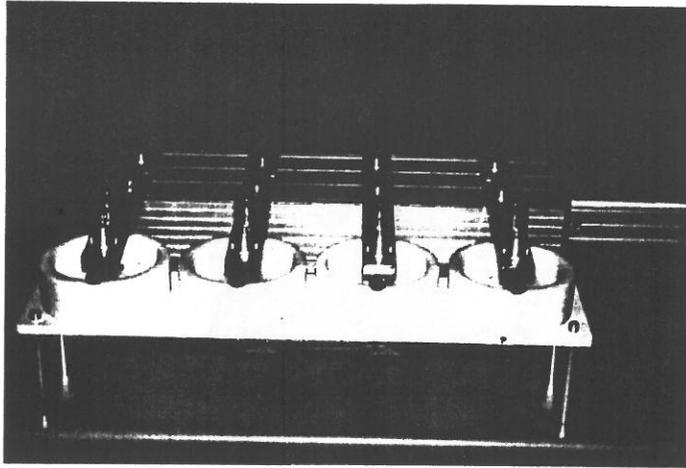


Abb. 3.4: Computergesteuerte 2 Achsen-Zahnbürstmaschine.

Mit einer speziell programmierten Software wird über eine Schrittmotor-Steuerung (CNC-Kontroller C 1421, Fa. Isel, Eiterfeld) ein Doppelspur-Kreuztisch mit Schrittmotorantrieb (Fa. Isel, Eiterfeld) betrieben.

Auf die plan gefräste Aufspannfläche des Tisches sind über T-Nuten-Einzüge mit Flügelmuttern, vier mit einem Schaniergelenk versehene, V2A-Edelstahlverbindungsseisen befestigt. An diese ist jeweils, über zwei kugelgelagerte Führungsstäbe eine Zahnbürstenhalterung angebracht, welche in vertikaler Richtung beweglich ist, aber gegen horizontale sowie Rotationsbewegungen durch die zwei kugelgelagerten Führungsstäbe gesichert ist. Ein gedrehtes Messinggewicht steckt auf einer der beiden Führungsstäbe, um damit das Auflagegewicht der Zahnbürste auf die Prüfkörperoberfläche einzustellen. Mit zwei Imbusschrauben wird der Zahnbürstenkopf (Oral B P 40, mittelhart) an der Bürstenhalterung befestigt (Abb. 3.5).

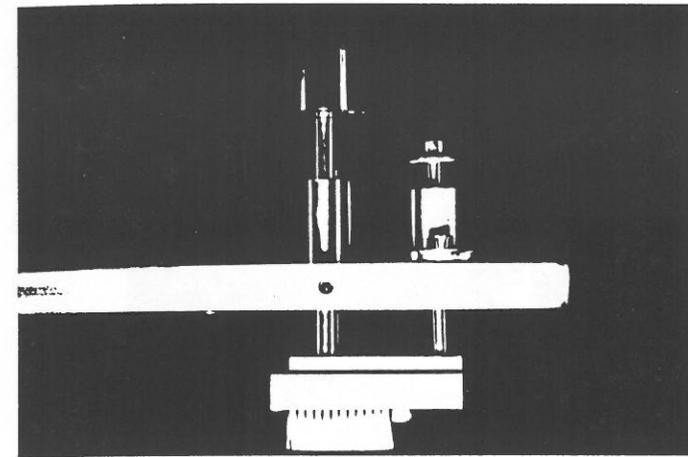


Abb. 3.5: V2A-Verbindungsseisen, kugelgelagerte Führungsstäbe mit aufgestecktem Messinggewicht, sowie Bürstenhalterung mit montiertem Zahnbürstenkopf.

Die auf Unterlegscheiben befestigten Prüfkörper werden mittels einer Kunststoffhülse (Innendurchmesser 30 mm) mit drei Schrauben, wobei Prüfkörper über den Hülsenrand hinausreichen, auf einem runden Probensockel fixiert. Diese komplette Probenhalterung wird in einen runden Kunststoffgefäß, das zur Aufnahme des Abrasivmediums dient, gesteckt und mit einer Imbusschraube gegen Rotation gesichert (Abb. 3.6). Insgesamt vier dieser Abrasivsusensionsgefäße werden so auf einer Aluminiumplatte befestigt, daß pro Bürstzyklus vier Prüfkörper gleichzeitig abradert werden können.

Die Positionierung der Zahnbürsten auf der Prüfkörperoberfläche kann einerseits grob durch die Flügelmutter der Verbindungsseisen andererseits exakter über Steuerung der beiden Schrittmotoren erfolgen.

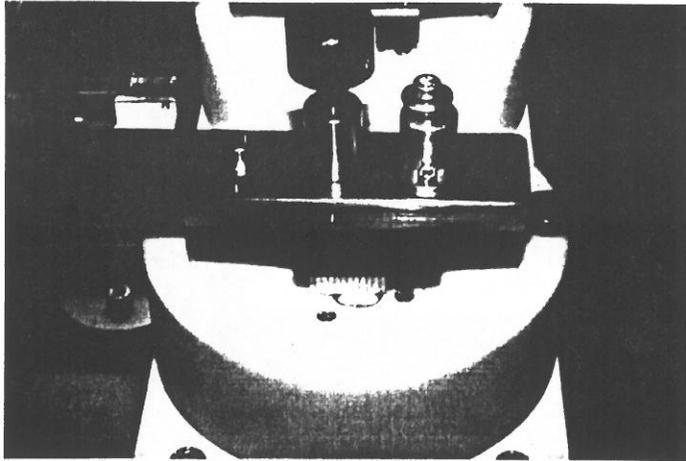


Abb. 3.6: Abrasivsusensionsgefäß mit montiertem Prüfkörper und positionierter Zahnbürste.

Vier an den Schrittmotoren angebrachte Kippschalter ermöglichen Referenzfahrten, die es erlauben während der Bürstintervalle die, wie oben beschrieben, bestimmte Position der Zahnbürsten zu überprüfen oder durch etwaige Schrittverluste der Motoren auftretende Positionsänderung der Bürste zu korrigieren.

Die Steuereinheit der Zahnbürstmaschine (Abb. 3.7) besteht aus einem 486/66 MHz PC, einem Farbmonitor und einer Schrittmotor-Steuerung. Mit der speziell entwickelten Software ist es möglich verschiedene zweidimensionale Bürstbewegungen durch die beiden, um 90° versetzten, Schrittmotoren ausführen zu lassen. In dieser Studie beschränkte man sich auf eine lineare und eine flächige Bürstbewegung (Abb. 3.8). Mit der flächigen Bürstenbewegung sollte die bei der linearen Bewegung beobachtete Riefenbildung auf der Prüfkörperoberfläche vermieden werden.

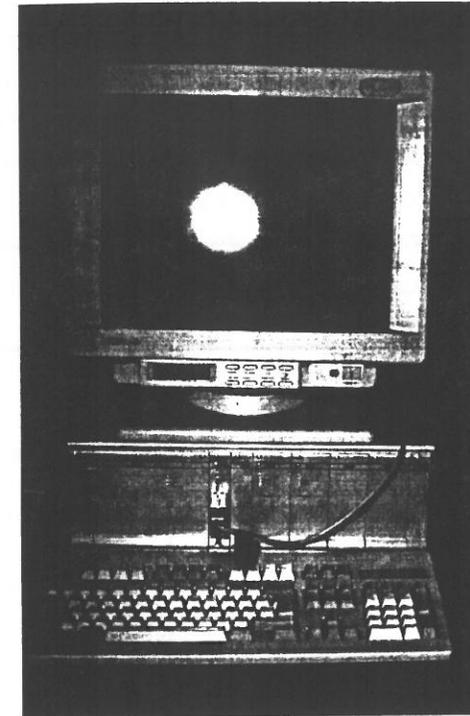


Abb. 3.7: Steuereinheit der Zahnbürstmaschine: Farbmonitor, Schrittmotor-Steuerung und Tastatur des PC's.

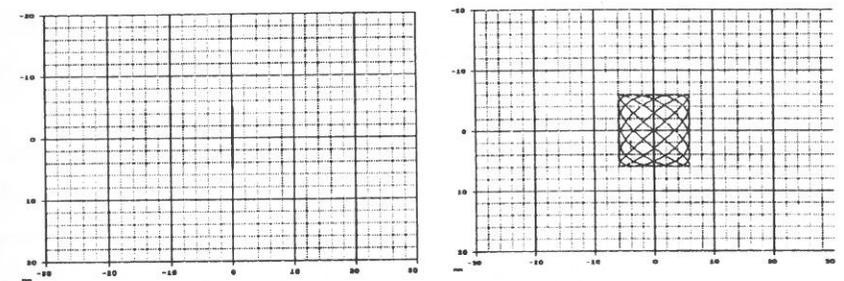


Abb. 3.8: Grafische Darstellung eines linearen (links) und flächigen (rechts) Bürstzyklus.

Dank des menügesteuerten Programms kann die Anzahl der Bürstzyklen, Länge und Frequenz der Bewegung sowie die Häufigkeit der Referenzfahrten für jedes Bürstintervall individuell eingegeben werden. Es ist jedoch vorgesehen unter einmal gewählten Standardeinstellungen (Tab. 3.2) die Füllungsmaterialien zu testen.

Art der Bürstbewegung:	lineare Bewegung	flächige Bewegung
Anzahl der Bürstzyklen pro Bürstintervall:	20.250	1.015
Bürstzeit pro Bürstintervall:	2 ½ Stunden	52 Minuten
Anzahl der Referenzfahrten a 10 sec. pro Bürstintervall:	30	30
Zurückgelegte Bürststrecke pro Bürstzyklus:	2,0 cm	39,9 cm
Zurückgelegte Bürststrecke pro Bürstintervall	405 m	405 m

Tab. 3.2: Standardeinstellungen der Zahnbürstmaschine pro Bürstintervall.

3.3 Versuchsdurchführung

Von den in Tabelle 3.1 aufgeführten Füllungsmaterialien wurden, entsprechend der unter 3.1.2 beschriebenen Vorgehensweise, je 20 Prüfkörper hergestellt. Es wurden zwei Meßserien mit je 10 Proben von jedem Kompositmaterial durchgeführt. Die Prüfkörper der einen Serie wurde vor dem Abriebstest für 72 Stunden, die der anderen für drei Monate in deionisiertem Wasser gelagert. Jeweils vier dieser 10 Proben wurden bei linearer, weitere

vier Prüfkörper bei flächiger Bürstbewegung getestet. Die restlichen zwei Proben dienten als Referenzproben zur Bestimmung der jeweiligen Wasseraufnahme.

Die Auflagekraft der Zahnbürsten auf die Prüfkörperoberfläche wurde für alle durchzuführenden Bürstintervalle auf 2 N (Auflagegewicht 200g) eingestellt. Die Anzahl der Bürstzyklen betrug bei der linearen Bürstbewegung 4 x 20.250 und bei der flächigen 4 x 1.015, so daß während der jeweils vier Bürstintervalle eine Bürststrecke von umgerechnet 1.620 m zurückgelegt wurde. Unter diesen Prüfwerten konnten pro Tag 20.250 lineare und 1.015 flächige Bürstzyklen für je zwei Füllungsmaterialien durchgeführt werden. Nach diesen vier Bürstintervallen wurden die Zahnbürsten und das Abrasivmedium erneuert.

3.4 Herstellung des Abrasivmediums

Als Abrasivmedium diente ein Standard-Slurry, welches sich gemäß den Angaben von P & G Health and Beauty Care, Europe TC Mainz zusammensetzte.

Dabei wurde zuerst eine Tragant-Lösung aus 246,88g Glycerin, 246,88 g deionisiertem Wasser und 6,24 g Tragant (Fa. Merck, Darmstadt) hergestellt. Hierzu werden das Glycerin in ein Becherglas gefüllt, Tragant unter Rühren hinzugegeben bis beide Stoffe homogen vermischt sind. Daraufhin wird das deionisierte Wasser hinzugefügt und das Ganze mit einem Mixerstab (HR 1381, Fa. Philips) homogenisiert.

Zur Herstellung der Abrasiv-Slurry-Lösung werden 11,20 g Glycerin, 11,20 g deionisiertes Wasser sowie 44,20 g Tragant-Lösung in ein Becherglas vorgelegt. Unter Rühren wird portionsweise 33,40 g Calciumhydrogenphosphat (Fa. Merck, Darmstadt) hinzugegeben und mit dem Mixerstab homogen vermischt. Mengemäßig wurde pro Testtag soviel Slurry-Lösung hergestellt, daß in jedes der vier Suspensionsgefäße der Zahnbürstmaschine 100 ml der Lösung gegeben werden konnte und somit die Prüfkörper ausreichend mit Abrasivmedium bedeckt wurden.

3.5 Quantitative Abriebsmessung

Die quantitative Verschleißmessung der abradierten Prüfkörper aus der Zahnbürstmaschine erfolgte durch Gewichtsbestimmung (genauer zeitlicher Ablauf siehe Tabelle 3.3) mittels einer elektronischen Halb-Mikrowaage (R 200 D, Fa. Sartorius, Göttingen, Abb. 3.9), die eine Meßgenauigkeit von $\pm 0,02$ mg und eine Ablesegenauigkeit von $\pm 0,01$ mg aufweist.

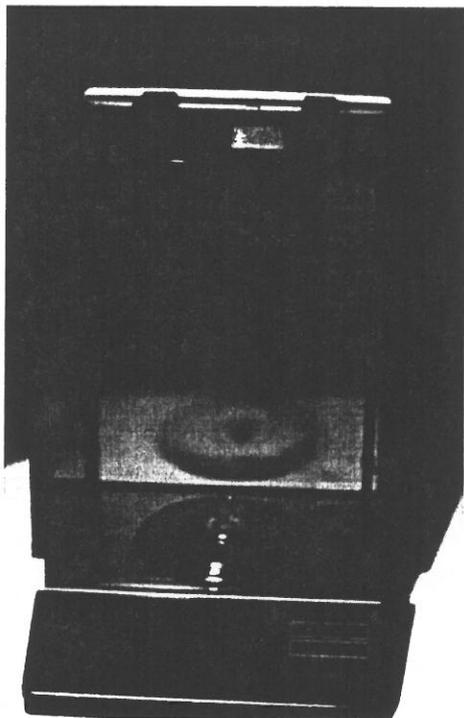


Abb. 3.9: Elektronische Halb-Mikrowaage zur quantitativen Verschleißmessung.

Nach der Prüfkörperherstellung (siehe 3.1.2) wurden die Proben, um einen möglichst reproduzierbaren Trocknungsvorgang sowie Trockenzustand der Füllungsmaterialien zu

erreichen, für 24 Stunden bei 37°C im Thermoschrank (Fa. Bauer, München) gelagert. Danach erfolgte die erste Gewichtsbestimmung (Meßwert 1) und darauf eine Lagerung der Prüfkörper für 72 Stunden bzw. 3 Monate bei Zimmertemperatur in deionisiertem Wasser. Nach dieser Wasserlagerung wurden die Proben für die Dauer des ersten Bürstintervalls dem Zahnbürstenabriebstest unterzogen. Anschließend erfolgte ein Abspülen der Prüfkörper mit Leitungswasser sowie eine zweiminütige Reinigung im Ultraschallbad (T-14, Fa. L & R Manufactory Company, New Jersey, USA).

Bevor die Proben erneut gewogen werden konnten, mußten sie im Thermoschrank für eine Stunde bei 37°C getrocknet werden, da wie die Vorversuche zeigten die Abgabe von ungebundenem Wasser von der Probenoberfläche zu einem meßbaren Gewichtsverlust führt.

Nach diesem Trocknungsvorgang erfolgte eine erneute Gewichtsbestimmung (Meßwert 2). Diese Wägung ergab bei allen Materialien eine Gewichtszunahme zum Ausgangswert (Meßwert 1). Die Ursache dieser Gewichtszunahme liegt in einem Überlagerungseffekt durch Wasseraufnahme, der den Gewichtsverlust durch den Bürstenabrieb überkompensiert. Um diesen Effekt quantitativ erfassen zu können, wurde mit Referenzproben eine weitere Meßserie unter den gleichen Versuchsbedingungen (Prüfkörperherstellung, Reinigungs- und Trocknungsmodus sowie Gewichtsbestimmung) durchgeführt, dabei jedoch auf den Verschleiß durch Bürstenabrasion verzichtet. Während die Testproben in der Zahnbürstmaschine abradierten, lagerten die Referenzproben bei Zimmertemperatur in deionisiertem Wasser.

Um den zeitlichen Verlauf des Abrasionsverhaltens der zu testenden Materialien erfassen zu können, ist es notwendig den Versuchsablauf in Bürstintervalle zu unterteilen und Zwischenwägungen durchzuführen. Die hierbei gewählte Vorgehensweise unterscheidet sich von der oben beschriebenen Abriebsmessung nur dahingehend, daß vor dem zweiten Bürstintervall (= reine Bürstzeit) und jedem darauffolgenden die Proben, inklusiv Referenzproben, nicht für 72 Stunden bzw. 3 Monate sondern für 24 Stunden bei Zimmertemperatur in deionisiertem Wasser gelagert werden. Der zeitliche Ablauf der

quantitativen Abriebsmessung ist für die Abrasionstestdauer von vier Bürstintervallen Tabelle 3.3 zu entnehmen.

Prüfkörper:	Referenzproben:
1. Lagerung für 24 h bei 37 ° C im Thermoschrank	1. Lagerung für 24 h bei 37 ° C im Thermoschrank
2. Gewichtsmessung 1 (Meßwert 1)	2. Gewichtsmessung 6 (Meßwert 6)
3. Lagerung für 72 h bzw. 3 Monate in aqua dest.	3. Lagerung für 72 h bzw. 3 Monate + die Zeit des Bürstintervalls 1 in aqua dest.
4. Bürstintervall 1	
5. Reinigung im Ultraschallbad für 2 min	
6. Lagerung für 1h bei 37 ° C im Thermoschrank	4. Lagerung für 1 h bei 37 ° C im Thermoschrank
7. Gewichtsmessung 2 (Meßwert 2)	5. Gewichtsmessung 7 (Meßwert 7)
8. Lagerung für 24 h in aqua dest.	6. Lagerung für 24h + die Zeit des Bürstintervalls 2 in aqua dest.
9. Bürstintervall 2	
10. Reinigung im Ultraschallbad für 2 min	
11. Lagerung für 1h bei 37 ° C im Thermoschrank	7. Lagerung für 1 h bei 37 ° C im Thermoschrank
12. Gewichtsmessung 3 (Meßwert 3)	8. Gewichtsmessung 8 (Meßwert 8)
13. Lagerung für 24 h in aqua dest.	9. Lagerung für 24h + die Zeit des Bürstintervalls 3 in aqua dest.
14. Bürstintervall 3	
15. Reinigung im Ultraschallbad für 2 min	
16. Lagerung für 1h bei 37 ° C im Thermoschrank	10. Lagerung für 1 h bei 37 ° C im Thermoschrank
17. Gewichtsmessung 4 (Meßwert 4)	11. Gewichtsmessung 9 (Meßwert 9)
18. Lagerung für 24 h in aqua dest.	12. Lagerung für 24h + die Zeit des Bürstintervalls 4 in aqua dest.
19. Bürstintervall 4	
20. Reinigung im Ultraschallbad für 2 min	
21. Lagerung für 1 h bei 37 ° C im Thermoschrank	13. Lagerung für 1 h bei 37 ° C im Thermoschrank
22. Gewichtsmessung 5 (Meßwert 5)	14. Gewichtsmessung 10 (Meßwert 10)

Tab. 3.3: Zeitlicher Ablauf der quantitativen Abriebsmessung.

Die ermittelten Gewichtszunahmen der Referenzprüfkörper entsprechen der reinen Wasseraufnahme der Füllungsmaterialien und lagen über den Gewichtszunahmen der Prüfkörper die gebürstet wurden. Die Wasseraufnahmen der Referenzprüfkörper pro Füllungsmaterial und Wasserlagerungszeitraum errechnet sich nach folgenden Formeln:

H₂O-Aufnahmen für den Wasserlagerungszeitraum von:

- 72 h bzw. 3 Monaten + Zeit des 1. Bürstintervalls:

Meßwert 7 - Meßwert 6 = H₂O-bedingte Gewichtszunahme 1

- 24 h + Zeit des 2. Bürstintervalls:

Meßwert 8 - Meßwert 7 = H₂O-bedingte Gewichtszunahme 2

- 24 h + Zeit des 3. Bürstintervalls:

Meßwert 9 - Meßwert 8 = H₂O-bedingte Gewichtszunahme 3

- 24 h + Zeit des 4. Bürstintervalls:

Meßwert 9 - Meßwert 8 = H₂O-bedingte Gewichtszunahme 4

Da jeweils zwei Referenzproben pro Füllungsmaterial und Lagerungsart zur Verfügung standen, wurde aus den zwei errechneten Gewichtszunahmen der arithmetische Mittelwert gebildet (= arithmetischer Mittelwert 1-4).

Der Gewichtsverlust der Prüfkörper durch die Zahnbürstenabrasion errechnet sich daher nach folgender Gleichung:

Bürstabrieb = (überlagerte H₂O-Aufnahme + Bürstabrieb) - H₂O-Aufnahme

Der durch das Bürsten verursachte Gewichtsverlust der Testprüfkörper konnte für jedes der vier durchgeführten Bürstintervalle mit den folgenden Detailformeln errechnet werden.

Gewichtsverlust der Testprüfkörper für:

Bürstintervall 1

(Meßwert 2 - Meßwert 1) - arithmetischer Mittelwert 1

Bürstintervall 2

(Meßwert 3 - Meßwert 2) - arithmetischer Mittelwert 2

Bürstintervall 3

(Meßwert 4 - Meßwert 3) - arithmetischer Mittelwert 3

Bürstintervall 4

(Meßwert 5 - Meßwert 4) - arithmetischer Mittelwert 4

3.6 Morphologische Verschleißanalyse

Nach Beendigung des Drei-Medien-Abrasionsversuches wurden von je einer Referenzprobe und einem Prüfkörper jeder Meßserie Aufnahmen unter dem Raster-elektronenmikroskop (Typ: AMR 1200, Fa. Leitz, Wetzlar) bei 1000 facher Vergrößerung und 15 kV angefertigt. Dabei wurden die Proben so justiert, daß der Elektronenstrahl im 90 ° Winkel zur Probenoberfläche stand.

4 Ergebnisse

Die Auswertung der Meßergebnisse aus der quantitativen Abriebsmessung (siehe 3.5) wurde mit der Software SPSS/PC vorgenommen. Aufgrund der geringen Anzahl von nur vier Prüfkörpern pro Füllungsmaterial und Testbedingung beschränkte man sich bei der Auswertung auf die Berechnung der absoluten Mittelwerte. Die Ergebnisse dieser deskriptiven Statistik sind dem tabellarischen Anhang zu entnehmen.

4.1 Experimentelle Kompositmaterialien (Resine)

Bei diesen experimentellen Materialien konnten die, durch das Bürsten verursachten, Gewichtsverluste der Prüfkörper auf das abradierete Volumen umgerechnet werden. Dieser volumetrische Verschleiß errechnet sich nach folgender Formel:

$$V = m / \rho$$

(mit V = abradieretes Volumen; m = Gewichtsverlust; ρ = Dichte des Kompositmaterials)

Nach Aussagen des Herstellers weisen die vier getesteten Resine folgende Materialdichten auf (siehe Tabelle 4.1).

Materialdichte in kg/ m ³	
Resin I	2,42 (hoch gefüllt. & grob)
Resin II	1,97 (niedrig gefüllt & grob)
Resin III	2,42 (hoch gefüllt & feinst)
Resin IV	1,97 (niedrig gefüllt & feinst)

Tab. 4.1: Materialdichten der getesteten Resine mit Angabe des Füllkörpergehalts und der Füllstoffgröße.

Die in Tabelle 4.2 angegebenen Zahlenwerte stellen die arithmetischen Mittelwerte aus den volumetrischen Verschleißberechnungen von jeweils vier Prüfkörpern dar.

Volumenverlust in μm^3 für:	72 stündige H_2O -Lagerung		3 monatige H_2O -Lagerung	
	lineare Bewegung	flächige Bewegung	lineare Bewegung	flächige Bewegung
Resin I (hoch gefüllt & grob) und:				
Bürstintervall 1	748	607	1408	1659
Bürstintervall 2	611	669	1024	1033
Bürstintervall 3	607	685	826	1302
Bürstintervall 4	733	900	1195	779
Gesamtvolumen- verlust	2699	2861	4453	4773
Resin II (niedrig gefüllt & grob) und:				
Bürstintervall 1	185	698	881	1789
Bürstintervall 2	416	486	1019	730
Bürstintervall 3	277	282	810	1033
Bürstintervall 4	211	365	773	1037
Gesamtvolumen- verlust	1089	1831	3483	4589
Resin III (hoch gefüllt & feinst) und:				
Bürstintervall 1	860	1076	1537	1653
Bürstintervall 2	741	846	1055	1566
Bürstintervall 3	619	898	1314	654
Bürstintervall 4	689	1110	460	500
Gesamtvolumen- verlust	2909	3930	4366	4373
Resin IV (niedrig gefüllt & feinst) und:				
Bürstintervall 1	464	415	802	1553
Bürstintervall 2	365	936	694	568
Bürstintervall 3	535	507	920	624
Bürstintervall 4	542	791	656	903
Gesamtvolumen- verlust	1906	2649	3072	3648

Tab. 4.2: Mittlere Volumenverluste in μm^3 der Resine in Abhängigkeit von Wasserlagerungszeitraum und Bürstbewegungsart.

4.1.1 Volumetrischer Verschleiß im zeitlichen Verlauf

Ein zeitlich lineares Verschleißverhalten kann bei den vier getesteten Resinen nach Ablauf von vier Bürstintervallen festgestellt werden (vgl. Abb.: 4.1-4.4)

Lineare Volumenverluste sind nach der 72 stündigen Wasserlagerung und linearen Bürstbewegung bei allen vier Resingruppen zu beobachten. Mit Ausnahme von Resin IV zeigen nach diesem Wasserlagerungszeitraum Resin I, II und III auch bei der flächigen Bürstbelastung ein zeitlich lineares Abriebverhalten. Bei den niedrig gefüllten experimentellen Kompositen (Resin II & IV) beobachtet man mit Beginn des ersten Bürstintervalles nach der dreimonatigen Wasserlagerung und linearen Bürstbewegung ein lineares Verschleißverhalten.

Nach der dreimonatigen Lagerung in deionisiertem Wasser weisen die hoch gefüllten Resine (I & III) bei beiden Bürstbewegungsarten, die niedrig Gefüllten (Resin II & IV) nur nach der flächigen Bürstenbelastung eine initial deutlich erhöhte volumetrische Abriebsrate auf. Eine Linearität im zeitlichen Verschleißverhalten stellt sich erst in den Bürstintervallen 2 bis 4 ein.

4.1.2. Ranking der Resine in Bezug auf ihre Abrasionsfestigkeit

Aus den Gesamtverlustwerten nach vier Bürstintervallen ergibt sich, in Abhängigkeit von Wasserlagerungszeitraum und Bürstbewegungsart, für die getesteten Resine folgende absteigende Reihenfolge ihrer Abrasionsfestigkeit (vgl. Abb. 4.5):

a. Nach der 72 stündigen Wasserlagerung und linearen Bürstbewegung:

Resin II ($1089 \mu\text{m}^3$) < Resin IV ($1906 \mu\text{m}^3$) < Resin I ($2699 \mu\text{m}^3$) < Resin III ($2909 \mu\text{m}^3$)

b. Nach der 72 stündigen Wasserlagerung und flächigen Bürstbewegung:

Resin II ($1831 \mu\text{m}^3$) < Resin IV ($2649 \mu\text{m}^3$) < Resin I ($2861 \mu\text{m}^3$) < Resin III ($3930 \mu\text{m}^3$)

c. Nach der dreimonatigen Wasserlagerung und linearen Bürstbewegung:

Resin IV ($3072 \mu\text{m}^3$) < Resin II ($3483 \mu\text{m}^3$) < Resin III ($4366 \mu\text{m}^3$) < Resin I ($4453 \mu\text{m}^3$)

d. Nach der dreimonatigen Wasserlagerung und flächigen Bürstbewegung:

Resin IV ($3648 \mu\text{m}^3$) < Resin III ($4373 \mu\text{m}^3$) < Resin II ($4589 \mu\text{m}^3$) < Resin I ($4773 \mu\text{m}^3$)

Nach vier durchlaufenen Bürstintervallen zeigen die Resine mit geringem Füllkörperanteil (Resin II & IV), unabhängig von Lagerungs- und Bürstbewegungsart, einen niedrigeren Gesamtvolumenverlust als die hoch gefüllten Materialien (Resin I & III).

Bei gleichem Füllkörpergehalt weisen die experimentellen Komposite mit groben Füllern (Resin I & II) nach der 72 stündigen Wasserlagerung eine höhere Verschleißfestigkeit als die feinst gefüllten Resine (III & IV) auf.

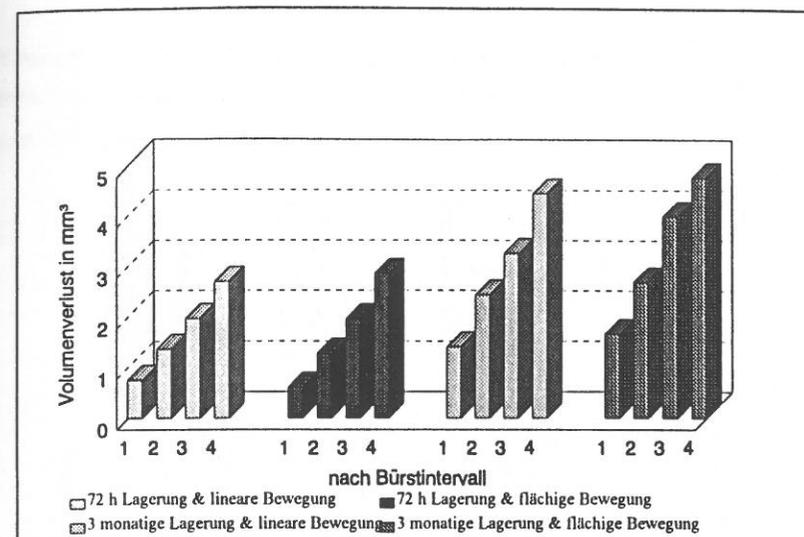


Abb. 4.1: Volumenverluste im zeitlichen Verlauf: Resin I (hoch gefüllt & grob).

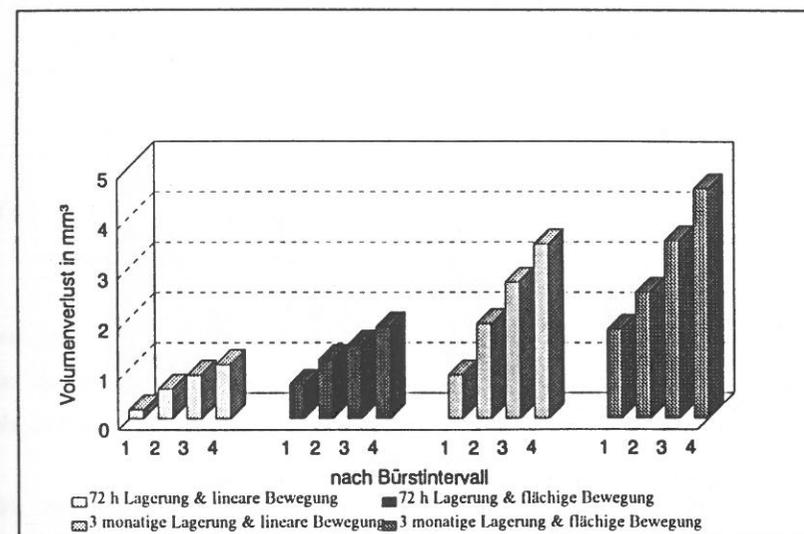


Abb. 4.2: Volumenverluste im zeitlichen Verlauf: Resin II (niedrig gefüllt & grob).

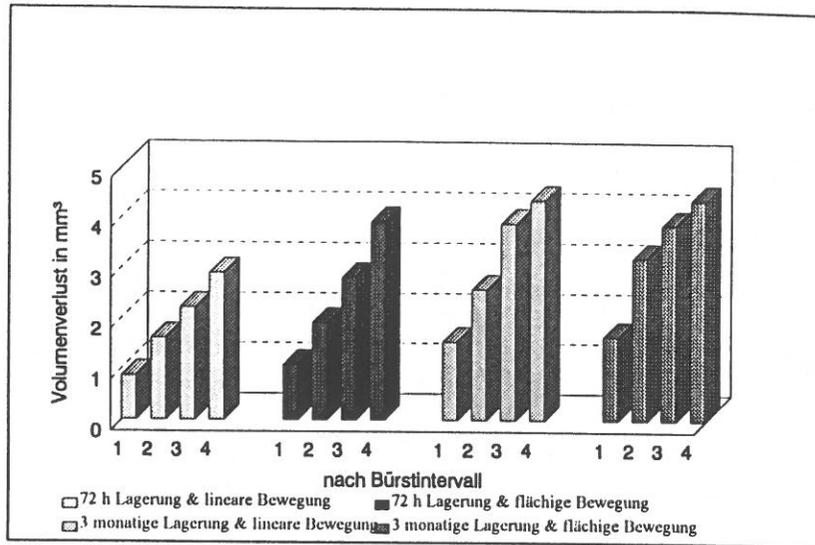


Abb. 4.3: Volumenverluste im zeitlichen Verlauf: Resin III (hoch gefüllt & feinst).

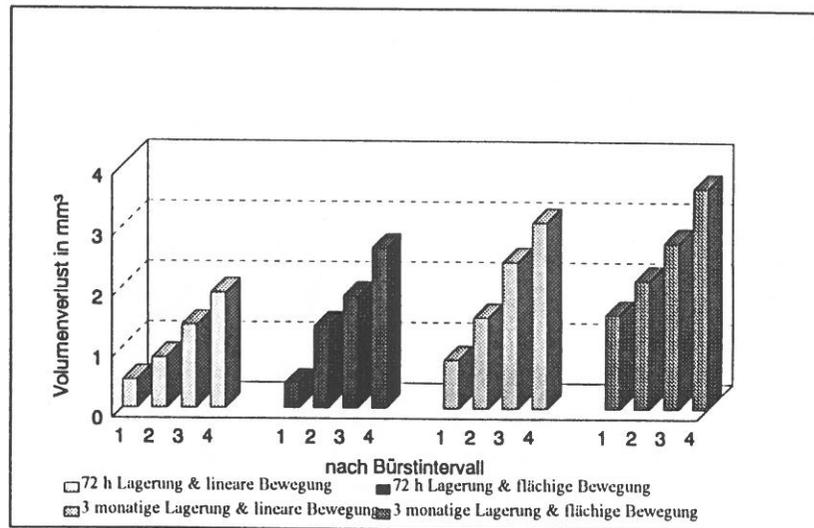


Abb. 4.4: Volumenverluste im zeitlichen Verlauf: Resin IV (niedrig gefüllt & feinst).

Hingegen ist nach der dreimonatigen Wasserlagerung bei den feinst gefüllten Füllungsmaterialien eine höhere volumetrische Verschleißresistenz im Vergleich zu den grob Gefüllten zu beobachten.

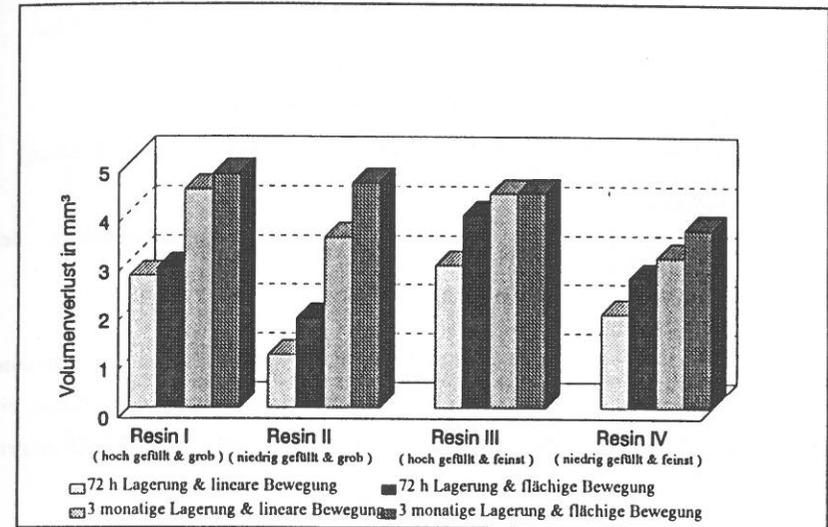


Abb. 4.5: Gesamtvolumenverluste der Resine nach vier Bürstintervallen.

4.1.3 Einfluß von Wasserlagerungszeitraum und Bürstbewegungsart auf das Verschleißverhalten der Resine

Abbildung 4.5 zeigt, daß unabhängig von der Wasserlagerungsdauer, die flächige Bürstbewegung, bei gleicher Bürststrecke (1620 m), einen höheren Gesamtvolumenverlust als die lineare Bürstbewegung verursacht.

Die dreimonatige Wasserlagerung hatte unabhängig von der Bürstbewegungsart bei allen getesteten Resinen im Vergleich zur 72 stündigen Wasserlagerung eine erniedrigte Verschleißresistenz zur Folge (vgl. Abb. 4.5).

4.1.4 Wasseraufnahmen der Resine

Bezüglich der Wasseraufnahme ergibt sich für diese experimentellen Komposite folgende aufsteigende Reihenfolge:

a. Nach der 72 stündigen Wasserlagerung:

Resin III (1335 μg) < Resin I (1650 μg) < Resin IV (2115 μg) < Resin II (2385 μg)

b. Nach der 3 monatigen Wasserlagerung:

Resin I (6280 μg) < Resin III (7890 μg) < Resin IV (13010 μg) < Resin II (13950 μg)

Die angegebenen Zahlenwerte entsprechen der reinen Wasseraufnahme der Referenzproben pro Wasserlagerungszeitraum (Berechnung siehe Formel S. 29).

Obwohl es sich durch die geringe Anzahl von zwei Referenzproben nur um eine Abschätzung handelt, läßt sich doch folgender Zusammenhang erkennen. Die Resine mit 50 %igen (Gewichtsprozent) Füllkörpergehalt (Resin II & IV) zeigten im Vergleich zu den höher gefüllten Materialien (Resin I & III) eine größere Wasseraufnahme.

4.2 Überwiegend mikrogefüllte Kompositmaterialien

Aufgrund unzureichender Herstellerangaben mußte bei den überwiegend mikrogefüllten sowie den Hybrid- (siehe 4.3) Kompositmaterialien auf die Umrechnung der ermittelten Gewichtsverluste in Volumenverluste verzichtet werden.

4.2.1 Abriebsverhalten im zeitlichen Verlauf

Anhand der Abbildungen 4.6 und 4.7 läßt sich bei Durafill® und Heliomolar radiopaque® nach 72 stündiger Wasserlagerung und bei beiden Bürstbewegungsarten eine Linearität im zeitlichen Abriebverhalten feststellen.

Sowohl bei der linearen als auch bei der flächigen Bürstbewegung zeigen nach der dreimonatigen Wasserlagerung beide Füllungsmaterialien initial hohe Verschleißraten. In den darauffolgenden Bürstintervallen (2-4) ist ein zeitlich lineares Abriebverhalten zu beobachten (vgl. Abb. 4.6 & 4.7).

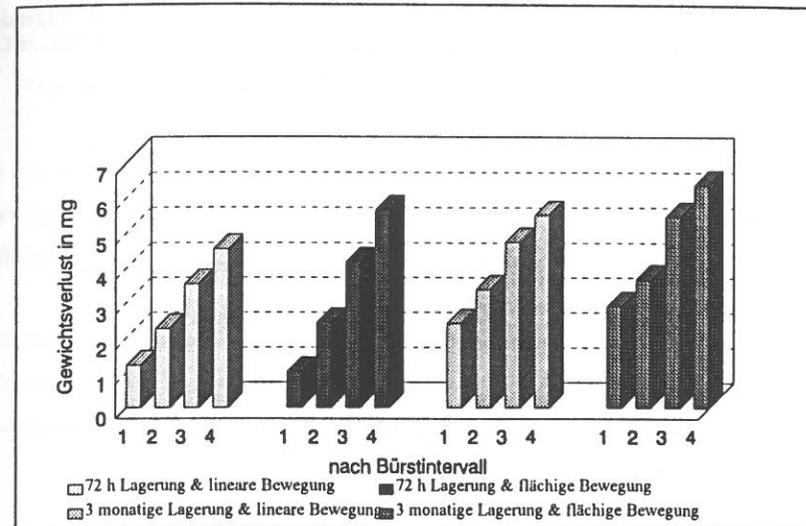


Abb. 4.6: Gewichtsverluste im zeitlichen Verlauf: Durafill®.

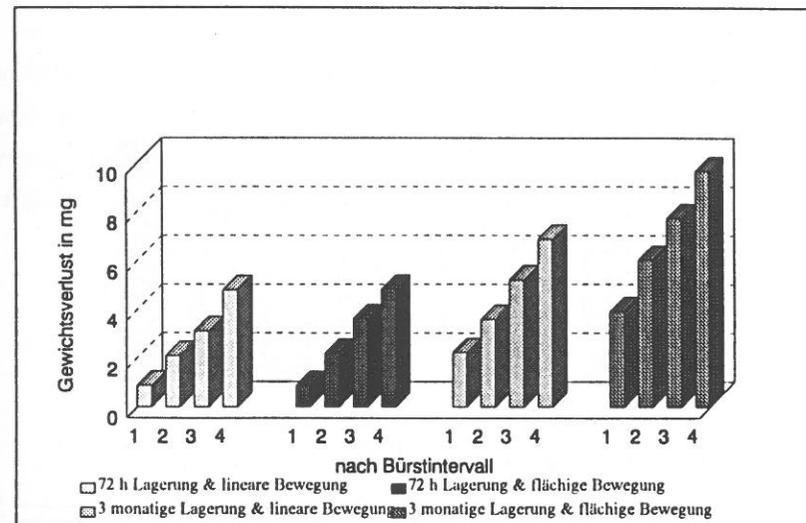


Abb. 4.7: Gewichtsverluste im zeitlichen Verlauf: Heliomolar radiopaque®.

4.2.2 Ranking von Durafill® und Heliomolar radiopaque® in Bezug auf ihre Abrasionsfestigkeit

Nach vier Bürstintervallen ergibt sich, in Abhängigkeit von Wasserlagerungszeitraum und Bürstbewegungsart, für die beiden überwiegend mikrogefüllten Materialien folgende aufsteigende Reihenfolge der Gesamtgewichtsverluste (vgl.: Abb. 4.8):

- Nach der 72 stündigen Wasserlagerung und linearen Bürstbewegung:
Durafill® (4544 µg) < Heliomolar radiopaque® (4822 µg)
- Nach der 72 stündigen Wasserlagerung und flächigen Bürstbewegung:
Heliomolar radiopaque® (4833 µg) < Durafill® (5651 µg)
- Nach der 3 monatigen Wasserlagerung und linearen Bürstbewegung:
Durafill® (5503 µg) < Heliomolar radiopaque® (6886 µg)
- Nach der 3 monatigen Wasserlagerung und flächigen Bürstbewegung:
Durafill® (6369 µg) < Heliomolar radiopaque® (9679 µg)

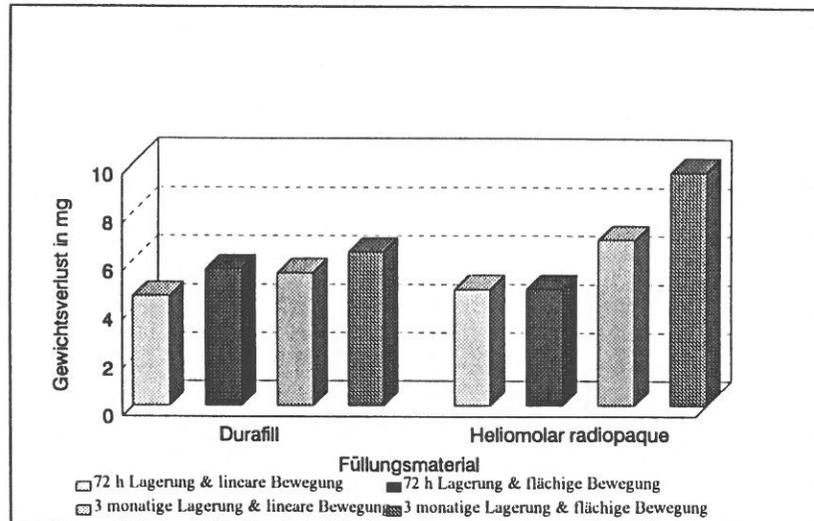


Abb. 4.8: Gesamtgewichtsverluste nach vier Bürstintervallen.

Durafill® erwies sich (bis auf Versuchsbedingung b) als das abrasionsresistentere Füllungsmaterial. Am deutlichsten wird die Überlegenheit von Durafill® gegenüber Heliomolar radiopaque® nach der dreimonatigen Wasserlagerung ersichtlich.

4.2.3 Einfluß von Wasserlagerungszeitraum und Bürstbewegungsart auf das Verschleißverhalten von Durafill® und Heliomolar radiopaque®

Wie aus Abbildung 4.8 ersichtlich ist, zeigt die flächige Bürstbewegung auch bei diesen überwiegend mikrogefüllten Kompositmaterialien eine größere abrasive Wirkung auf die Prüfkörperoberfläche als die lineare Bewegungsart.

Nach der dreimonatigen Wasserlagerung sind bei Durafill® und Heliomolar radiopaque® unabhängig von der Bürstbewegungsart die gemessenen Gesamtgewichtsverluste nach vier Bürstintervallen gegenüber den nach 72 stündiger Wasserlagerung deutlich erhöht.

4.2.4 Wasseraufnahmen der überwiegend mikrogefüllten Kompositmaterialien

Die ermittelten Werte der Wasseraufnahme nach 72 stündiger Probenlagerung in deionisiertem Wasser unterschieden sich nur geringfügig (Heliomolar (1920 µg) und Durafill (1935 µg)). Hingegen zeigten, nach der dreimonatigen Wasserlagerung, die Referenzproben von Durafill® (10310 µg) eine deutlich geringere Wasseraufnahme als die von Heliomolar radiopaque® (13205 µg).

4.3 Hybridkompositmaterialien

4.3.1 Abriebsverhalten im zeitlichem Verlauf

Anhand der gemessenen Gewichtsverluste ist nach der 72 stündigen Wasserlagerung und linearen Bürstenbewegung bei den Füllungsmaterialien Arabesk®, Blend a Lux®, Tetric® und Pertac Hybrid® ein zeitlich lineares Abriebverhalten zu erkennen (vgl. Abb. 4.9, 4.10, 4.11 & 4.12). Blend a Lux®, Tetric® und Pertac Hybrid® zeigen nach diesem Wasserlagerungszeitraum auch bei der flächigen Bürstbelastung eine Linearität im zeitlichen Verschleißverhalten (vgl. Abb. 4.9, 4.10, 4.11 & 4.12).

Im ersten Bürstintervall sind nach der 3 monatigen Wasserlagerung unabhängig von der Bürstenbewegungsart bei allen getesteten Hybridkompositen erhöhte Gewichtsverluste zu verzeichnen (vgl. Abb. 4.9-4.14). Nach diesem initial hohen Abriebswerten stellte sich bei Arabesk®, Blend a Lux®, Tetric® und Pertac Hybrid® ein lineares Verschleißverhalten ein (vgl. Abb. 4.9, 4.10, 4.11 & 4.12).

Die Estilux Hybrid® Prüfkörpern verzeichneten unter allen angewandten Versuchsparametern in den ersten beiden Bürstintervallen deutlich erhöhte Abriebsraten. In den darauffolgenden Bürstintervallen ist eine Linearität im zeitlichen Abrasionsverhalten festzustellen (vgl. Abb. 4.13).

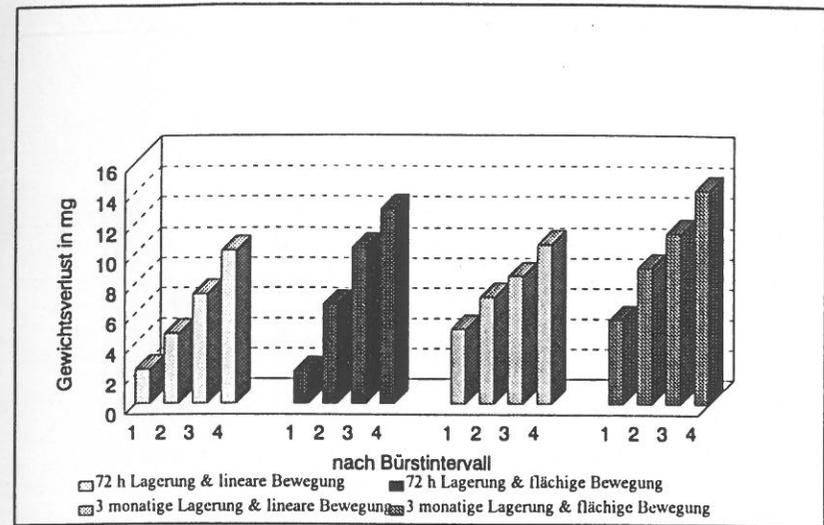


Abb. 4.9: Gewichtsverluste im zeitlichen Verlauf: Arabesk®.

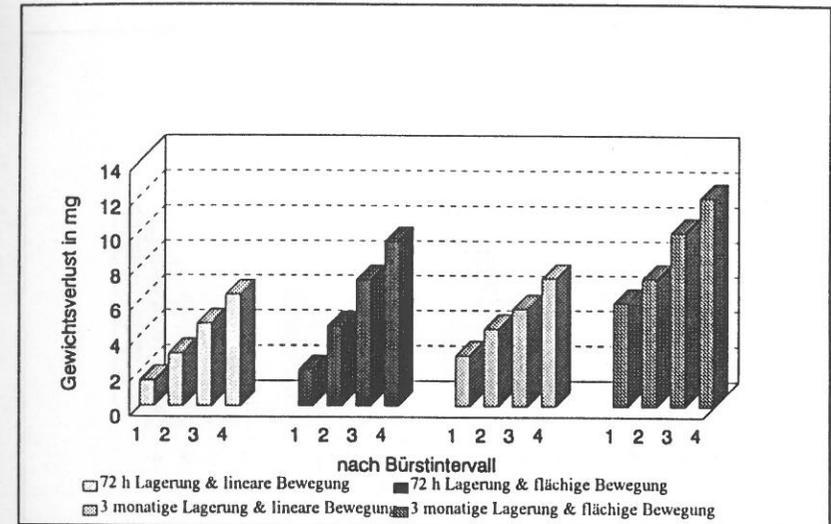


Abb. 4.10: Gewichtsverluste im zeitlichen Verlauf: Blend a Lux®.

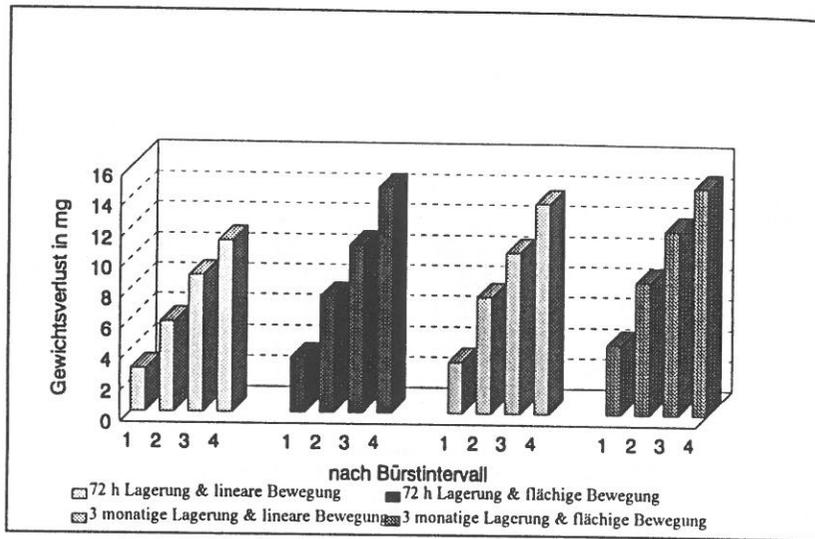


Abb. 4.11: Gewichtsverluste im zeitlichen Verlauf: Tetric®.

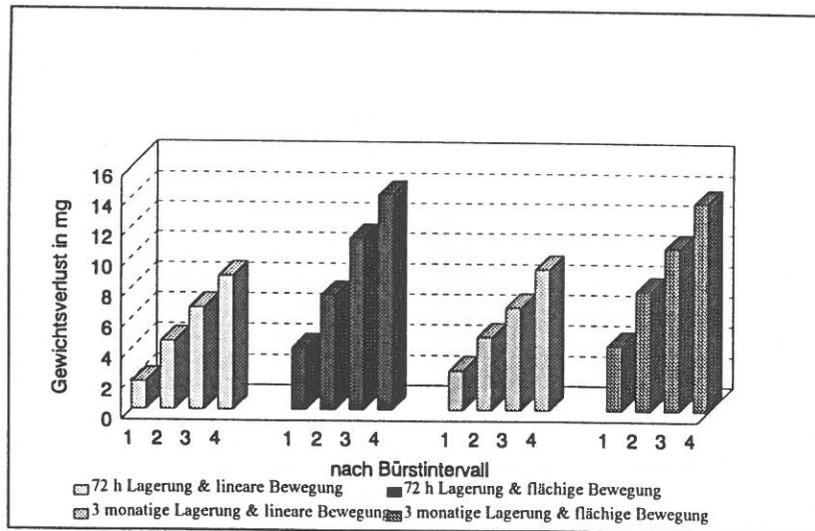


Abb. 4.12: Gewichtsverluste im zeitlichen Verlauf: Pertac Hybrid®.

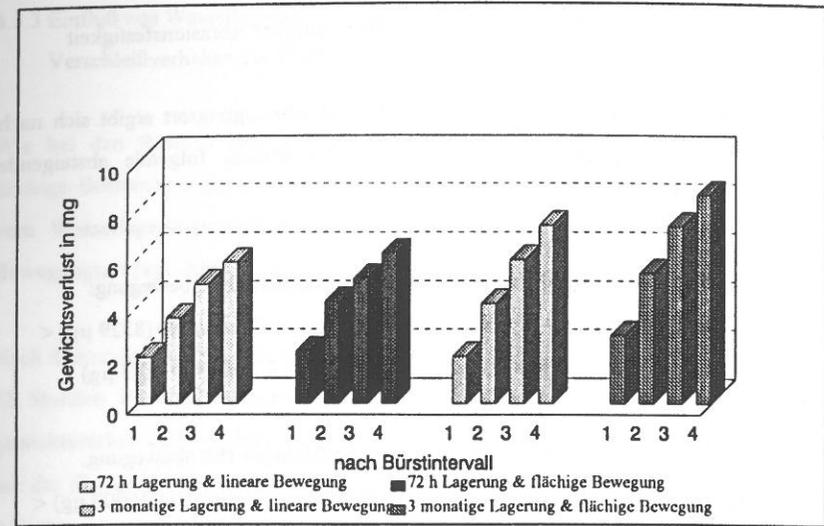


Abb. 4.13: Gewichtsverluste im zeitlichen Verlauf: Estilux Hybrid®.

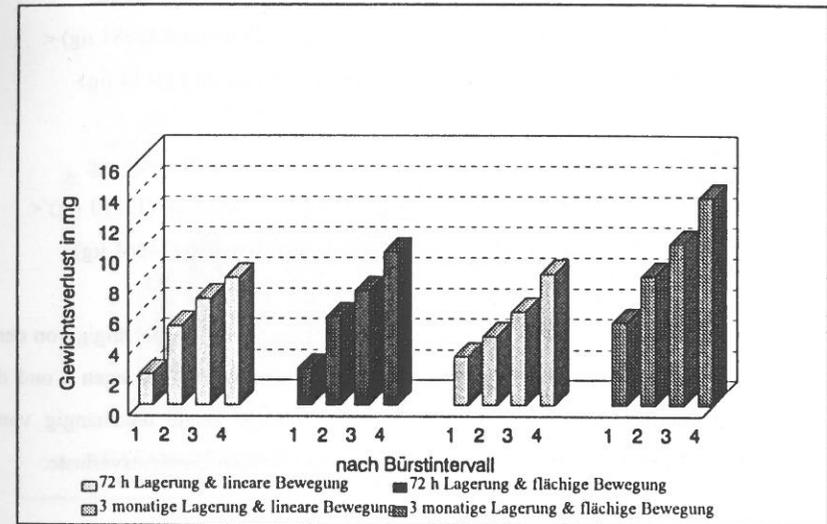


Abb. 4.14: Gewichtsverluste im zeitlichen Verlauf: Charisma®.

4.3.2 Ranking der Hybridkompositmaterialien in Bezug auf ihre Abrasionsfestigkeit

In Abhängigkeit von Wasserlagerungszeitraum und Bürstbewegungsart ergibt sich nach vier Bürstintervallen, in Bezug auf den Drei-Medien-Abrieb, folgende absteigende Reihenfolge der Abriebsfestigkeit:

a. Nach der 72 stündigen Wasserlagerung und linearen Bürstbewegung:

Estilux Hybrid® (5804 µg) < Blend a Lux® (6339 µg) < Charisma® (8329 µg) < Pertac Hybrid® (8786 µg) < Arabesk® (10169 µg) < Tetric® (11183 µg)

b. Nach der 72 stündigen Wasserlagerung und flächigen Bürstbewegung:

Estilux Hybrid® (6184 µg) < Blend a Lux® (9404 µg) < Charisma® (10000 µg) < Arabesk® (12857 µg) < Pertac Hybrid® (14181 µg) < Tetric® (14745 µg)

c. Nach der 3 monatigen Wasserlagerung und linearen Bürstbewegung:

Blend a Lux® (7281 µg) < Estilux Hybrid® (7326 µg) < Charisma® (8581 µg) < Pertac Hybrid® (9288 µg) < Arabesk® (10563 µg) < Tetric® (13754 µg)

d. Nach der 3 monatigen Wasserlagerung und flächigen Bürstbewegung:

Estilux Hybrid® (8576 µg) < Blend a Lux® (11921 µg) < Charisma® (13583 µg) < Pertac Hybrid® (13703 µg) < Arabesk® (14091 µg) < Tetric® (14861 µg)

Die getesteten Hybride verhalten sich in der oben angegebenen Reihung abhängig von der jeweiligen Versuchsbedingung sehr uneinheitlich. Nur bei den Testbedingungen a und d kann eine identische Reihenfolge festgestellt werden. Tetric® zeigte unabhängig von Wasserlagerungsdauer und Bürstbewegungsart jeweils die höchsten Gewichtsverluste.

4.3.3 Einfluß von Wasserlagerungszeitraum und Bürstbewegungsart auf das Verschleißverhalten der Hybridkompositmaterialien

Wie bei den Resinen und überwiegend mikrogefüllten Kompositen verursachte die flächige Bürstenbewegung auch bei den Prüfkörpern dieser Materialgruppe unabhängig vom Wasserlagerungszeitraum einen höheren Gesamtgewichtsverlust als die lineare Bewegungsart (vgl. Abb. 4.15).

Nach dreimonatiger Wasserlagerung wiesen die Prüfkörper gegenüber den Proben die nur 72 Stunden in Wasser lagerten bei beiden Bewegungsarten einen erhöhten Gesamtgewichtsverlust auf (vgl. Abb. 4.15). Die Prüfkörper von Pertac Hybrid® zeigten hingegen bei der flächigen Bürstenbewegung und dreitägiger Wasserlagerung geringfügig höhere Abriebswerte als bei gleicher Bewegungsart und dreimonatiger Lagerung (vgl. Abb. 4.15).

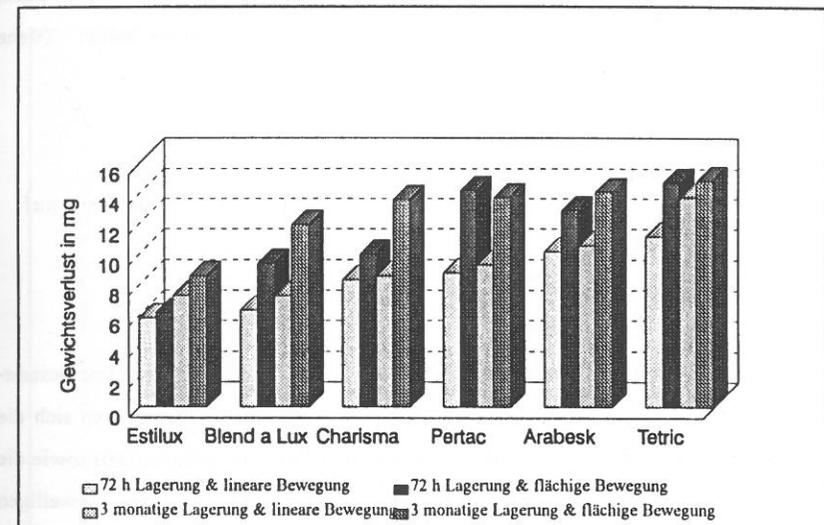


Abb. 4.15: Gesamtgewichtsverluste der Hybridkomposite nach vier Bürstintervallen.

4.3.4 Wasseraufnahmen der Hybridkompositmaterialien

In Bezug auf die Wasseraufnahme ergab sich bei dieser Materialgruppe folgende aufsteigende Reihenfolge:

a. Nach der 72 stündigen Wasserlagerung:

Pertac Hybrid® (835 µg) < Blend a Lux® (845 µg) < Arabesk® (1285 µg) <

Tetric® (1675 µg) < Charisma® (1695 µg) < Estilux Hybrid® (2450 µg)

b. Nach der 3 monatigen Wasserlagerung:

Pertac Hybrid® (3750 µg) < Estilux Hybrid® (7130 µg) < Blend a Lux® (8230 µg) <

Arabesk® (10265 µg) < Charisma® (10530 µg) < Tetric® (12955 µg)

Obwohl diese Füllungsmaterialien einen annähernd gleichen Füllkörpergehalt aufweisen, zeigten sich doch große Unterschiede im Wasseraufnahmeverhalten (siehe Diskussionspunkt 5.6).

4.4 Zusammenfassendes Ranking aller getesteten Füllungsmaterialien in Bezug auf ihre Verschleißfestigkeit

Abbildungen 4.16 und 4.17 zeigen die nach vier Bürstintervallen ermittelten Gesamtgewichtsverluste aller in dieser Studie verwendeten Materialien. Dabei erwiesen sich die überwiegend mikrogefüllten Komposite (Durafill® & Heliomolar radiopaque®) sowie die 50% gefüllten Resine (Resin II & IV) unabhängig von den jeweiligen Versuchsbedingungen im Vergleich zu den Hybridmaterialien als abriebsresistenter.

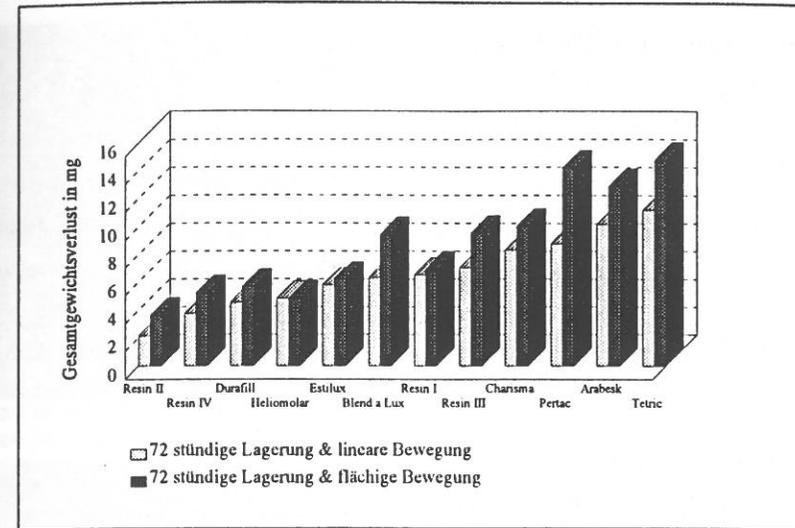


Abb. 4.16: Gesamtgewichtsverluste nach vier Bürstintervallen und 72 stündiger Wasserlagerung.

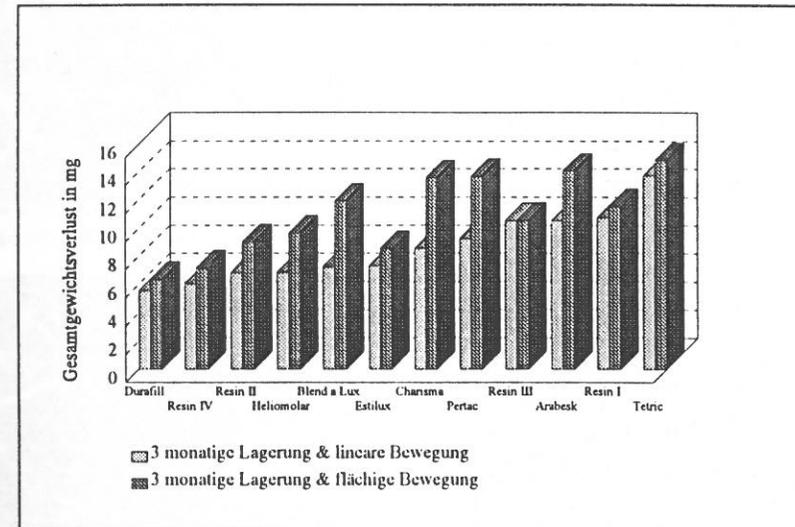


Abb. 4.17: Gesamtgewichtsverluste nach vier Bürstintervallen und 3 monatiger Wasserlagerung.

4.5 Ergebnisse der morphologischen Verschleißanalyse

Die Abbildungen 4.18 bis 4.89 zeigen die mit dem Rasterelektronenmikroskop aufgenommenen Prüfkörperoberflächen vor und nach der Bürstbelastung bei 1000 facher Vergrößerung. Aus Gründen der Übersicht sind die Legenden der einzelnen rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen sehr knapp gehalten, eine detaillierte Interpretation dieser morphologischen Oberflächenanalyse ist dem Diskussionspunkt 5.7 zu entnehmen.

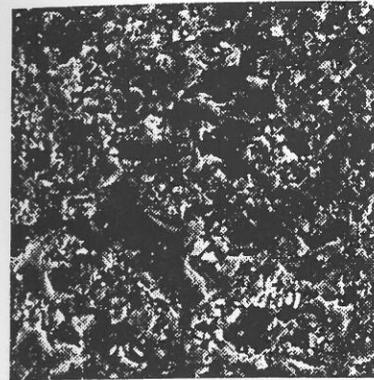


Abb.4.18.: Resin I nach 72 stündiger H₂O-Lagerung und 0 Bürstzyklen.

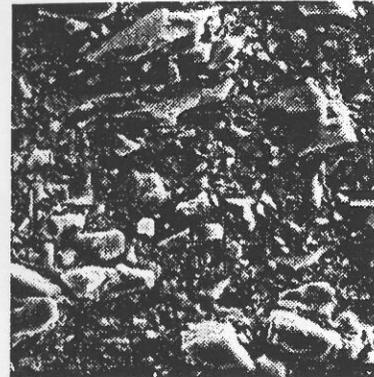


Abb.4.20.: Resin I nach 72 stündiger H₂O-Lagerung und 82.000 linearen Bürstzyklen.

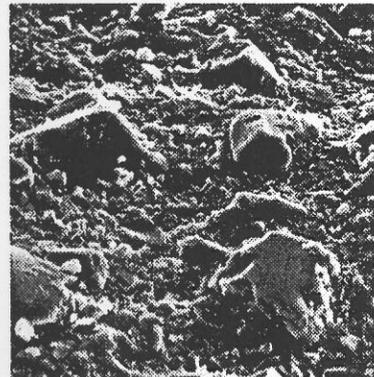


Abb.4.22.: Resin I nach 72 stündiger H₂O-Lagerung und 4.060 flächigen Bürstzyklen.

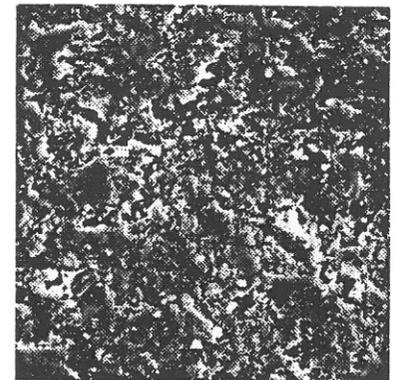


Abb.4.19.: Resin I nach 3 monatiger H₂O-Lagerung und 0 Bürstzyklen.

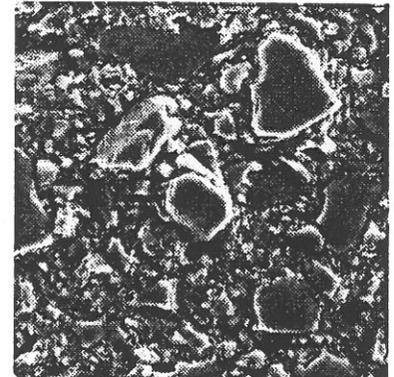


Abb.4.21.: Resin I nach 3 monatiger H₂O-Lagerung und 82.000 linearen Bürstzyklen.

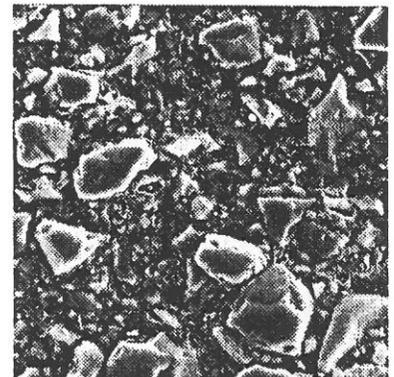


Abb.4.23.: Resin I nach 3 monatiger H₂O-Lagerung und 4.060 flächigen Bürstzyklen.

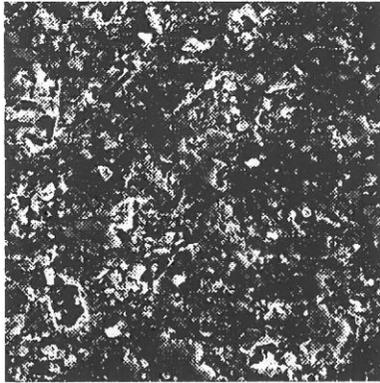


Abb.4.24.: Resin II nach 72 stündiger H₂O-Lagerung und 0 Bürstzyklen.



Abb.4.25.: Resin II nach 3 monatiger H₂O-Lagerung und 0 Bürstzyklen.

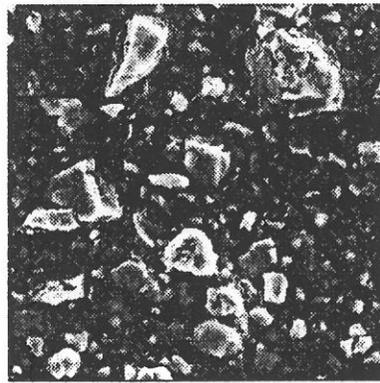


Abb.4.26.: Resin II nach 72 stündiger H₂O-Lagerung und 82.000 linearen Bürstzyklen.

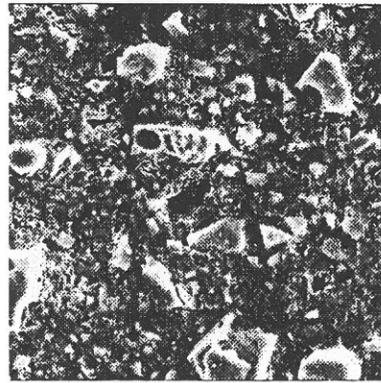


Abb.4.27.: Resin II nach 3 monatiger H₂O-Lagerung und 82.000 linearen Bürstzyklen.

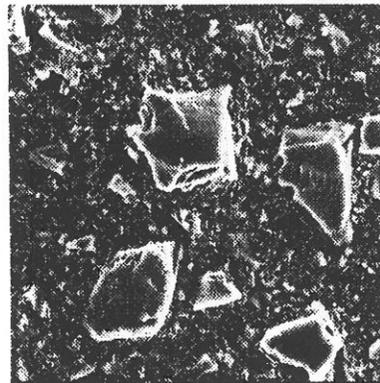


Abb.4.28.: Resin II nach 72 stündiger H₂O-Lagerung und 4.060 flächigen Bürstzyklen.

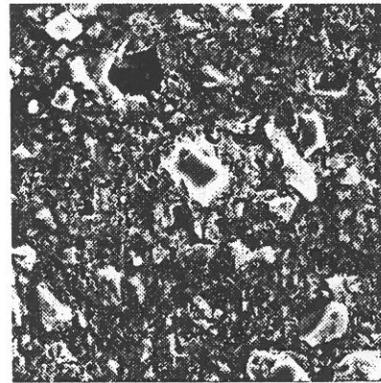


Abb.4.29.: Resin II nach 3 monatiger H₂O-Lagerung und 4.060 flächigen Bürstzyklen.



Abb.4.30.: Resin III nach 72 stündiger H₂O-Lagerung und 0 Bürstzyklen.

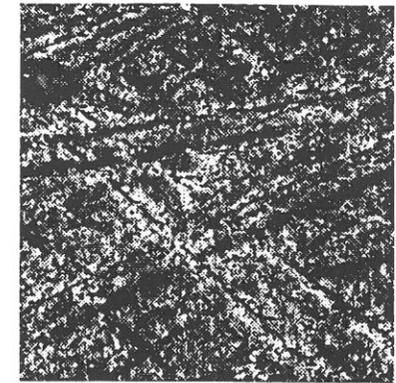


Abb.4.31.: Resin III nach 3 monatiger H₂O-Lagerung und 0 Bürstzyklen.

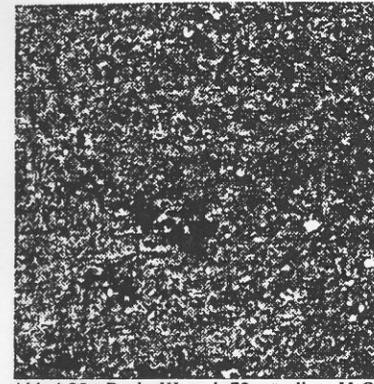


Abb.4.32.: Resin III nach 72 stündiger H₂O-Lagerung und 82.000 linearen Bürstzyklen.

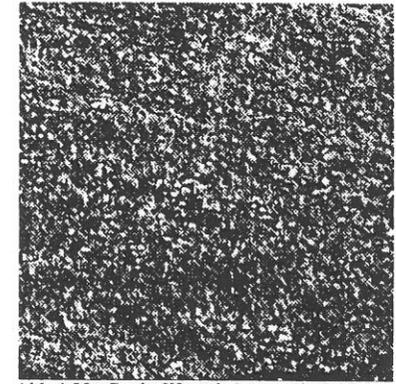


Abb.4.33.: Resin III nach 3 monatiger H₂O-Lagerung und 82.000 linearen Bürstzyklen.

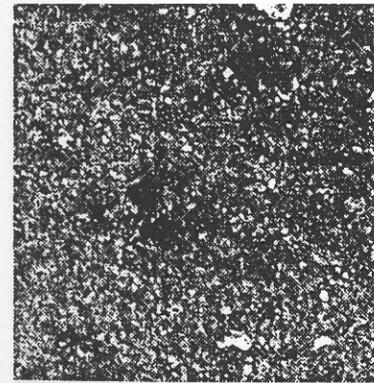


Abb.4.34.: Resin III nach 72 stündiger H₂O-Lagerung und 4.060 flächigen Bürstzyklen.

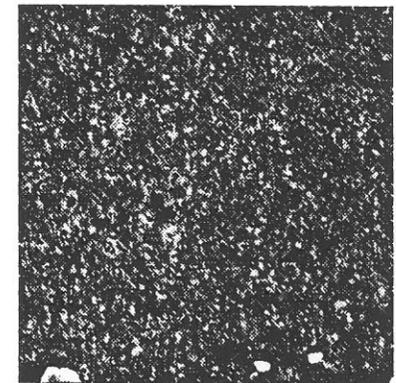


Abb.4.35.: Resin III nach 3 monatiger H₂O-Lagerung und 4.060 flächigen Bürstzyklen.

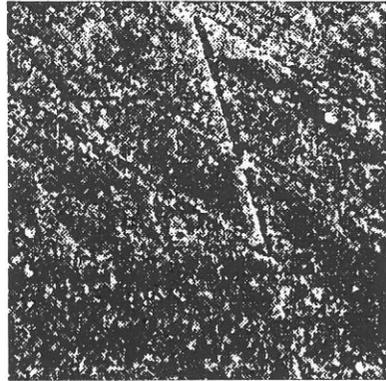


Abb.4.36.: Resin IV nach 72 stündiger H₂O-Lagerung und 0 Bürstzyklen.

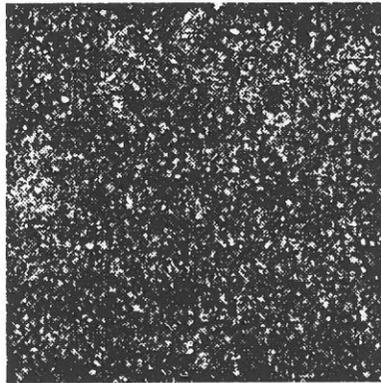


Abb.4.38.: Resin IV nach 72 stündiger H₂O-Lagerung und 82.000 linearen Bürstzyklen.

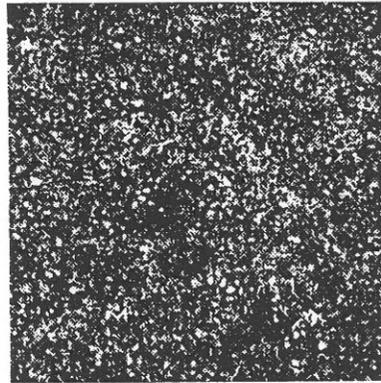


Abb.4.40.: Resin IV nach 72 stündiger H₂O-Lagerung und 4.060 flächigen Bürstzyklen.

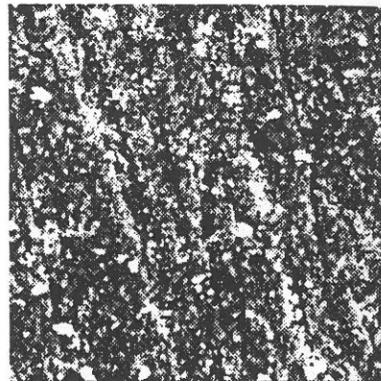


Abb.4.37.: Resin IV nach 3 monatiger H₂O-Lagerung und 0 Bürstzyklen.

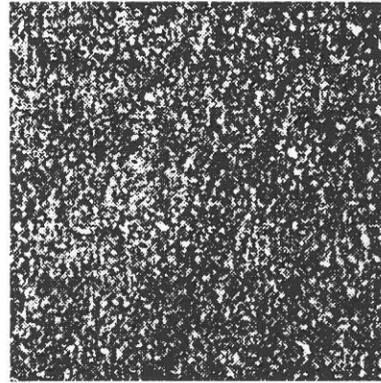


Abb.4.39.: Resin IV nach 3 monatiger H₂O-Lagerung und 82.000 linearen Bürstzyklen.

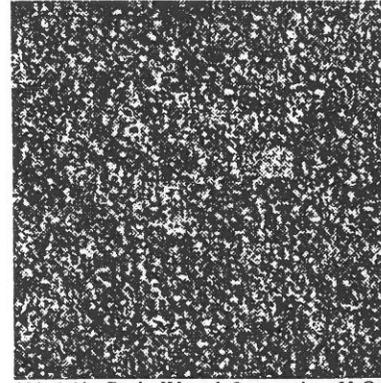


Abb.4.41.: Resin IV nach 3 monatiger H₂O-Lagerung und 4.060 flächigen Bürstzyklen.

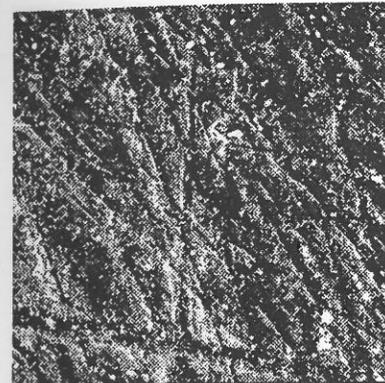


Abb.4.42.: Durafill® nach 72 stündiger H₂O-Lagerung und 0 Bürstzyklen.

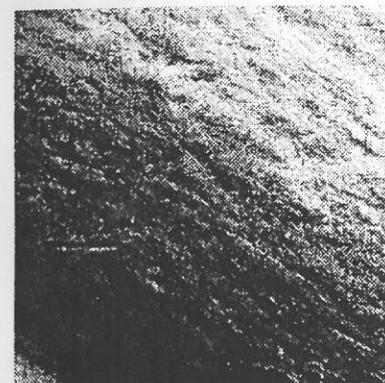


Abb.4.44.: Durafill® nach 72 stündiger H₂O-Lagerung und 82.000 linearen Bürstzyklen.

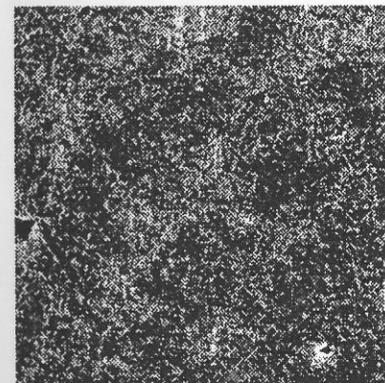


Abb.4.46.: Durafill® nach 72 stündiger H₂O-Lagerung und 4.060 flächigen Bürstzyklen.

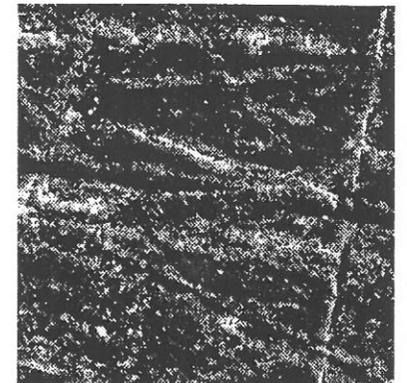


Abb.4.43.: Durafill® nach 3 monatiger H₂O-Lagerung und 0 Bürstzyklen.

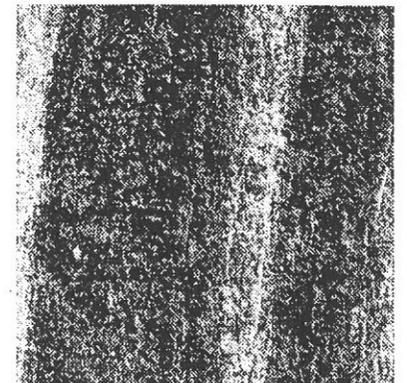


Abb.4.45.: Durafill® nach 3 monatiger H₂O-Lagerung und 82.000 linearen Bürstzyklen.

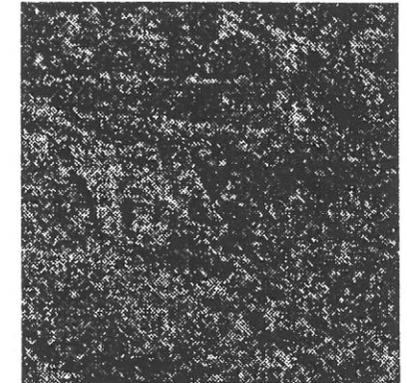


Abb.4.47.: Durafill® nach 3 monatiger H₂O-Lagerung und 4.060 flächigen Bürstzyklen.

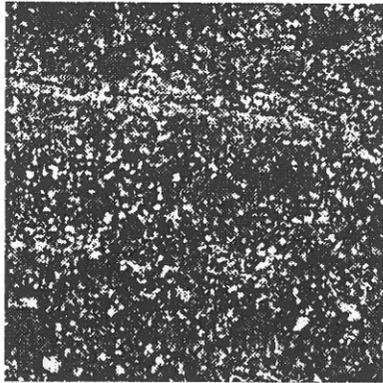


Abb.4.48.: Heliomolar radiopaque® nach 72 -
stündiger H₂O-Lagerung und 0 Bürstzyklen.

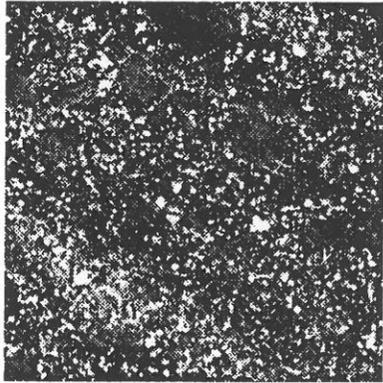


Abb.4.50.: Heliomolar radiopaque® nach 72 -
stündiger H₂O-Lagerung und 82.000 linearen
Bürstzyklen.

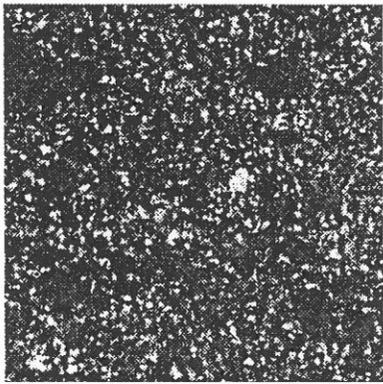


Abb.4.52.: Heliomolar radiopaque® nach 72
stündiger H₂O-Lagerung und 4.060 flächigen
Bürstzyklen.

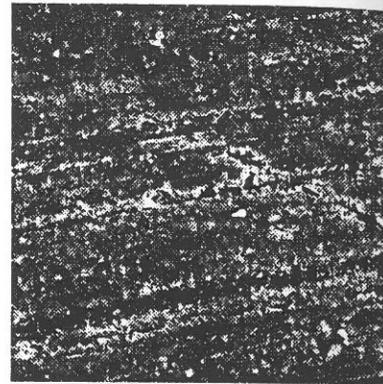


Abb.4.49.: Heliomolar radiopaque® nach 3
monatiger H₂O-Lagerung und 0 Bürstzyklen.

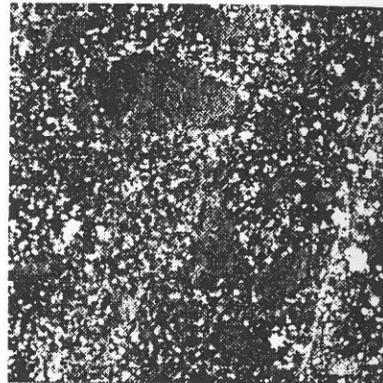


Abb.4.51.: Heliomolar radiopaque® nach 3
monatiger H₂O-Lagerung und 82.000
linearen Bürstzyklen.

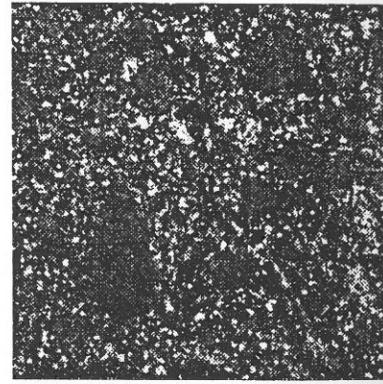


Abb.4.53.: Heliomolar radiopaque® nach 3
monatiger H₂O-Lagerung und 4.060
flächigen Bürstzyklen.

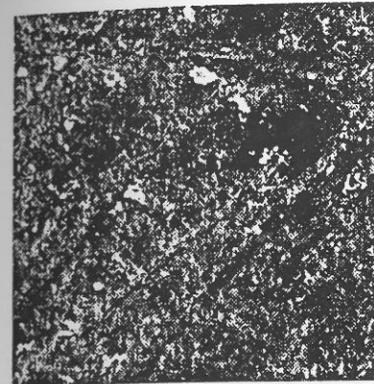


Abb.4.54.: Arabesk® nach 72 stündiger H₂O-
Lagerung und 0 Bürstzyklen.



Abb.4.56.: Arabesk® nach 72 stündiger H₂O-
Lagerung und 82.000 linearen Bürstzyklen.

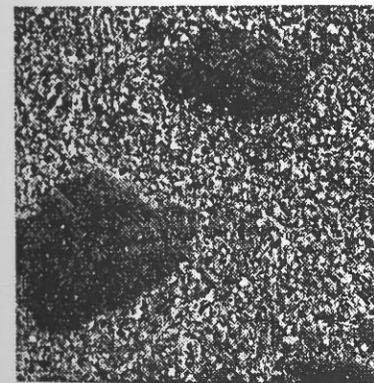


Abb.4.58.: Arabesk® nach 72 stündiger H₂O-
Lagerung und 4.060 flächigen Bürstzyklen.

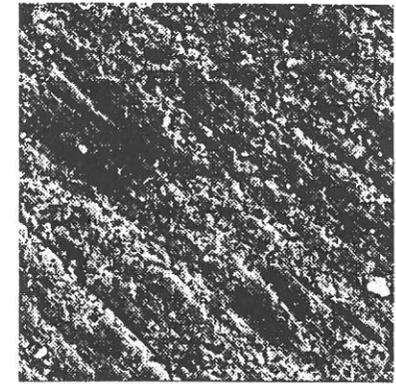


Abb.4.55.: Arabesk® nach 3 monatiger H₂O-
Lagerung und 0 Bürstzyklen.

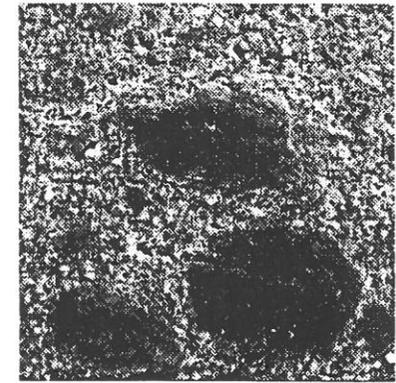


Abb.4.57.: Arabesk® nach 3 monatiger H₂O-
Lagerung und 82.000 linearen Bürstzyklen.

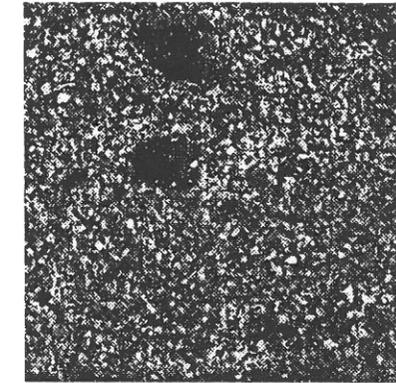


Abb.4.59.: Arabesk® nach 3 monatiger H₂O-
Lagerung und 4.060 flächigen Bürstzyklen.

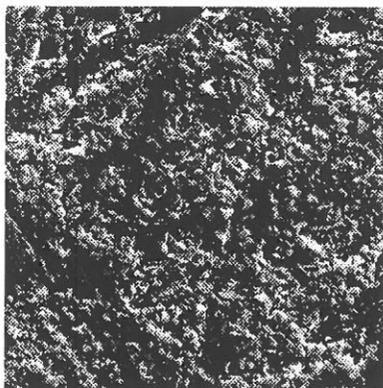


Abb.4.60.: Blend a Lux® nach 72 stündiger H₂O-Lagerung und 0 Bürstzyklen.

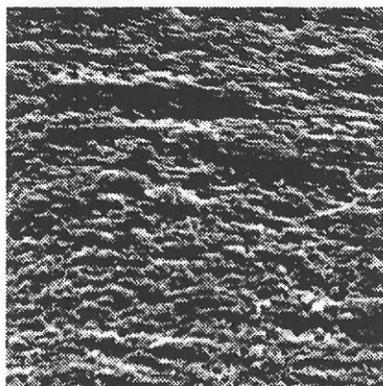


Abb.4.62.: Blend a Lux® nach 72 stündiger H₂O-Lagerung und 82.000 linearen Bürstzyklen.

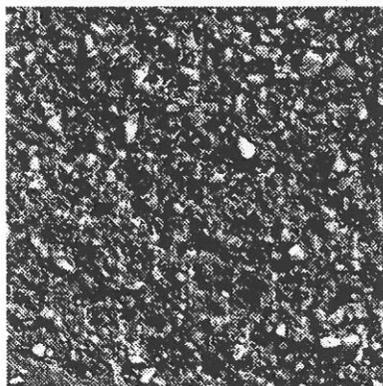


Abb.4.64.: Blend a Lux® nach 72 stündiger H₂O-Lagerung und 4.060 flächigen Bürstzyklen.

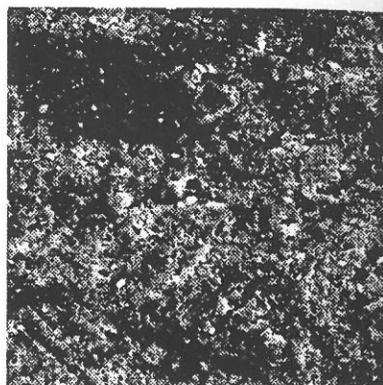


Abb.4.61.: Blend a Lux® nach 3 monatiger H₂O-Lagerung und 0 Bürstzyklen.

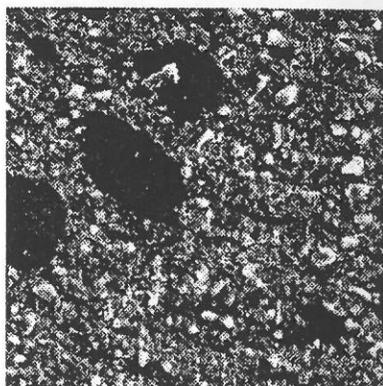


Abb.4.63.: Blend a Lux® nach 3 monatiger H₂O-Lagerung und 82.000 linearen Bürstzyklen.

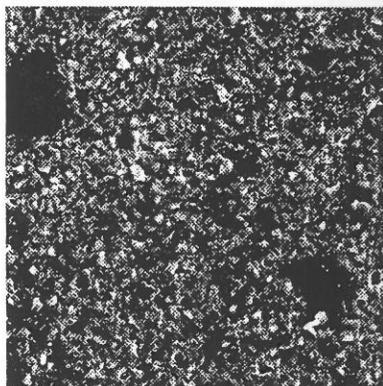


Abb.4.65.: Blend a Lux® nach 3 monatiger H₂O-Lagerung und 4.060 flächigen Bürstzyklen.



Abb.4.66.: Tetric® nach 72 stündiger H₂O-Lagerung und 0 Bürstzyklen.

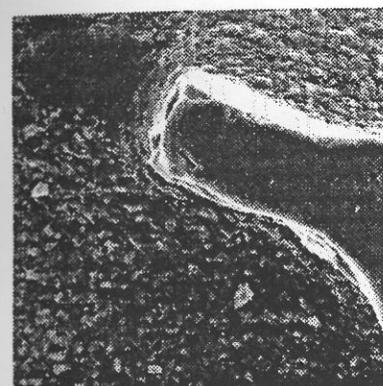


Abb.4.68.: Tetric® nach 72 stündiger H₂O-Lagerung und 82.000 linearen Bürstzyklen.

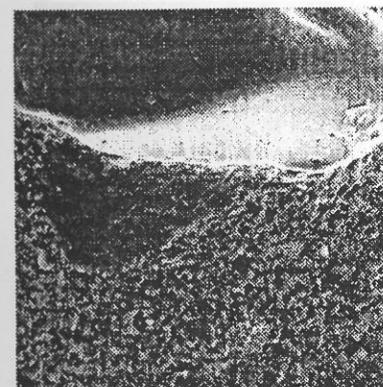


Abb.4.70.: Tetric® nach 72 stündiger H₂O-Lagerung und 4.060 flächigen Bürstzyklen.

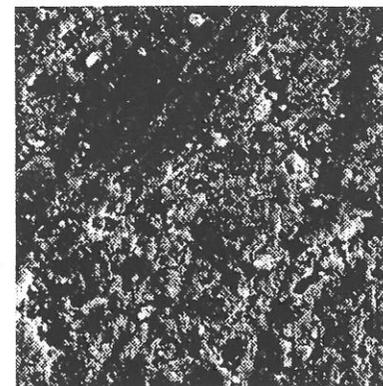


Abb.4.67.: Tetric® nach 3 monatiger H₂O-Lagerung und 0 Bürstzyklen.

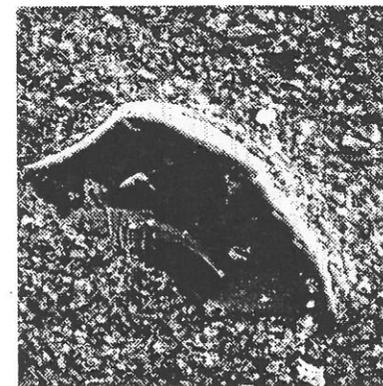


Abb.4.69.: Tetric® nach 3 monatiger H₂O-Lagerung und 82.000 linearen Bürstzyklen.

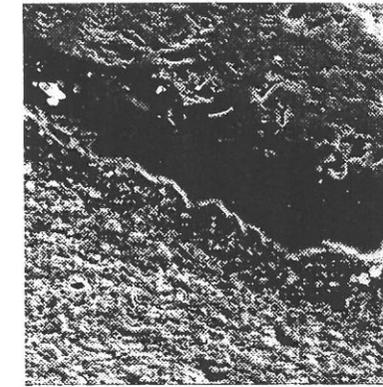


Abb.4.71.: Tetric® nach 3 monatiger H₂O-Lagerung und 4.060 flächigen Bürstzyklen.

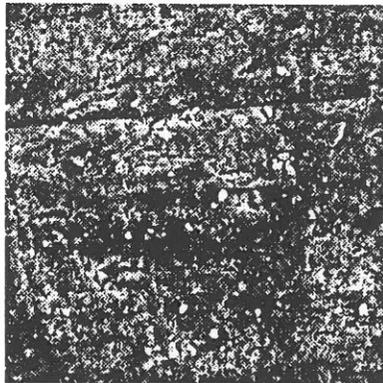


Abb.4.72.: Pertac Hybrid® nach 72 stündiger H₂O-Lagerung und 0 Bürstzyklen.

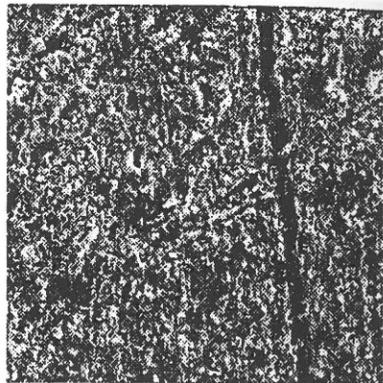


Abb.4.73.: Pertac Hybrid® nach 3 monatiger H₂O-Lagerung und 0 Bürstzyklen.

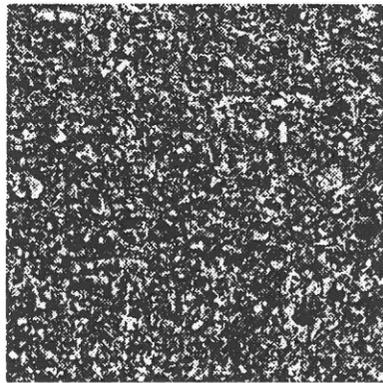


Abb.4.74.: Pertac Hybrid® nach 72 stündiger H₂O-Lagerung und 82.000 linearen Bürstzyklen.

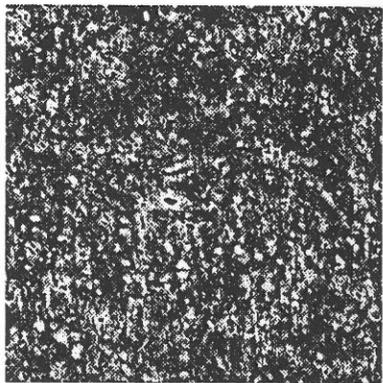


Abb.4.75.: Pertac Hybrid® nach 3 monatiger H₂O-Lagerung und 82.000 linearen Bürstzyklen.

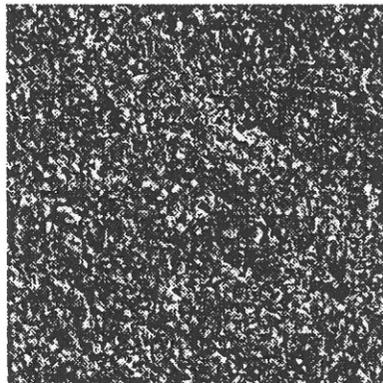


Abb.4.76.: Pertac Hybrid® nach 72 stündiger H₂O-Lagerung und 4.060 flächigen Bürstzyklen.

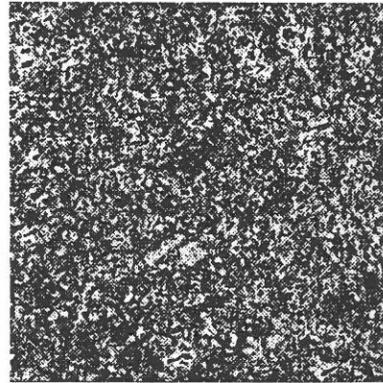


Abb.4.77.: Pertac Hybrid® nach 3 monatiger H₂O-Lagerung und 4.060 flächigen Bürstzyklen.

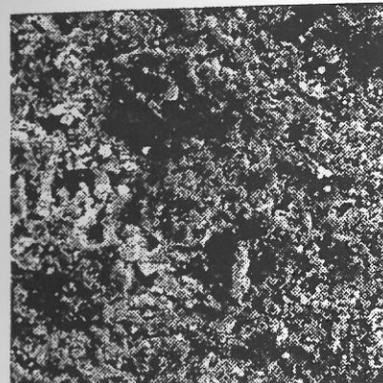


Abb.4.78.: Estilux Hybrid® nach 72 stündiger H₂O-Lagerung und 0 Bürstzyklen.

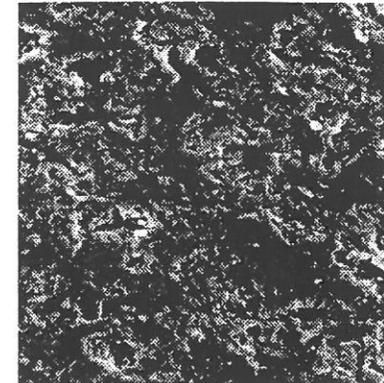


Abb.4.79.: Estilux Hybrid® nach 3 monatiger H₂O-Lagerung und 0 Bürstzyklen.

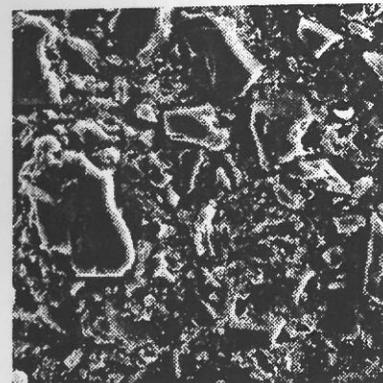


Abb.4.80.: Estilux Hybrid® nach 72 stündiger H₂O-Lagerung und 82.000 linearen Bürstzyklen.

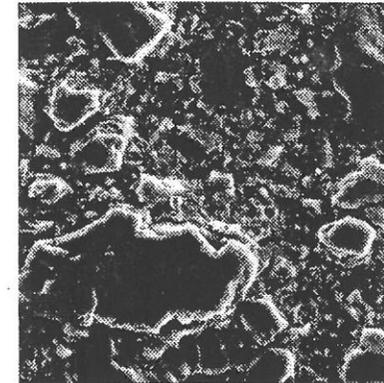


Abb.4.81.: Estilux Hybrid® nach 3 monatiger H₂O-Lagerung und 82.000 linearen Bürstzyklen.



Abb.4.82.: Estilux Hybrid® nach 72 stündiger H₂O-Lagerung und 4.060 flächigen Bürstzyklen.

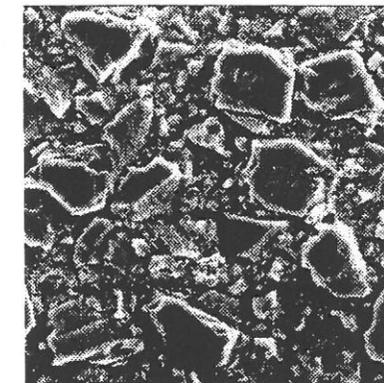


Abb.4.83.: Estilux Hybrid® nach 3 monatiger H₂O-Lagerung und 4.060 flächigen Bürstzyklen.

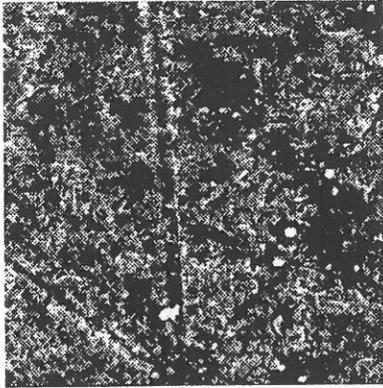


Abb.4.84.: Charisma® nach 72 stündiger H₂O-Lagerung und 0 Bürstzyklen.

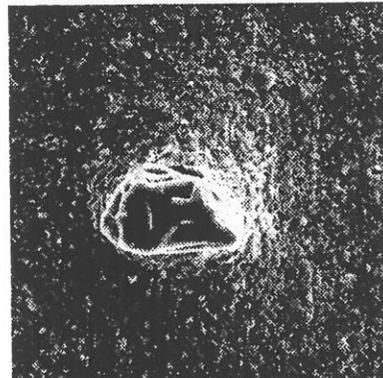


Abb.4.86.: Charisma® nach 72 stündiger H₂O-Lagerung und 82.000 linearen Bürstzyklen.

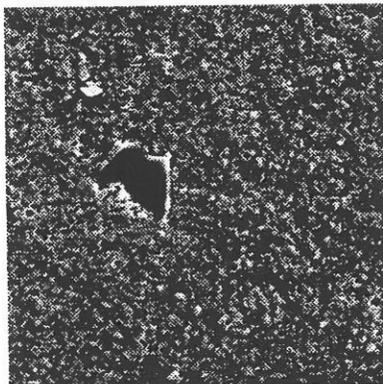


Abb.4.88.: Charisma® nach 72 stündiger H₂O-Lagerung und 4.060 flächigen Bürstzyklen.

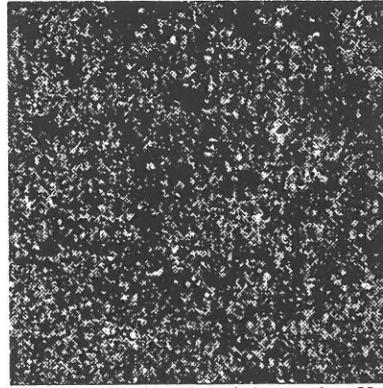


Abb.4.85.: Charisma® nach 3 monatiger H₂O-Lagerung und 0 Bürstzyklen.

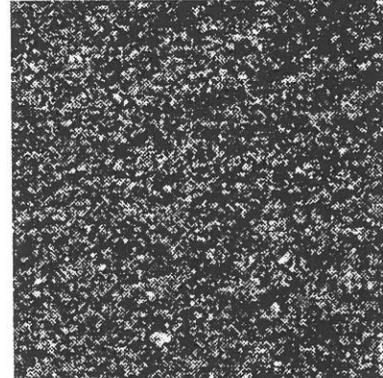


Abb.4.87.: Charisma® nach 3 monatiger H₂O-Lagerung und 82.000 linearen Bürstzyklen.

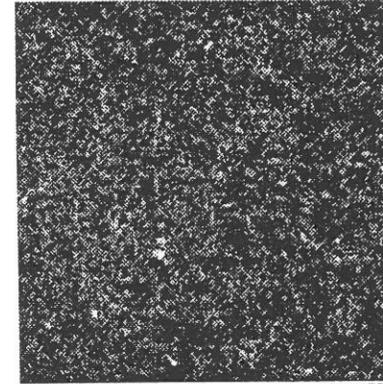


Abb.4.89.: Charisma® nach 3 monatiger H₂O-Lagerung und 4.060 flächigen Bürstzyklen.

5 Diskussion

5.1 Quantitative Abriebsmessung

Die im "Normvorschlag für Abriebprüfung mit Zahnbürste (1992)" geforderten Verfahren zur Abriebsmessung und Trockenbehandlung der Prüfkörper wurden in eigenen Vorversuchen mit den Kompositmaterialien Charisma® (Ch.B. 057) und Estilux Hybrid VS® (Ch.B. 044) überprüft. Dabei zeigten sich erhebliche Meßgenauigkeiten, wenn die geforderten Reinigungsbehandlung (abspülen der Proben mit Leitungswasser und Reinigung für 50 Sekunden im Ultraschallbad) und Trocknungsmodus (Proben werden mit Zellstofftuch und anschließend jede Prüfkörperseite mit einem Fön 5 Sekunden getrocknet) der Proben eingehalten wurden. Durch dieses Abrießmeßverfahren sollen laut Normvorschlag die Prüfkörper vor und nach der Abrießprüfung auf 0,1 mg genau gewogen werden. Dies konnte durch die aus den Vorversuchen gewonnenen Ergebnisse nicht bestätigt werden. Hingegen zeigte sich, trotz exakter Einhaltung der geforderten Meßzeiten, durch die Abgabe von ungebundenem Wasser von der Probenoberfläche ein meßbarer Gewichtsverlust von mindestens 0,5 mg/30 sec.

Aufgrund dieser Ergebnisse und um die Verfälschung der Meßergebnisse durch materialbedingte Wasseraufnahme so gering wie möglich zu halten, war es notwendig eine neue exakt definierte Reinigungs- und Trocknungsprozedur zu entwickeln. Die in Kapitel 3.5 ausführlich beschriebene Vorgehensweise ermöglicht es die Gewichtsbestimmung der Prüfkörper mit der, im „Normvorschlag für Abriebprüfung mit Zahnbürste (1992)“, geforderten Reproduzierbarkeit von 0,1 mg durchzuführen.

Jedoch dürfte das in dieser Studie entwickelte Auswertprotokoll für stark hydrophile und trocknungsempfindliche Füllungsmaterialien, wie neuartige Compomere und lichthärtende Glasinomerzemente, problematisch werden. Es wäre daher sinnvoll für diese Werkstoffgruppen die Abriebsmessung mittels Profilometrie vorzunehmen.

5.2 Abriebswerte im zeitlichen Verlauf

Die in dieser Drei-Medien-Abriebsstudie getesteten Füllungsmaterialien zeigten nach Ablauf von vier Bürstintervallen überwiegend ein zeitlich lineares Verschleißverhalten.

Die Ursache für dieses beobachtete Phänomen könnte im strukturellen Aufbau der Komposite zu finden sein. Da es sich bei diesen Materialien um zusammengesetzte Werkstoffe, mit einer annähernd gleichmäßigen Verteilung von anorganischen Füllkörpern in einer organischen Polymermatrix, handelt, ist es naheliegend bei gleichbleibenden Belastungskomponenten ein zeitlich lineares Abriebverhalten zu erzielen.

Eine Begründung für die, bei allen verwendeten Kompositen, initial deutlich erhöhten Verschleißwerte nach dreimonatiger Wasserlagerung könnte folgende Hypothese sein. Der Wassereintritt in die Prüfkörper beginnt an der Oberfläche und setzt sich in einem Diffusionsvorgang durch das Füllungsmaterial fort. Unabhängig vom Sättigungsgrad des Probenmaterials ist die oberste Materialschicht im Vergleich zu den darunterliegenden Schichten, bis zur Bürstbelastung, am längsten den Einflüssen des Wassers ausgesetzt. So kann man davon ausgehen, daß diese oberste Prüfkörperschicht am stärksten durch den Wassereintritt geschädigt wird und gegenüber den darunterliegenden Materialschichten abriebsanfälliger ist. Nach Entfernung dieser am stärksten geschädigten Materialschicht stellt sich ein zeitlich lineares Verschleißverhalten ein. Diese Erklärung steht auch nicht im Widerspruch zu der Beobachtung, daß nach der 72 stündigen Wasserlagerung mit Beginn des ersten Bürstintervalls eine Linearität im zeitlichen Abriebverhalten zu beobachten ist. Es hat den Anschein als ob unter den gewählten Versuchsbedingungen durch die dreitägige Wasserlagerung kein quantitativ meßbarer Einfluß auf das Abriebverhalten festzustellen ist.

Die von MEINERS et al (1974), SOLTESZ et al (1980), HARRINGTON et al (1982), LAMBRECHTS & VANHERLE (1982) und DE GEE et al (1985) beschriebenen initial hohen, darauf abnehmenden und zuletzt wieder ansteigenden Abriebswerte konnten nicht

quantitativ nachgewiesen werden. Um die Auswirkungen dieser „matrix-protection“ Theorie beobachten zu können, müßte nicht wie in dieser Studie mit relativ langen Belastungszeiten sondern mit sehr kurzen Bürstintervallsabständen, sowie nicht mit Feinpartikelkompositen sondern mit Füllungsmaterialien mit sehr großen Füllstoffen gearbeitet werden. Nur so ist es möglich den initial hohen Matrixabtrag, die abriebsreduzierende Wirkung hervorstehender Füllkörper sowie das Entfernen dieser Füller aus dem Polymerverbund zu beobachten. Es stellt sich außerdem die Frage, ob das Auflösungsvermögen, der in dieser Abriebsprüfung verwendeten Meßapparatur ausreicht, um dieses Phänomen quantitativ nachweisen zu können.

5.3 Einfluß der Bürstenbewegungsart auf die Abriebswerte

Die flächige Bürstenbewegung stellte sich bei allen Testmaterialien als die abrasivere Bewegungskurve dar. Aufgrund der Tatsache, daß durch die rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen bei 1000 facher Vergrößerung kein Unterschied in der Oberflächenstruktur der Prüfkörper bezüglich der angewandten Bürstenbewegungsart zu beobachten ist, läßt sich vermuten, daß die unterschiedliche Borstengeschwindigkeit bei den beiden Bewegungsarten die Ursache für dieses festgestellte Phänomen darstellt.

Verglichen mit der linearen Bürstenbewegungsart erzielte die flächige Bürstenbewegung durch ihre höhere Frequenz eine größere Borstengeschwindigkeit und zeigte deshalb möglicherweise eine abrasivere Wirkung als die lineare Bewegung. Diese Erklärung würde den Aussagen von RABINOWICZ (1965), POWELL et al (1975), HARRISON (1984) und BUIJS & KORPEL -VAN HOUTEN (1993) entsprechen. Da in dieser Drei-Medien-Abriebsprüfung die beiden Bürstbewegungsarten hinsichtlich der identisch zurückgelegten Bürststrecke verglichen wurden, wäre, zur endgültigen Bestätigung dieser Hypothese, ein Test mit verschiedenen Bürstgeschwindigkeiten bei gleicher Bewegungsart sowie eine Beurteilung mit Hilfe einer "Pin-on-disk" Apparatur wünschenswert.

Für Routineuntersuchungen kann, verglichen mit der linearen Bürstbewegungsart, durch Verwendung der flächigen Bürstenbewegung in relativ kurzer Zeit ein höherer Abrieb verursacht werden und ermöglicht somit ein schnelleres Screening.

5.4 Unterschiedliche Abrasionsfestigkeit der getesteten Füllungsmaterialien

In Bezug auf die gezeigte Verschleißfestigkeit erzielten die experimentellen und überwiegend mikrogefüllten (Durafill® & Heliomolar radiopaque®) Kompositmaterialien die besten Ergebnisse. Die niedriggefüllten Resine erwiesen sich unter allen Versuchsbedingungen gegenüber den ca. 80 prozentig (Gewichtsprozent) Gefüllten als verschleißresistenter. Eine mögliche Erklärung könnte sein, daß aufgrund des hohen Füllergehalts große Spannungen innerhalb der Polymermatrix herrschen (SÖDERHOLM 1981) und somit während der Bürstbelastung Brüche in den Polymerketten begünstigt werden. Dies würde einen vermehrten Abtrag von Matrixmaterial sowie ein leichteres Entfernen der anorganischen Bestandteile zur Folge haben.

Eine Reduktion dieser Spannungen durch 3 monatige Wasserlagerung läßt folgende Beobachtung vermuten. Nach dem ¼ jährlichen Wasserlagerungszeitraum verkleinerte sich der Unterschied in den Volumenverlusten zwischen den hoch und niedrig gefüllten Resine deutlich. Es ist auch denkbar, daß die Polymermatrix der niedrig gefüllten Füllungsmaterialien eine höhere Elastizität als die der hoch Gefüllten aufweist. Füllkörper könnten somit den Abrasivpartikeln geringfügig ausweichen und somit einem vorzeitigen Herauslösen aus dem Polymerverbund vorbeugen. Eventuell könnte dieser Mechanismus auch einen Grund für die hohen Verschleißwerte der Hybridkomposits darstellen, da diese Materialgruppe auch einen sehr hohen Füllkörpergehalt aufweist (vgl. Tab. 3.1).

Eine mögliche Begründung für die, bei den drei Tage in Wasser gelagerten Proben, beobachtete Überlegenheit der grob gefüllten Resine gegenüber denen mit feinen

Füllpartikeln könnte darin zu suchen sein, daß durch große aus der Matrix herausragende Füllkörper das Matrixmaterial besser vor weiterer Abrasion geschützt wird.

Die Ursache für die besseren Verschleißwerte der feinst gefüllten Resine nach der dreimonatigen Wasserlagerung könnte folgendes sein. Viele kleine Füllpartikel befinden sich eng nebeneinander in der Harzmatrix und bieten im Gegensatz zu den groben Füllstoffen eine geringere Angriffsfläche für das Abrasivmaterial, so daß sie trotz geschwächten Silan-Füllkörperverbund nicht leicht aus Polymer entfernt werden.

Nicht silanierte Glasfüller (YbF₃) in Heliomolar radiopaque® (deshalb kein reiner Mikrofüller) geben Anlaß zu der Vermutung, daß dies den Grund für die höheren Verschleißwerte gegenüber Durafill® darstellt.

5.5 Einfluß des Wasserlagerungszeitraums auf die Abriebsfestigkeit

Alle drei getesteten Materialgruppen (experimentelle Resine, Mikrofüller und Hybridkomposite) zeigten nach der dreimonatigen Wasserlagerung im Vergleich zu den nur drei Tage in deionisierten Wasser gelagerten Prüfkörpern eine erhöhte Abriebsrate. Diese durch die Wasserlagerung beobachtete Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften steht im Einklang mit den Ergebnissen von SÖDERHOLM (1984, 1988, 1989), CALAIS & SÖDERHOLM (1988), SARRETT et al (1991) und SARRETT & RAY (1994). Nach Untersuchungen von SÖDERHOLM (1988) kann das Wasser den Füllerpartikel-Matrix-Kontaktbereich durchdringen. Durch hydrolytische Spaltung des Silan-Füllstoffverbundes werden Spannungen nicht mehr von der Polymermatrix zu den Füllerpartikeln weitergegeben und es kommt zu einer Reduktion der physikalisch/mechanischen Materialeigenschaften (SÖDERHOLM 1981). Laut SARRETT & RAY (1994) verursacht das Wasser eine Schwächung des Matrix-Füller-Verbundes, was ein leichteres Herauslösen der Füllerpartikel aus dem Polymerverbund zur Folge hat.

Unter der Annahme, daß das Wasser auch in das Polymer hineindiffundiert und an wasserempfindlichen Stellen der Polymerketten deren Aufspaltung verursacht (SÖDERHOLM 1988), kann man davon ausgehen, daß weniger mechanische Energie benötigt wird, um einen Matrixabrieb zu erreichen. Die oben beschriebenen Einflüsse des Wassers auf die mechanischen Eigenschaften der Kompositmaterialien sind nach der dreimonatigen Wasserlagerung stärker ausgeprägt als nach der 72-stündigen Lagerung und erklären möglicherweise die Unterschiede bei den ermittelten Verschleißwerten. Durch einen längeren Wasserlagerungszeitraum müßte sich der Wassereintritt und die dadurch verursachte Schädigung des Füllungsmaterials in tiefere Materialschichten fortsetzen. Erhöhte Abriebswerte wären dann nicht nur im ersten Bürstintervall sondern auch in den darauffolgenden Belastungsintervallen zu erwarten. Das beobachtete zeitlich lineare Abriebsverhalten sollte sich daher erst zu einem späteren Zeitpunkt einstellen.

Die von SÖDERHOLM (1981, 1984, 1988) beschriebenen hydrolytischen Auflösungserscheinungen der anorganischen Füllkörper, konnten weder bei den Referenzproben noch bei den gebürsteten Prüfkörpern durch die rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen bestätigt werden.

5.6 Wasseraufnahme der Kompositmaterialien

Aufgrund von nur zwei Referenzproben pro Füllungsmaterial und Wasserlagerungszeitraum handelt es sich bei der Berechnung der Wasseraufnahme nur um eine grobe Abschätzung. Etwaige materialspezifische Fehler wie Poren oder Blasen können die ermittelten Ergebnisse stark beeinflussen. Deshalb sollte dieser Punkt nicht überinterpretiert werden.

Die überwiegend mikrogefüllten Komposite (Durafill® & Heliomolar radiopaque®) sowie die niedriggefüllten Resine zeigten die höchsten Wasseraufnahmen. Dieser Befund korreliert mit den Resultaten von SARRETT et al (1991) und MOMOI & MCCABE

(1994). Da diese Materialien in Vergleich zu den anderen getesteten Kompositen einen sehr geringen Prozentsatz an anorganischen Füllkörpern und damit viel Matrixmaterial aufweisen, zeigt sich auch hier, daß nicht die Füllstoffe sondern die Polymermatrix für die hohe Wasseraufnahme verantwortlich ist. Gestützt wird dies durch das Wasseraufnahmeverhalten von Pertac Hybrid® und Blend a Lux®. Beide Materialien besitzen eine sehr hydrophobe Polymermatrix und zeigten in der Gruppe der Hybridkomposite die geringsten Wasseraufnahmen.

Der erhebliche Unterschied zwischen Durafill® und Heliomolar radiopaque® nach der dreimonatigen Wasserlagerung könnte einen möglichen Hinweis auf einen unterschiedlichen Vernetzungsgrad des Matrixmaterials geben. Danach müßte die Heliomolarmatrix eine geringere Vernetzung aufweisen um mehr Wassermoleküle aufnehmen zu können. Außerdem werden durch die Wasseraufnahme bei Heliomolar radiopaque® Fluoridionen (Ytterbiumtrifluorid) herausgelöst.

5.7 Betrachtung der Oberflächen mit dem Rasterelektronenmikroskop

Unterschiede zwischen den einzelnen Materialgruppen zeigten sich bei 1000 facher Vergrößerung auch in der Oberflächenmorphologie. Im Vergleich zu den nicht gebürsteten Referenzproben, kann man bei den grob gefüllten Resinen und Hybridkompositen, nach vier Bürstintervallen, eine deutliche Aufrauung der Probenoberflächen feststellen. Die Matrix, in die nach dem Schleifvorgang die Füllpartikel eingebettet sind, wird durch die Abrasivkörper des Zwischenmediums abgetragen. Nach dem Materialabtrag der oberflächlichsten Matrixschicht liegen die Füllkörper frei. Durch fortschreitenden Matrixabtrag werden sie weiter freigelegt und anschließend aus dem Polymerverbund herausgelöst. Man kann zum Teil die Löcher von herausgerissenen Füllpartikeln in der Matrixstruktur erkennen (vgl. Abb. 4.27 & 4.29). Ähnliche Oberflächenveränderungen beobachtete auch MEINERS et al (1974), ANKER (1982) und VAN DIJKEN et al (1983 & 1985). Laut JORGENSEN (1982) und LAMBRECHTS & VANHERLE (1982)

stimmen diese beobachteten Oberflächenstrukturen mit klinischen Befunden hybrider Kompositen überein.

Der von EHRNFORD (1983) und SARRETT et al (1991) beschriebene Füllkörperverschleiß konnte nur in sehr abgeschwächter Form bei den groben Füllstoffen von Resin I und Estilux Hybrid VS® beobachtet werden. Während nach der 3 monatigen Wasserlagerung und linearen Bürstenbewegung die Füllkörper auf ihrer Oberfläche vereinzelt scharfe Kanten aufweisen, sind nach dem flächigen Bürstabrieb abgerundete anorganische Inhaltsstoffe zu erkennen (vgl. Abb. 4.21, 4.23, 4.81 & 4.83).

Bei der morphologischen Betrachtung des mikrogefüllten Kompositmaterials (Durafill®) zeigten sich keine Rauigkeitszunahme. Die Oberflächenmorphologie dieser Materialgruppe erscheint nach vier Bürstintervallen im Vergleich zur Ausgangsoberflächenrauigkeit glatter. Die durch den Schleifvorgang entstandenen Kratzer in den Probenoberflächen sind nach dem Abrasionsversuch nicht mehr zu erkennen (vgl. Abb. 4.42-4.47). Die Begründung für dieses Phänomen dürfte in der andersartigen Zusammensetzung dieser Materialgruppe zu suchen sein. Die zum Teil aus vopolymerisierten Matrixmaterial bestehenden Füllkörper besitzen eine geringere Verschleißresistenz als anorganische Füllstoffe und führen zu einer glatten Oberfläche.

Füllkörperfrakturen konnten bei Heliomolar radiopaque® nach Ablauf von 82.000 linearen Bürstzyklen, sowohl nach der 72 stündigen als auch nach der 3 monatigen Wasserlagerung, nachgewiesen werden (vgl. Abb.: 4.50 & 4.51).

Nach vier Bürstintervallen war bei allen getesteten Füllungsmaterialien und 1000 facher Vergrößerung kein Unterschied in der Oberflächenmorphologie zwischen den beiden verwendeten Bürstbewegungsarten zu erkennen. Dieser Befund würde der Hypothese, daß nicht die Art der Bewegung sondern die höhere Borstengeschwindigkeit für die größeren Verschleißwerte bei der flächigen Bürstenbewegung verantwortlich ist, nicht widersprechen.

Die von SÖDERHOLM (1981, 1984 & 1988) beschriebenen hydrolytischen Auflösungserscheinungen der Füllerpartikel, konnte weder nach der dreitägigen noch nach der dreimonatigen Wasserlagerung festgestellt werden.

5.8 Potential der 2 Achsen-Zahnbürstmaschine und Optionen für die Zukunft

Die in dieser Studie optimierte und erstmals in einem In-vitro-Zahnbürstenabriebstest angewandte 2 Achsen-Zahnbürstmaschine bietet ein großes Anwendungsspektrum.

Dank der speziell entwickelten Software kann die Anzahl der Bürstzyklen, Art der Bürstbewegung, Länge der Bürststrecke und die Geschwindigkeit der Zahnbürsten sowie die Häufigkeit von Referenzfahrten individuell eingestellt werden. Die Auflagekraft der Bürstenborsten auf die Prüfkörperoberfläche läßt sich durch Austausch der Messinggewichte auf den Führungsstäben problemlos variieren.

Neben der Analyse von Zahnpasten hinsichtlich der Verteilung und Art der Putzkörper können verschiedenartige Zahnbürsten, sogar bei unterschiedlichen Bürstbewegungsarten und Bürstbewegungsgeschwindigkeiten, miteinander verglichen werden.

Im Rahmen der Abriebsprüfung dentaler Füllungsmaterialien ist mit der entwickelten Probenform eine hoch reproduzierbare (Gewichtsschwankungen bei der Probenherstellung von maximal 0,5 g) und preiswerte Prüfkörperherstellung möglich. Diese Probenform gewährleistet, daß die Zahnbürstborsten während des Abriebversuches sich nur auf den zu testenden Füllungsmaterialoberfläche bewegen. Im Gegensatz zu planen Probenformen, können mit der hier gewählten Prüfkörperform ergebnisverfälschende Einflüsse, wie abriebsbedingte Stufenbildungen zwischen Metallprobenträger und Prüfmaterial, die eine Beeinflussung der Borstenbewegung zur Folge hätte, ausgeschlossen werden.

Weiterhin ermöglicht diese Zahnbürstmaschine Untersuchungen zur Ätiologie des keilförmigen Defektes. Hierzu können anstatt der Füllungsmaterialien natürliche Zähne auf den Probenträger befestigt und mit der Probenhalterung im Suspensionsgefäß montiert werden.

Auch ein Austausch des konventionellen Zahnbürstenkopfes gegen eine elektrisch-betriebene Zahnbürste wäre denkbar. Durch den Einbau einer Rotationsachse an der Zahnbürstenhalterung wären dreidimensionale Bürstbewegungen möglich. Damit könnten Bewegungsmuster wie die Auswischbewegung beim Zähneputzen simuliert werden.

5.9 Diskussion der Fehlermöglichkeiten

Das in dieser Drei-Medien-Abriebstudie angewandte Versuchsdesign beinhaltet einige Kritikpunkte in der Methodik, die möglicherweise beobachtete Streuungen in den quantitativen Meßergebnissen innerhalb der Prüfgruppen erklären.

Es kann nicht davon ausgegangen werden, daß in jedem der vier Abriebseinheiten exakt die gleichen Versuchsbedingungen herrschen. Materialbedingte Ermüdungserscheinungen der Zahnbürstenborsten müssen nicht zum gleichen Zeitpunkt eintreten. Eine Sedimentation der Abrasivpartikel in den Suspensionsgefäßen kann trotz der Zahnbürstenbewegung im Abrasivmedium nicht gänzlich ausgeschlossen werden. Durch das zusätzliche Anbringen von rotierenden Flügelrädchen am Boden der Suspensionsgefäße könnte ein mögliches sedimentieren dieser Partikel weiter reduziert werden.

Desweiteren können Abriebpartikel der Füllungsmaterialien als zusätzliche Abrasivkörper in der Slurry-Lösung wirken. Dies kann durch folgende Modifikation an der Bürsteinheit vermieden werden (siehe Abb.: 5.1). Aus einem, mit einem Deckel verschlossenen, Suspensionsbehälter fließt über ein Leitungssystem frisch hergestellte Abrasivlösung auf den zu abradierenden Prüfkörper und benetzt dessen Oberfläche. Über ein Regulierungsventil im Leitungssystem kann die Fließmenge an Abrasivlösung eingestellt

werden. Durch die Borstenbewegung der Zahnbürste werden die Slurry-Lösung und die Abriebpartikel des Prüfkörpers in des Suspensionsgefäß der Bürsteinheit befördert. Über eine Abflußleitung am Boden des Gefäßes kann die mit Füllungsmaterial verunreinigte Abrasivsubstanz der Bürsteinheit entzogen werden

Da während den Bürstintervallen die Abriebseinheiten nicht mit einem Gehäuse verschlossen waren, kann sich aufgrund von verdunstenden Inhaltsstoffen das Zusammensetzungsverhältnis der Abrasivsuspension ändern. Durch den durchgeführten Reinigungsmodus nicht zu entfernende Rückstände des Abrasivmediums auf den Proben können die gravimetrisch bestimmten Abriebwerte verfälschen.

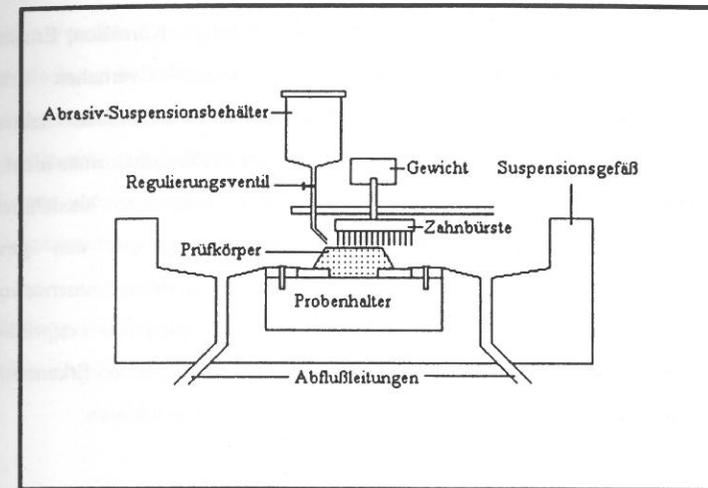


Abb. 5.1: Prinzipskizze der modifizierten Bürsteinheit.

Herstellungsbedingte Blasen oder Poren in den Prüfmaterien können Ursache für die festgestellten Streuungen in den Wasseraufnahmewerten der Referenzproben sein. Da bei der Bestimmung der Wasseraufnahme ein absoluter Mittelwert aus nur zwei Meßwerten berechnet wurde, zeigen diese materialspezifischen und herstellungsbedingten Fehler große Auswirkung.

Unterschiedliche Polymerisationsqualitäten in den großflächigen Prüfkörpern und daraus resultierende unterschiedliche Abriebswerte können durch das punktuelle Belichten mit der Polymerisationslampe trotz Nachvergütung verursacht werden. Durch die gleichzeitige Anwendung von 3-4 Polymerisationslampen zur Aushärtung der Füllungsmaterialien könnte diese Problem gelöst werden.

5.10 Schlußfolgerung

Aufgrund der Tatsache, daß neben der Abrasion auch Attrition, Korrosion, Erosion und materialspezifische Ermüdungserscheinungen das Verschleißverhalten dentaler Füllungsmaterialien beeinflussen, ist der hier vorgestellte In-vitro-Zahnbürstenabriebstest zur Beurteilung der Verschleißfestigkeit als alleiniger Verschleißmechanismus nicht genug aussagekräftig. Dennoch leisten die hier aufgezeigten Tendenzen hinsichtlich der Abriebsfestigkeit der getesteten Materialien einen Beitrag um den gesamten Verschleißprozeß zu verstehen oder ihn bei bekannter Materialzusammensetzung in Zukunft sogar voraussagen zu können. Durch eine größere Anzahl von Testprüfkörpern und Versuchsparametervariationen wäre es wünschenswert die gewonnen Erkenntnisse zu überprüfen und aufgezeigte Fragestellungen in weiteren Studien abzuklären.

6 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde ein vergleichender Drei-Medien-Abriebstest an vier experimentellen, zwei mikrogefüllten und sechs hybriden Kompositmaterialien durchgeführt. Um das Abriebverhalten dieser Materialgruppe durch Bürsten unter standardisierten Versuchsbedingungen und mit hoher Reproduzierbarkeit zu untersuchen, wurde eine spezielle 2 Achsen-Zahnbürstmaschine entwickelt.

Durch Gewichtsmessungen der Prüfkörper vor und nach der Bürstbelastung konnten quantitative Verschleißwerte der verschiedenen Füllungsmaterialien ermittelt werden. Um eine Verfälschung der Meßergebnisse durch die materialbedingten Wasseraufnahmen so gering wie möglich zu halten, war es notwendig, eine entsprechende Vorbehandlung der Proben sowie eine streng definierte Reinigungs- und Trocknungsprozedur durchzuführen. Dabei konnte gezeigt werden, daß das im DIN-Vorschlag (1992) empfohlene Verfahren zur Abriebsmessung zu ungenau und fehleranfällig ist sowie überarbeitet werden sollte.

Mit Hilfe von rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen konnten Veränderungen in der Oberflächenmorphologie beobachtet und Rückschlüsse auf Verschleißursachen gezogen werden.

Um den Einfluß von Feuchtigkeit auf das Verschleißverhalten festzustellen, erfolgten Meßserien nach 72 stündiger und dreimonatiger Lagerung der Prüfkörper in deionisiertem Wasser, wobei auch die Wasseraufnahme bestimmt wurde. Zusätzlich wurde durch die Verwendung von zwei verschiedenen Bürstenbewegungsarten deren Auswirkung auf das Abriebsverhalten untersucht.

Es zeigte sich, daß unter den gewählten Testbedingungen die Hybridkompositmaterialien im Vergleich zu den experimentellen und überwiegend mikrogefüllten Kompositen den höchsten Substanzverlust hatten. Durch die dreimonatige Wasserlagerung der Proben

konnte eine Verschlechterung der Verschleißresistenz bei allen getesteten Füllungs-materialien nachgewiesen werden.

Der Vergleich der verschiedenen Bürstbewegungsarten zeigte, daß bei linearer Bürstbewegung weniger Abrasion als bei Flächenbewegung auftrat. Dies zeigt, daß durch eine erhöhte Borstengeschwindigkeit eine abrasivere Wirkung erzielt werden kann.

Unterschiedliche Oberflächenveränderungen konnten durch die rasterelektronen-mikroskopischen Aufnahmen deutlich gemacht werden. Nach Ablauf von vier Bürstintervallen zeigten die mikrogefüllten Materialien im Gegensatz zu den Hybridkompositen und grob gefüllten Resinen ein sehr glattes Oberflächenrelief und weniger Abrieb. Bei den grobgefüllten Kompositmaterialien konnte das Herausreißen von Füllerpartikeln aus der Polymermatrix, das zu erhöhten Verschleiß führt, dokumentiert werden.

7 Literaturverzeichnis

1. *Anker J.R.*: New composite resins: comparison of their resistance to abrasion and characteristics of abraded surface. *J Am Dent Assoc* 105, 633 - 635 (1982).
2. *Ashmore H., Van Abbe N.J., Wilson S.J.*: The measurement in vitro of dentine abrasion by toothpaste. *Br Dent J* 133, 60 - 66 (1972).
3. *Asmussen E.*: Clinical relevance of physical, chemical and bonding properties of composite resins. *Oper Dent* 10, 61 - 73 (1985).
4. *Barbakow F., Imfeld T., Lutz F., Stookey G., Schemehorn B.*: Dentin abrasion (RDA), enamel abrasion (REA) and polishing scores of dentifrices sold in Switzerland. *Schweiz Mschr Zahnmed* 99,408 - 413 (1989).
5. *Björn H., Lindhe J.*: On the mechanics of toothbrushing. *Odontol Revy* 17, 9 - 16 (1966).
6. *Björn H., Lindhe J.*: Abrasion of dentin by toothbrushing and dentifrice. *Odontol Revy* 17, 17 - 27 (1966).
7. *Brown D.*: The resistance of resin-based filling materials to dentifrice abrasion in vitro. *J Dent Res* 60, 1102 Abstr.97 (1981).
8. *Buijs M., Korpel - van Houten K.*: Three-body abrasion of brittle materials as studied by lapping. *Wear* 166, 237 - 245 (1993).
9. *Calais J.G., Söderholm K.J.M.*: Influence of filler type and water on flexural strength of experimental composite resins. *J Dent Res* 67, 836 - 840 (1988).

10. *Cancro L.P., Glavan K.A., Bianco J.*: Dentifrice abrasion of composite restoratives. *J Dent Res* 59, 322 Abstr. 217 (1980).
11. *Davis W.B.*: Reduction in dentin wear resistance by irradiation and effects of storage in aqueous media. *J Dent Res* 54, 1078 - 1081 (1975).
12. *Davis W.B., Winter P.J.*: Measurement in vitro of enamel abrasion by dentifrice. *J Dent Res* 55, 970 - 975 (1976).
13. *De Boer P., Duinkerke A.S., Arends J.*: Influence of tooth paste particle size and brush stiffness on dentine abrasion in vitro. *Caries Res* 3, 232 - 239 (1985).
14. *De Gee A.J., Ten Harkel Hagenaar H.C., Davidson C.L.*: Structural and physical factors affecting the brush wear of dental composites. *J Dent Res* 13, 60 - 70 (1985).
15. *De Gee A.J., Pallav P., Davidson C.L.*: Effect of abrasion medium on wear of stress-bearing composites and amalgam in vitro. *J Dent Res* 65, 654 - 658 (1986).
16. *Dickson G.*: Physical and chemical properties and wear. *J Dent Res* 58, 1535 - 1543 (1979).
17. *Dijken J.W.V. van, Stadigh J., Meurman J.H.*: Appearance of finished and unfinished composite surfaces after toothbrushing. A scanning electron microscopy study. *Acta Odontol Scand* 41, 377 - 383 (1983).
18. *Dijken J.W.V. van., Ryter I.E.*: Surface characteristics of posterior composites after polishing and toothbrushing. *Acta Odontol Scand* 45, 337 - 346 (1987).
19. *DIN 50320 Verschleiß: Begriffe, Systemanalyse von Verschleißvorgängen, Gliederung des Verschleißgebietes.* Beuth Verlag Berlin (1979).

20. *Ehrnford L.*: Surface microstructure of composite resins after toothbrush-dentifrice abrasion. *Acta Odontol Scand* 41, 241 - 245 (1983).
21. *Franz G.*: Untersuchungen über die Wirkung von Zahnpasten auf Kunststoffe. *Dtsch Zahnärztl Z* 5, 459 - 465 (1974).
22. *Grabenstetter R.J., Broge R.W., Jackson F.L., Radike A.W.*: The measurement of the abrasion of human teeth by dentifrice abrasives: A test utilizing radioactive teeth. *J Dent Res* 37, 1060 - 1068 (1958).
23. *Harrington E., Jones P.A., Fisher S.E., Wilson H.J.*: Toothbrush-dentifrice abrasion. A suggested standard methode. *Br Dent J* 17, 135 - 138 (1982).
24. *Harrison A.*: Wear of dental materials. Part I modes of wear. *Dent Advertiser* 39, 8 - 11 (1984).
25. *Harte D.B., Manly R.S.*: Effect of toothbrush variables on wear of dentin produced by four abrasives. *J Dent Res* 54, 993 - 998 (1975).
26. *Harte D.B., Manly R.S.*: Four variables affecting magnitude of dentifrice abrasiveness. *J Dent Res* 55, 322 - 327 (1976).
27. *Heath J.R., Wilson H.J.*: Abrasion of restorative materials by toothpaste. *J Oral Rehabil* 3, 121 - 138 (1976).
28. *Heath J.R., Wilson H.J.*: Surface roughness of restorations. *Br Dent J* 140, 131 - 137 (1976).
29. *Heath J.R., Wilson H.J.*: The effect of water on the abrasion of restorative materials. *J Oral Rehabil* 4, 165 - 168 (1977).

30. *Hefferen J.J.*: A laboratory method for assessment of dentifrice abrasivity. *J Dent Res* 55, 563 - 573 (1976).
31. *Hotz P.*: Die Abrasion von Composites. *Schweiz Monatsschr Zahnmed* 85, 253 - 262 (1975).
32. *Hotz P.*: Untersuchungen zur Abrasivität von Zahnpasten. *Schweiz Monatsschr Zahnmed* 93, 93 - 99 (1983).
33. *Hotz P.*: Die Abrasivität von Zahnpasten. *Schweiz Monatsschr Zahnmed* 95, 1066 - 1067 (1985).
34. *Johannsen G., Redmalm G., Ryden H.*: Cleaning effect of toothbrushing with three different toothpastes and water. *Swed Dent J* 17, 111 - 116 (1993).
35. *Jorgensen K.D.*: In vitro wear tests on macro-filled composite restorative materials. *Aust Dent J* 27, 153 - 158 (1982).
36. *Kanter J., Koski R.E., Martin D.*: The relationship of weight loss to surface roughness of composite resins from simulated toothbrushing. *J Prosthet Dent* 47, 505 - 513 (1982).
37. *Krejci I., Albertoni M., Lutz F.*: In-vitro-Testverfahren zur Evaluation dentaler Restaurationssysteme. 2. Zahnbürsten-/Zahnpastaabrasion und chemische Degradation. *Schweiz Monatsschr Zahnmed* 100, 1164 - 1168 (1990).
38. *Krejci I.*: Zahnfarbene Restaurationen: Qualität, Potential und Indikationen. Hanser, München 1992.
39. *Kunzelmann K.-H.*: Med. Habilitationsschrift in Vorbereitung, Universität München (1995).

40. *Lambrechts P., Vanherle G.*: Observation and comparison of polished composite surfaces with the aid of SEM and profilometer II. Following tooth cleaning procedures. *J Oral Rehabil* 9, 203 - 216 (1982).
41. *Lutz F., Phillips R.W., Roulet J.F., Imfeld Th.*: Komposits-Klassifikation und Wertung. *Schweiz Monatsschr Zahnmed* 93, 914 - 929 (1983).
42. *Lutz F., Phillips R.W., Roulet J.F., Setcos J.C.*: In vivo and in vitro wear of potential posterior composites. *J Dent Res* 63, 914 (1984).
43. *Manly R.S., Foster D.H.*: Importance of factorial designs in testing abrasion by dentifrices. *J Dent Res* 46, 442 - 445 (1967).
44. *Mc Connell D., Conroy C.W.*: Comparisons of abrasion produced by simulated manual versus a mechanical toothbrush. *J Dent Res* 46, 1022 - 1027 (1967).
45. *Meiners H., Vahl J., Weisshaar A.*: Elektronenmikroskopische Oberflächenuntersuchungen von Putzeffekten an Kunststoffüllungen. *Dtsch Zahnärztl Z* 29, 450 - 454 (1974).
46. *Miller W.D.*: Experiments and observations on the wasting of tooth tissue variously designated as erosion, abrasion, chemical abrasion, denudation etc. *Dent Cosmos* 49, 1 - 23, 109 - 124, 225 - 247 (1907), zitiert nach Krejci (1992).
47. *Momoi Y., Mc Cabe J.F.*: Hygroscopic expansion of resin based composites during 6 months of water storage. *Br. Dent J* 176, 91 - 96 (1994).
48. *Murray I.D., Mc Cabe J.F., Storer R.*: Abrasivity of denture cleaning pastes in vitro and in situ. *Br Dent J* 161, 137 - 141 (1986).

49. Normvorschlag für die Abriebprüfung mit Zahnbürste. November 1991 überarbeitet Januar 1992.
50. Powell J.M., Phillips R.W., Norman R.D.: In vitro wear response of composite resin, amalgam and enamel. J Dent Res 54, 1183 - 1195 (1975).
51. Rabinowicz E.: Friction and wear of materials. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1965, zitiert nach Powell et al (1975).
52. Redmalm G., Ryden H.: Dentifrice abrasivity. Swed. Dent. J. 8, 57 - 66 (1984).
53. Reissstein J., Lustman I., Hershkovitz J., Gedalia I.: Abrasion of enamel and cementum in human teeth due to toothbrushing estimated by SEM. J Dent Res 57, 42 (1978).
54. Roulet J.F.: Die Abrasion von Kompositen. Schweiz Monatsschr Zahnmed 86, 413 - 426 (1976).
55. Roulet J.F.: Degradation of dental polymers. Karger, Basel 1987.
56. Sarrett D.C., Söderholm K.J.M., Batich C.D.: Water and abrasiv effects on three-body wear of composites. J Dent Res 70, 1074 - 1081 (1991).
57. Sarrett D.C., Ray S.: The effect of water on polymer matrix and composite wear. Dent Mater 10, 6 - 10 (1994).
58. Schmitz K., Dougherty E.W., Catts R., Müller G., Komma O., Schulmeyer H.: Über den Einfluß anorganischer Füllstoffe auf die Abrasionsfestigkeit dentaler Kunststoffe. Dental Labor 21, 615 - 621 (1973).
59. Slop D., De Rooij J.F., Arends J.: Abrasion of enamel. I. An in vitro investigation. Caries Res 17, 242 - 248 (1983).

60. Söderholm K.J.M.: Degradation of glassfiller in experimental composites. J Dent Res 60, 1867 - 1875 (1981).
61. Söderholm K.J.M.: Influence of silane and filler fraction on thermal expansion of composite resins. J Dent Res 63, 1321 - 1326 (1984).
62. Söderholm K.J.M.: Hydrolytic degradation of composites. I. Physical-chemical basics. Phillip J Restaurative Zahnmed 5, 323 - 328 (1988).
63. Söderholm K.J.M.: Hydrolytic degradation of composites. II. Sequence of use in practice. Phillip J Restaurative Zahnmed 6, 75 - 78 (1989).
64. Soltesz U., Klaiber B., Pergande C., Richter H.: Vergleichende Untersuchungen über das Abrasionsverhalten von Composite-Füllungsmaterialien. Dtsch Zahnärztl Z 34, 406 - 412 (1979).
65. Soltesz U., Klaiber B., Schlude V.: Bürstenabrasion mit 27 handelsüblichen Composites und ihre Oberflächenveränderung im Rasterelektronenmikroskop. Dtsch Zahnärztl Z 35, 502 - 505 (1980).
66. Soltesz U., Klaiber B., Greiner B.: Abrieb von Füllungsmaterialien durch Nahrung. Simulation im Modellversuch. Dtsch Zahnärztl Z 36, 648 - 651 (1981).
67. Stookey G.K., Muhler J.C.: Laboratory studies concerning the enamel and dentin abrasion properties of common dentifrice polishing agents. J Dent Res 47, 524 - 532 (1968).
68. Sulong M.Z.A.M., Aziz R.A.: Wear of materials used in dentistry: A review of the literature. J Prosthet Dent 63, 342 - 349 (1990).

69. *Svinnseth P.N., Gjerdet N.R., Lie T.*: Abrasivity of toothpastes. An in vitro study of toothpastes marketed in Norway. *Acta Odontol Scand* 45, 195 - 200 (1987).
70. *Victorin L.*: Effect of toothbrushing on acrylic resin veneering material. II. Abrasive effect of selected dentifrices and toothbrushes. *Acta Odontol Scand* 30, 383 - 395 (1972).
71. *Willens G., Lambrechts P., Braem M., Vuylsteke-Wauters M., Vanherle G.*: The surface roughness of enamel-to-enamel contact areas compared with the intrinsic roughness of dental resin composites. *J Dent Res* 70, 1299 - 1305 (1991).

8 Tabellarischer Anhang

Füllungsmaterial	arithmetischer Mittelwert 1	arithmetischer Mittelwert 2	arithmetischer Mittelwert 3	arithmetischer Mittelwert 4
Resin I	1650	420	175	265
Resin II	2385	615	135	270
Resin III	1335	350	110	470
Resin IV	2115	650	155	260
Arabesk®	1285	375	330	85
Blend a Lux®	845	100	340	340
Heliomolar radiopaque®	1920	605	155	610
Tetric®	1675	170	165	40
Pertac Hybrid®	835	80	45	55
Durafill®	1935	380	530	360
Estilux Hybrid®	2450	675	490	295
Charisma®	1695	335	440	430

Tab. 8.1: Ergebnisse der Wasseraufnahmeberechnung der Referenzproben in µg.

Für den Wasserlagerungszeitraum gilt folgende Einteilung:
 arithmetischer Mittelwert 1 = 72 Stunden + Zeit des 1. Bürstintervalls
 arithmetischer Mittelwert 2 = 24 Stunden + Zeit des 2. Bürstintervalls
 arithmetischer Mittelwert 3 = 24 Stunden + Zeit des 3. Bürstintervalls
 arithmetischer Mittelwert 4 = 24 Stunden + Zeit des 4. Bürstintervalls

Füllungsmaterial	arithmetischer Mittelwert 1	arithmetischer Mittelwert 2	arithmetischer Mittelwert 3	arithmetischer Mittelwert 4
Resin I	6280	- 125	220	- 165
Resin II	13950	15	100	35
Resin III	7890	370	150	- 480
Resin IV	13010	- 280	- 125	115
Arabesk®	10265	55	- 145	- 25
Blend a Lux®	8230	- 205	85	- 195
Heliomolar radiopaque®	13205	- 710	- 25	- 100
Tetric®	12955	- 215	- 95	- 145
Pertac Hybrid®	3750	200	- 75	- 85
Durafill®	10310	- 265	15	65
Estilux Hybrid®	7130	445	40	115
Charisma®	10530	- 440	- 120	110

Tab. 8.2: Ergebnisse der Wasseraufnahmeberechnung der Referenzproben in µg.

Für den Wasserlagerungszeitraum gilt folgende Einteilung:
 arithmetischer Mittelwert 1 = 3 Monate + Zeit des 1. Bürstintervalls
 arithmetischer Mittelwert 2 = 24 Stunden + Zeit des 2. Bürstintervalls
 arithmetischer Mittelwert 3 = 24 Stunden + Zeit des 3. Bürstintervalls
 arithmetischer Mittelwert 4 = 24 Stunden + Zeit des 4. Bürstintervalls

Füllungsmaterial	Bürstintervall 1	Bürstintervall 2	Bürstintervall 3	Bürstintervall 4
Resin I	1810	1477	1468	1773
Resin II	365	820	545	415
Resin III	2080	1793	1498	1668
Resin IV	915	720	1053	1068
Arabesk®	2288	2355	2633	2893
Blend a Lux®	1453	1543	1688	1655
Heliomolar radiopaque®	873	1223	1023	1703
Tetric®	2775	3073	3050	2285
Pertac Hybrid®	1863	2650	2190	2083
Durafill®	1223	1033	1290	998
Estilux Hybrid®	1888	1630	1393	893
Charisma®	2023	3153	1800	1353

Tab. 8.3: Mittlere Gewichtsverluste in μg der Prüfkörper pro Bürstintervall nach 72 stündiger Wasserlagerung und linearer Bürstbewegung.

Füllungsmaterial	Bürstintervall 1	Bürstintervall 2	Bürstintervall 3	Bürstintervall 4
Resin I	1470	1620	1658	2178
Resin II	1375	958	555	720
Resin III	2605	2048	2173	2685
Resin IV	817	1843	998	1558
Arabesk®	2173	4418	3783	2483
Blend a Lux®	2078	2468	2660	2198
Heliomolar radiopaque®	873	1335	1430	1195
Tetric®	3565	3990	3395	3795
Pertac Hybrid®	4080	3463	3758	2880
Durafill®	1033	1405	1735	1478
Estilux Hybrid®	2135	2063	943	1043
Charisma®	2431	3348	1718	2503

Tab. 8.4: Mittlere Gewichtsverluste in μg der Prüfkörper pro Bürstintervall nach 72 stündiger Wasserlagerung und flächiger Bürstbewegung.

Füllungsmaterial	Bürstintervall 1	Bürstintervall 2	Bürstintervall 3	Bürstintervall 4
Resin I	3408	2478	1998	2893
Resin II	1735	2008	1595	1523
Resin III	3720	2553	3180	1113
Resin IV	1580	1368	1813	1293
Arabesk®	4948	2105	1405	2105
Blend a Lux®	2875	1515	1143	1748
Heliomolar radiopaque®	2240	1373	1618	1655
Tetric®	3325	4238	2968	3223
Pertac Hybrid®	2640	2183	1960	2505
Durafill®	2410	978	1358	818
Estilux Hybrid®	1925	2198	1780	1423
Charisma®	3198	1308	1603	2473

Tab. 8.5: Mittlere Gewichtsverluste in μg der Prüfkörper pro Bürstintervall nach 3 monatiger Wasserlagerung und linearer Bürstbewegung.

Füllungsmaterial	Bürstintervall 1	Bürstintervall 2	Bürstintervall 3	Bürstintervall 4
Resin I	4015	2500	3150	1885
Resin II	3525	1438	2035	2042
Resin III	4000	3790	1583	1210
Resin IV	3060	1118	1230	1778
Arabesk®	5585	3445	2248	2813
Blend a Lux®	5870	1395	2678	1978
Heliomolar radiopaque®	3933	2098	1710	1938
Tetric®	4528	4110	3395	2828
Pertac Hybrid®	4310	3580	2820	2993
Durafill®	2908	783	1775	903
Estilux Hybrid®	2803	2558	1935	1280
Charisma®	5403	1170	2120	3030

Tab. 8.6: Mittlere Gewichtsverluste in μg der Prüfkörper pro Bürstintervall nach 3 monatiger Wasserlagerung und flächiger Bürstbewegung.

Material/Gerät	Genau Bezeichnung	Hersteller bzw. Bezugsadresse
Komposit	Arabek® (Ch.B.: 3815)	Fa. Voco Anton-Flettnerstr. 1-3 D-27457 Cuxhaven
Komposit	Blend a Lux® (Ch.: 4013, TG.: 288841)	Fa. Blend a Med D-66773 Schwalbach
Komposit	Heliomolar radiopaque® (Ch.B.: 560701)	Fa. Vivadent Schaan, Liechtenstein
Komposit	Tetric® (Ch.B.: 560563)	Fa. Vivadent Schaan, Liechtenstein
Komposit	Pertac Hybrid® (Ch.B.: 0015)	Fa. Espe Am Griesberg 2 D-82229 Seefeld
Komposit	Durafill® (Ch.B.: 042)	Fa. Heraeus Kulzer Philipp-Reisstr. 8 D-61273 Wehrheim
Komposit	Estilux Hybrid VS® (Ch.B.: 044)	Fa. Heraeus Kulzer Philipp-Reisstr. 8 D-61273 Wehrheim
Komposit	Charisma® (Ch.B.: 057)	Fa. Heraeus Kulzer Philipp-Reisstr. 8 D-61273 Wehrheim
Komposit	Resin I-IV	Fa. Heraeus Kulzer Philipp-Reisstr. 8 D-61273 Wehrheim
Zahnbürste	Oral B®, P 40, mittelhart	Fa. Oral B Weilbacherstr. 19 D-65439 Flörsheim
Bestandteil des Abrasive mediums	Calciumhydrogenphosphat wasserfrei, feinst gepulvert, reinst, E 341 (Bestellnr.: 1.02144.500)	Fa. Merck Frankfurterstr. 250 D-64293 Darmstadt
Bestandteil des Abrasive mediums	Tragant, keimarm (Bestellnr.: 8405.0500)	Fa. Merck Frankfurterstr. 250 D-64293 Darmstadt
Bestandteil des Abrasive mediums	Glyzerin	Fa. Blend a Med, D-66773 Schwalbach
Mixerstab	HR 1381	Fa. Philips
Polymerisationslampe	Translux Cl®	Fa. Heraeus Kulzer Philipp-Reisstr. 8 D-61273 Wehrheim

Material/Gerät	Genau Bezeichnung	Hersteller bzw. Bezugsadresse
Polymerisationsofen	Dentacolor®-XS-Lichtgerät	Fa. Heraeus Kulzer Philipp-Reisstr. 8 D-61273 Wehrheim
Schleifmaschine	Surfex 68201	Fa. Wirtz Am Stufstock 7 D-40231 Düsseldorf
Schleifpapierscheiben	Körnung 400 und 600 Grit	Fa. Leco, St. Joseph, Michigan, USA
Thermoschrank		Fa. Bauer München 13
Ultraschallbad	T-14	L & R Manufacturing Company, New Jersey, USA
Zahnbürstmaschine	Spezialanfertigung	Fa. WillyTec Frankfurter Ring 193a D-80807 München
Schrittmotor- Steuerung	CNC-Kontroller C1421	Fa. Isel Im Eibolzgraben 16 D-36132 Eiterfeld
Elektronische Halb-Mikrowaage	R 200 D	Fa. Sartorius D-37070 Göttingen
Rasterelektronenmikroskop	Typ AMR 1200	Fa. Leitz Sigmund-Hiepestr. 2-13 D-35578 Wetzlar

Tab. 8.7: In dieser Drei-Medien-Abriebsstudie verwendete Materialien und Geräte.

Betriebsanleitung der Zahnbürstmaschine

1. Anschlüsse kontrollieren.
2. Rechner und Bildschirm einschalten
3. Systemsteuerung einschalten (schwarzer Kippschalter befindet sich auf der Rückseite des Geräts)
4. Rechner auf „Buersten „ konfigurieren
5. Starten des Bürstprogramms mit C:\TP\ISEL\simzahn9
6. Drücken der Clear-Taste (befindet sich auf der Vorderseite der Systemsteuerung unterhalb des roten Lämpchens)
7. Bürstbewegungsart durch Drücken des gewünschten Buchstaben (A-H) auswählen
8. Anzahl der Bürstzyklen pro Bürstintervall einstellen:
 - 7.1. Drücken von **space** oder **F5**
 - 7.2. Gewünschte Zyklenzahl eingeben
 - 7.3. Bestätigen mit **Enter**
9. Zeitpunkt der Referenzfahrt ändern:
 - 8.1. Drücken von **F1**
 - 8.2. Drücken von **F6**
 - 8.3. Gewünschte Zahl eingeben
 - 8.4. Bestätigen mit **Enter**
 - 8.5. Drücken von **F10**
10. Bürstvorgang starten mit **F8** oder **Enter**
11. Zahnbürsten mit Hilfe der Flügelmuttern per Hand auf Prüfkörperoberfläche justieren
12. Justierte Zahnbürstenposition mit **Enter** bestätigen, gewähltes Bürstintervall wird dadurch gestartet
(sollte der Bürstzyklus mit Schrittverlusten beginnen, Abbruch mit **Esc** und Bürstintervall mit **F8** oder **Enter** neu starten)
13. Bürstvorgang kann jederzeit mit **Esc** abgebrochen werden !!
14. Programm beenden mit **Esc**
15. Rechner, Bildschirm und Systemsteuerung ausschalten

Betriebsanleitung der Halb-Mikrowaage (Sartorius R 200 D)

1. Aufstellort möglichst ohne: - Wärmeeinstrahlung
- aggressive Umgebung
- Erschütterungen
- Luftzug
2. Anschließen der Waage am Aufstellort mit dem Netzkabel an eine Steckdose.
3. Ausrichten der Waage mit den Stellfüßen, daß die Luftblase der Libelle in Kreismitte steht.
4. Nach dem Anschluß der Waage an das Stromnetz soll eine Anwärmzeit von mindestens 2 Stunden eingehalten werden.
5. Zum Ein- und Ausschalten der Waage **ON/OFF-Taste** betätigen. (Nach dem Anschluß an das Netz erlischt beim Ausschalten die Anzeige. Die Waagenelektronik bleibt eingeschaltet (**STANDBY**). Die Waage ist so ohne Anwärmzeit sofort nach dem Einschalten wieder betriebsbereit).
6. Nach dem Einschalten (**ON/OFF-Taste** drücken) erfolgt ein automatischer Funktionstest der Waagenelektronik. Er endet mit der Anzeige 0,00000 g.
7. Durch drücken der **Taste T** kann die Waage tariert werden. Dies ist notwendig wenn ein Gefäß verwendet werden soll oder wenn die Gewichtsanzeige nicht 0,0000 g anzeigt.
8. Wägegut zur Gewichtsbestimmung auf die Waagschale bringen. Schließen der Wägeraumtüren. Das Gewicht kann in der Gewichtsanzeige abgelesen werden, sobald die Gewichtseinheit g als Stillstandssymbol erscheint.
9. Nach dem Ausschalten (**ON/OFF-Taste** drücken) bleibt die Waagenelektronik im **STANDBY**-Betrieb.

Danksagung

Besonders danke ich OA Dr. K.-H. Kunzelmann für die Überlassung des interessanten Themas sowie die intensive Unterstützung bei der Lösung der verschiedenen wissenschaftlichen Probleme und fachlichen Beratung bei der Erstellung dieser Arbeit.

Herrn Prof. Dr. R. Hickel danke ich herzlich für die fachlichen Anregungen. Mein Dank an ihn gilt insbesondere auch dafür, daß er mir ermöglichte, diese Studie an der Poliklinik für Zahnerhaltung und Parodontologie durchzuführen.

Ebenso möchte ich der Friedrich-Baur-Stiftung München für ihre finanzielle Unterstützung danken.

Ich bedanke mich bei Herrn Dipl.-Ing. (FH) S. Holzner für die Konstruktion und Bau der PC-gesteuerten Zahnbürstmaschine.

Mein Dank gilt ebenso Herrn Jens Hauptmann für die Erstellung der Steuerungssoftware.

Herrn Dipl.-Ing. (FH) Th. Obermeier danke ich für seine herzliche Unterstützung und Beratung bei der Anfertigung der REM-Bilder.

Lebenslauf

Am 30. März 1971 wurde ich als Sohn des Ehepaares Wolfgang und Heidemarie Singer in München geboren.

Von 1977 bis 1981 besuchte ich die Grundschule an der Camerloherstraße, anschließend das Max-Planck-Gymnasium in München und legte dort das Abitur im Juni 1990 ab.

Im September 1990 immatrikulierte ich mich an der Ludwig-Maximilians-Universität in München im Studienfach Zahnheilkunde. Der naturwissenschaftlichen Vorprüfung habe ich mich im Oktober 1991, der zahnärztlichen Vorprüfung im April 1993 und der zahnärztlichen Prüfung von August 1995 bis Februar 1996 unterzogen. Die Approbation als Zahnarzt erfolgte im Februar 1996.