

Aus der Poliklinik für Zahnerhaltung und Parodontologie
der Universität München
Direktor: Prof. Dr. Reinhard Hickel

**In-vitro-Studie zum Verschleiß
von kommerziell verfügbaren Kompositen
im Kausimulator**

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

vorgelegt von
Catharina Zantner
aus
Nürnberg
2001

Mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät
der Universität München

Für Frank

Berichterstatter: Priv.-Doz. Dr. Karl-Heinz Kunzelmann

Mitberichterstatter: Prof. Dr. Dr. Franz-Xaver Reichl
Prof. Dr. Peter Pospiech

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

Tag der mündlichen Prüfung: 24.04.2001

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1 Einleitung und Problemstellung	1
2 Literaturübersicht	3
2.1 Verschleißmechanismen - Definition und Grundbegriffe	3
2.2 Verschleißsimulation in der tribologischen Literatur	6
2.3 Übersicht über Verschleißsimulationen in der Zahnmedizin	9
2.4 Pin-on-Block-Verschleißsimulationen in der Zahnmedizin	21
2.5 Einteilung der Komposite	23
3 Material und Methode	25
3.1 Prüfkörper	25
3.1.1 Verwendete Füllungsmaterialien	25
3.1.2 Prüfkörperherstellung	29
3.1.3 Antagonistenherstellung	30
3.2 Versuchsaufbau	31
3.2.1 Kausimulator	31
3.3 Versuchsdurchführung	35
3.4 Auswertung	37
3.4.1 Quantitative Abriebsmessung	37
3.4.2 Morphologische Verschleißanalyse	38
3.4.3 Auswertung der Antagonisten	39
3.4.4 Statistische Auswertung und grafische Darstellung	39

4 Ergebnisse	41	5 Diskussion	83
4.1 Mikrofüllerkomposite	42	5.1 Verschleiß im zeitlichen Verlauf	83
4.1.1 Verschleiß im zeitlichen Verlauf	42	5.2 Verschleißfestigkeit der getesteten Füllungsmaterialien	85
4.1.2 Ranking der Mikrofüllerkomposite in Bezug auf ihre Verschleißfestigkeit	43	5.3 Abrasivität der Komposite auf den Antagonisten	91
4.2 Hybrid- und Feinstpartikelhybridkomposite	45	5.4 Betrachtung der Oberfläche mit dem Rasterelektronenmikroskop	94
4.2.1 Verschleiß im zeitlichen Verlauf	45	5.5 Diskussion der Fehlermöglichkeiten und Optionen für zukünftige Verschleißsimulationen im Kausimulator	97
4.2.2 Ranking der Hybrid- und Feinstpartikelhybridkomposite in Bezug auf ihre Verschleißfestigkeit	46		
4.3 Kompomere	48	6 Schlußfolgerung	101
4.3.1 Verschleiß im zeitlichen Verlauf	48	7 Zusammenfassung	104
4.3.2 Ranking der Kompomere in Bezug auf ihre Verschleißfestigkeit	49	8 Literaturverzeichnis	106
4.4 Feinstpartikelhybridkomposite mit hohem Mikrofülleranteil oder porösen Füllkörpern	51	9 Anhang	116
4.4.1 Verschleiß im zeitlichen Verlauf	51	10 Danksagung	123
4.4.2 Ranking der Feinstpartikelhybridkomposite mit hohem Mikrofülleranteil oder porösen Füllkörpern in Bezug auf ihre Verschleißfestigkeit	52	11 Lebenslauf	124
4.5 Zusammenfassung der Ergebnisse der Verschleißbestimmung aller getesteten Materialien	53		
4.6 Ergebnisse der morphologischen Verschleißanalyse	56		
4.7 Antagonistenauswertung	78		

1 Einleitung und Problemstellung

Komposite haben in den letzten Jahren eine weite Verbreitung in der Zahnheilkunde gefunden. Ursachen sind die anhaltende Diskussion um den Füllungswerkstoff Amalgam und der Wunsch der Patienten nach ästhetisch ansprechenden, zahnfarbenen Füllungen. Hinzu kommt die Empfehlung vieler Hersteller, Komposite auch für Klasse-I- und Klasse-II-Kavitäten zu verwenden.

Deshalb ist es eine wichtige Aufgabe der unabhängigen Forschungsinstitutionen, wie etwa Universitäten, schnellstmöglich und fachgerecht die Qualität der angebotenen Materialien zu überprüfen und miteinander zu vergleichen, um in Zukunft die bestmögliche Versorgung der Patienten garantieren zu können (Holzner-Hartmannsgruber 1997).

Materialien, die zur Füllungstherapie in der Zahnheilkunde Verwendung finden, müssen ganz bestimmte Qualitäten aufweisen. Neben den biologischen Eigenschaften und der leichten Verarbeitung spielen die physikalischen Werte, unter anderem die Verschleißfestigkeit, eine große Rolle (Roulet 1976, Lutz 1984).

Klinische Tests werden unter der Voraussetzung einer exakten Meßmethodik als sehr aussagekräftig beurteilt. Sie sind jedoch mit einer Reihe von Nachteilen behaftet: Dabei stehen insbesondere die sehr lange Zeitspanne zur Gewinnung von Daten, finanzielle Aspekte und die Problematik der Standardisierbarkeit der Testbedingungen im Vordergrund (Krejci 1990 a).

An der Poliklinik für Zahnerhaltung und Parodontologie der Universität München wurde deshalb ein mehrstufiges In-vitro-Testverfahren zur Evaluation von dentalen Füllungsmaterialien entwickelt. Neben der 2-Achsen-Zahnbürstmaschine (Singer

1996) kommen drei Versuchsanordnungen zur Simulation der okklusalen Belastung zum Einsatz. Dazu gehört eine ACTA-Maschine (De Gee 1986) zur Simulation des Materialverschleißes durch Nahrungsbestandteile, eine Pin-on-disk-Maschine (Holzner-Hartmannsgruber 1997), zur Untersuchung der Zusammenhänge zwischen Reibung, Reibkräften und Materialverschleiß und der in der vorliegenden Arbeit verwendete computergesteuerte Kausimulator (Kunzelmann 1998).

Mit dem Kausimulator soll der überwiegend durch mechanische Kaubelastung verursachte Verschleiß von kommerziellen Kompositen und die sich daraus ergebenden Verschleißmechanismen im okklusalen Kontaktpunktbereich untersucht werden.

Der Vergleich der kommerziellen Komposite ist nicht einfach, da wesentliche Informationen, wie Volumenanteil der Füllkörper, Besonderheiten der Form und Verteilung der Füllkörper, oft nicht verfügbar sind oder unter unterschiedlichen Bedingungen erfaßt wurden (Braem 1989).

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, den Kontaktabrieb von kommerziell verfügbaren Kompositen unter standardisierten Bedingungen im Kausimulator zu testen und die sich daraus ergebenden Verschleißmechanismen im Rasterelektronenmikroskop zu untersuchen.

Dabei sollen die Einflüsse der Füllkörpergröße, des Füllkörpermaterials (organisch, anorganisch) und Besonderheiten hinsichtlich der Struktur (z.B. poröse Füllkörper, Größenverteilung, Präpolymerisate) auf die Verschleißfestigkeit untersucht werden.

Des Weiteren wird die Abrasivität der kommerziellen Komposite gegenüber dem Antagonisten untersucht.

2 Literaturübersicht

2.1 Verschleißmechanismen - Definition der Grundbegriffe

Um das komplexe Phänomen Verschleiß zu verstehen und vielleicht sogar das Ausmaß des ungewollten Materialabtrages vorhersagen zu können, ist es notwendig, die einzelnen Mechanismen, die Verschleiß verursachen, zu kennen sowie die beanspruchten Oberflächen zu untersuchen (Roulet 1987).

Vom Deutschen Institut für Normung wird der Begriff „**Verschleiß**“ definiert als „fortschreitender 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).

Verschleiß ist keine spezifische Materialeigenschaft, wie E-Modul, Druck- und Zugfestigkeit, sondern hängt von mehreren gleichzeitig wirkenden Faktoren ab (Powell 1975, Roulet 1987, Sulong 1990, DIN 50 320).

Zu diesen **Verschleißfaktoren** gehört das tribologische System (Tribosystem), die Beanspruchungsparameter und die Verschleißmechanismen (Kunzelmann 1998).

Tribologie leitet sich von dem griechischen Wort “tribos“ (reiben) ab und ist die Wissenschaft und Lehre von Reibung, Schmierung und Verschleiß gegeneinander bewegter Körper (Meyers Taschenlexikon 1992).

Nach DIN 50 320 besteht das tribologische System aus folgenden Elementen:

1. Der Körper
2. Der Gegenkörper
3. möglicherweise vorliegendes Zwischenmedium
4. Das Umgebungsmedium

In diesem System wirken die **Beanspruchungsparameter** Kraft, Temperatur, Beanspruchungsdauer, Bewegungsform und zeitlicher Bewegungsablauf. Die dabei wirkenden vier **Haupt-Verschleißmechanismen** (nach DIN 50 320) sind wie folgt definiert:

Adhäsion entsteht durch Ausbildung und Trennung von Grenzflächen-Haftverbindungen (z.B. Kaltverschweißungen, Fressen).

Abrasion beschreibt den Materialabtrag durch ritzende Beanspruchung (Mikroerspanungsprozeß). Je nachdem, ob die abrasiven Bestandteile fest gebunden oder zwischen den okkludierenden Flächen frei beweglich sind, wird in **Zwei- oder Dreikörperverschleiß** differenziert.

Oberflächenzerrüttung ist definitionsgemäß die Ermüdung und Ribbildung in Oberflächenbereichen durch tribologische Wechselbeanspruchungen, die zu Materialtrennungen führen (z. B. Grübchen). Die Verschleißpartikel sind schollen- und lamellenartig (Suh 1986).

Tribochemische Reaktionen sind Verschleißvorgänge, bei denen Reaktionsprodukte entstehen, durch die Wirkung von tribologischer Beanspruchung bei chemischer Reaktion von Grundkörpern, Gegenkörpern und angrenzendem Medium (z.B. die Bildung von Oxiden auf Metalloberflächen).

Nach Zum Gahr (1987) werden innerhalb des abrasiven Verschleißes noch einmal vier Grundmechanismen unterschieden, wobei die einzelnen Mechanismen fließend ineinander übergehen.

„**Mikropflügen**“ führt lediglich zu einer Verformung des Materials. Nach wiederholter Verformung lösen sich Partikel aus der Oberfläche durch „**Mikroermüden**“. Beim „**Mikrospanen**“ wird sofort ein Span abgetragen, der in Höhe, Breite und Länge der Schnittspur entspricht. Als „**Mikrobrechen**“ werden Mikroaussplitterungen durch Ribbildung und Ribwachstum bezeichnet.

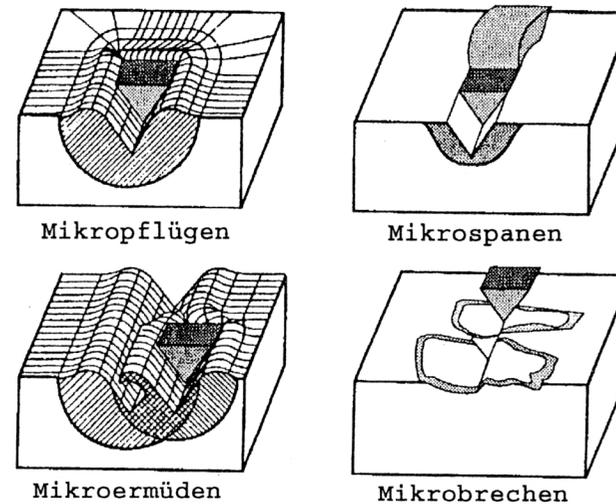


Abb. 2.1: Grundmechanismen des abrasiven Verschleißes (Zum Gahr 1987)

Mikropflügen und Mikrospanen sind entscheidend für den Verschleiß duktiler Werkstoffe. Bei spröden Werkstoffen kommt es zu hohen Belastungen an der Oberfläche und dadurch zum Mikrobrechen. Ausbrüche führen zu Materialverlust, der über die Kontaktfläche hinaus reicht.

Friedrich (1986) unterscheidet mechanische Wechselwirkungen, zu denen die Verschleißmechanismen Oberflächenzerrüttung und Abrasion zählen, und Wechselwirkungen zwischen den Werkstoffen. Hierzu gehören die Verschleißmechanismen tribochemische Reaktion und Adhäsion. Jeder Verschleißmechanismus führt zur Entstehung von typischen Verschleißpartikeln. Daher lassen sich aus der Analyse der Verschleißpartikel Rückschlüsse auf die Verschleißmechanismen ziehen.

Um Verschleißerscheinungen besser unterscheiden zu können, differenziert Lutz (1984) zwei Verschleißbereiche auf der Zahnoberfläche: „OCA“ = occlusal contact area und „CFA“ = contact free area.

Der Verschleiß in der okklusalen Kontaktzone (OCA) wird überwiegend durch mechanische Kaubelastung verursacht, während in der kontaktfreien Zone (CFA) die Drei-Körper-Abrasion dominiert.

Die Verschleiß-Begriffe lassen sich auch auf Füllungswerkstoffe übertragen. Im Zusammenhang mit Füllungsmaterialien wird der englische Begriff „**fatigue**“ (**Ermüdung**) gebraucht. Wobei Ermüdung im Sinne von „**bulk fracture**“ (plötzlicher Verlust großer Anteile von Füllungsmaterial), von „**surface pitting**“ (Grübchenbildung auf der Füllungsoberfläche) oder „**chipping**“ (Absplittern größerer Füllungsanteile in Randbereichen) verwendet wird (Kunzelmann 1998).

2.2 Verschleißsimulationen in der tribologischen Literatur

Die Tribologie umfaßt das Gesamtgebiet von Reibung und Verschleiß. Sie schafft unter anderem durch eine einheitliche Nomenklatur einen gemeinsamen Rahmen für

fachübergreifende Fragestellungen der Tribologie, die in Industrie und Wissenschaft bearbeitet werden (Czichos 1992).

In der Dentalforschung sind tribologische Untersuchungen von besonderer Bedeutung. Das ist auf zwei wesentliche Vorteile zurückzuführen, die sie gegenüber klinischen Studien haben: Die Testparameter einer tribologischen Studie können eindeutig definiert werden, und die Studie liefert reproduzierbare Ergebnisse. Hinzu kommt, daß der Zeit- und Kostenaufwand für eine tribologische Studie geringer als für eine In-vivo-Studie ist.

Dabei ist zu bedenken, daß die im Labor ermittelten Daten nicht ohne weiteres mit den Ergebnissen aus der Klinik vergleichbar sind. In vivo sind Parameter wie Last, Geschwindigkeit, Temperatur, Belastungszyklen und Zwischenmedium meist nicht zu erfassen (Zum Gahr 1987).

Verschleiß-Situationen werden danach unterschieden, wie Körper und Gegenkörper aufeinander treffen (Hutchings 1992). Bei den sogenannten Pin-on-disk- (Abb. 2.2) und Pin-on-block-Versuchsaufbauten trifft ein Pin auf eine Fläche. Bei der sogenannten ACTA-Maschine (Abb. 2.3) entsteht der Verschleiß an zwei aufeinander laufenden Rädern. Die Räder drehen sich gegenläufig mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten ($\omega_1 > \omega_2$).

Die Verschleißart bei Pin-on-block- und Pin-on-disk-Simulationen ist Gleitverschleiß. Somit sind die wirkenden Mechanismen (einzeln oder kombiniert) Oberflächenzerrüttung, Abrasion, Adhäsion und tribochemische Reaktionen (DIN 50 320, Czichos 1992).

Eine andere Art der Unterscheidung ist die Einteilung in offene und geschlossene Systeme (Zum Gahr 1987). Offene Systeme dienen nur der Untersuchung des

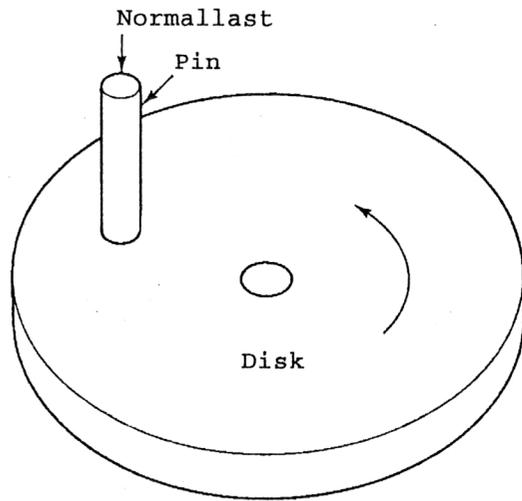


Abb. 2.2: Prinzip des Pin-on-disk-Aufbaus (Suh 1986)

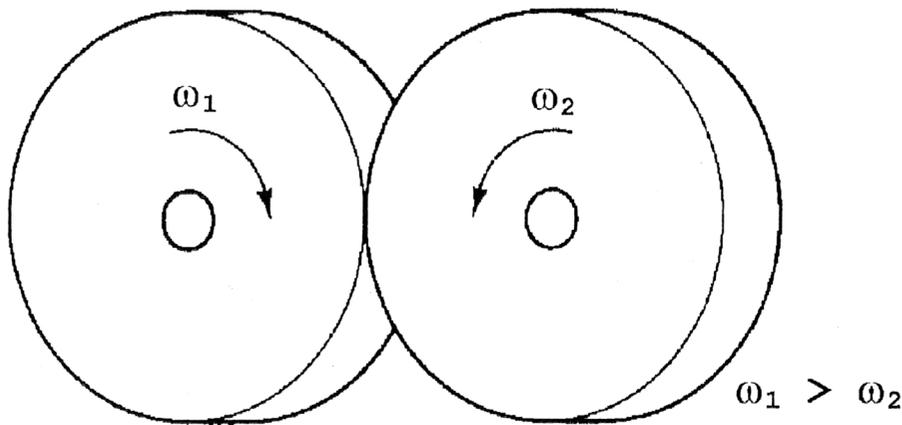


Abb. 2.3: Prinzip der ACTA-Maschine (Suh 1986)

Verschleißverhaltens eines Prüfkörpers. Dazu zählen beispielsweise Verschleißsimulationen mit Schleifpapier. Bei geschlossenen Systemen kann der Verschleiß von Körper und Gegenkörper bestimmt werden.

Um die Verschleißmechanismen besser zu verstehen, wird bei experimentellen Verschleißtests nicht allein der Verschleiß gemessen, sondern es wird auch die zeitliche Veränderung des Verschleißes von verschiedenen Materialpaarungen erfasst (Suh 1986).

Soll der Einfluß einzelner Parameter auf den Verschleiß untersucht werden, so darf bei den Versuchen jeweils nur ein Parameter, in der Regel das zu prüfende Material, verändert werden. Czichos (1992) empfiehlt, bei konstanten Parametern den Verschleiß als Funktion der Beanspruchungsdauer zu messen und in einem Verschleiß/Zeit-Diagramm zu veranschaulichen.

2.3 Übersicht über Verschleißsimulationen in der Zahnmedizin

Man unterscheidet in der Methodik der Verschleißsimulation verschiedene Ansätze. In-vitro-Verschleißuntersuchungen lassen sich unterteilen in Zahnbürstsimulationen und Simulationen okklusaler Belastung (Kunzelmann 1998) oder in Zwei- und Dreikörper-Verschleiß (Powers 1974, Powell 1975).

In der folgenden Übersicht wurde sich für die erste Einteilung entschieden, wobei hier nur Simulationen okklusaler Belastungen besprochen werden, eingeteilt nach Arbeitsgruppen und Funktionsprinzipien. Auf die Pin-on-block-Aufbauten wird im nächsten Kapitel noch einmal näher eingegangen werden.

Publikationen zu den Anfängen okklusaler Belastungstests erscheinen erstmals bei Bodicker (1947). Er entwickelte ein Verfahren zur Verschleißbestimmung auf der Grundlage eines Artikulators und verwendete künstliche Zähne aus verschiedenen Materialien.

Slack (1949) führte seine ersten Versuche mit dem sogenannten Tabor Abrasor durch. Hierbei handelt es sich um eine Bestimmung des Abriebs nach dem Reibradverfahren (DIN 53 754). Das Prüfgerät hat einen waagrechten Probenhalter, der durch einen Motor angetrieben wird, und zwei, senkrecht auf dem Probenhalter stehende, frei drehbare Räder, die mit Gewichtskraft auf die Proben gepreßt werden. Die Reibräder sind mit Schleifpapier bestückt.

Schleifpapier wird als abrasiver Gegenkörper auch in anderen Versuchsaufbauten zu Verschleißsimulationen verwendet (Tillitson 1971, Powers 1974, Harrison 1975, Draughn 1978, Harrison 1985). Es wird neben der Körnung auch die Härte der Schleifpapierpartikel variiert (Rootare 1979).

Als Grundforderungen für eine klinisch relevante Verschleißsimulation werden sieben wesentliche Punkte definiert (Cornell 1957):

1. Der Versuchsaufbau sollte sich so nah wie möglich an die klinischen Bedingungen halten.
2. Die Ergebnisse sollten mit den Beobachtungen in der Klinik übereinstimmen.
3. Das Verschleißmuster sollte dem im natürlichen Gebiß entsprechen.
4. Die Proben sollten unter klinisch vergleichbaren Bedingungen bearbeitet werden.
5. Er fordert eine Versuchsdurchführung ohne oder mit sehr mildem Abrasiv.
6. Der Test soll zügig durchgeführt werden können.
7. Eine statistisch akzeptable Fallzahl der einzelnen Werkstoffe soll durchführbar sein.

Die Arbeitsgruppe um Harrison (1975) entwickelte eine Versuchsanordnung, die in Bezug auf die okklusale Belastung, die Länge des Gleitvorganges und die Kontaktzeit der Antagonisten dem natürlichen Kauzyklus entsprechen sollte (Harrison 1977). Bei dieser Pin-on-block-Anordnung mit einem Pin als Testkörper wurde bei einigen Versuchen SiC-Schleifpapier als Gegenkörper gewählt. Es konnte ein Zusammenhang zwischen der Mikrostruktur der Komposite und dem Verschleiß unter SiC-Schleifpapier festgestellt werden. Der Verschleiß war gering bei einem hohen Anteil an großen, harten Füllkörpern und nahm zu, wenn die Füllkörper in der Größenordnung des Abrasiv lagen (Draughn 1978). Dieses Ergebnis steht im Widerspruch zu Harrison (1985), der die Körnung und Belastung variierte und hohen Verschleiß bei großen Abrasivkörnern feststellte, und einen deutlich geringeren Verschleiß, wenn die Füllkörper des Komposites und die Korngröße des Abrasiv in gleicher Größenordnung vorlagen.

Mit einem vergleichbaren Versuchsaufbau, allerdings ohne Impulsbelastung, testete Jagger (1994) Keramikpins gegen menschlichen Schmelz, wobei glasierte und unglasierte Keramikpins eine höhere Verschleißrate aufwiesen als polierte Keramikpins.

Innerhalb der Schule um Craig und Powers wird das Thema Verschleiß mit mehreren Versuchsanordnungen bearbeitet. Dazu gehörten Versuche mit dem Tabor Abrasor und Untersuchungen mit einer umgebauten hydraulischen Fräsmaschine zur Bestimmung des Reibungskoeffizienten (Tillitson 1971).

Der Reibungskoeffizient wurde unter anderem bestimmt für Rinderschmelz gegen verschiedene Werkstoffe. Es konnte keine Abhängigkeit zwischen Vorschubgeschwindigkeit und Reibungskoeffizient festgestellt werden.

Ein anderer Ansatz ist die Untersuchung der Versagensmechanismen von Werkstoffen mit Scratch-Tests (Powers 1972 a, b, c, 1973 a, b, c, 1976).

Hier wird die reale Kontaktfläche betrachtet, die sich durch die einzelnen Oberflächenmikrokontakte ergibt. Die Diamantspitzen mit unterschiedlichen Radien

und Öffnungswinkeln sollen als Modell für diese Oberflächenmikrokontakte dienen. Durch verschiedene Bewegungen wie einfaches und wiederholtes Ritzen, mit und ohne Translation und senkrecht aufeinander stehende Ritzspuren in Zahnschmelz und Kompositen konnten spröde und duktile Versagensmechanismen differenziert werden (Powers 1972 c, Powers 1976). Es wurde die Annahme bestätigt, daß bei wiederholtem Ritzen des selben Bereiches das Ausmaß der Oberflächenschädigung weitaus größer war, als gemessen an einmaligem Ritzen zu erwarten gewesen wäre. Bei wiederholtem Ritzen in entgegengesetzter Richtung wies die beanspruchte Oberfläche besonders starke Zerstörungen auf (Powers 1973 c).

In einem weiteren Scratch-Test (Powers 1976) wurde unter anderem der Einfluß der Füllkörper auf die Penetrationstiefe untersucht. Füllkörper reduzieren die Penetrationstiefe, besonders silanisierte Füllkörpern. Materialien mit nicht silanisierten Füllkörpern versagen früher als Materialien mit silanisierten Füllkörpern.

Als weitere Versuchsanordnung zur Verschleißsimulation mit SiC-Schleifpapier diente eine modifizierte Schleifmaschine. Der Pin ist der Testkörper. Im Gegensatz zu vorangegangenen Versuchsaufbauten mit Schleifpapier (Slack 1949, Tillitson 1971) wurde das Schleifpapier unter der Probe meanderförmig verschoben, um ständigen Kontakt mit frischem Schleifpapier zu gewährleisten (Powers 1974).

Der Abrasionstest zeigte: Ungefüllte Kunststoffe weisen im Vergleich zu Komposit mit unsilanisierten Füllkörpern und Kompositen mit silanisierten Füllkörpern eine geringere Verschleißfestigkeit auf, wobei Komposite mit silanisierten Füllkörpern den geringsten Verschleiß zeigen. Die hochvernetzte Matrix (BIS-GMA) zeigt 40 % mehr Verschleiß als gering vernetztes Polymethylmetacrylat. In Bezug auf die Art des Füllkörpers erweisen sich Quarzfüllkörper gegenüber Lithium- und Aluminiumsilikatgläsern als verschleißfester (Powers 1974).

Die Annahme, daß eine zähe Matrix bei Kompositen zu einer Verbesserung des Verschleißverhaltens führt (Powers 1974), konnte mit dem Scratch-Test (Powers 1976) bestätigt werden.

Powell (1975) konstruierte eine Pin-on-Block-Variante, die die beiden von ihm differenzierten Okklusionskonzepte gleichzeitig simulieren kann. Auf der einen Seite der Maschine wird eine reine Gleitbewegung zwischen Schmelzpin und Probe ausgeführt, die der reinen Gleitbewegung bei Eckzahnführung vergleichbar ist. Auf der anderen Seite wird eine Impulsbelastung mit einer minimalen Gleitbewegung kombiniert, die der Situation im Seitenzahnbereich bei zentrischer Okklusion ähnlich ist. Der Vorversuch ergab keinen meßbaren Substanzverlust bei Impulsbelastung, weder bei Amalgam noch bei Komposit.

Die Ergebnisse für Amalgam und das kommerzielle Komposit verglich er mit zwei klinischen Studien von Williams (1970) und Phillips (1971). Dabei stellte er gleiches Ranking, d. h. gleiche Reihenfolge des Verschleißes für beide Werkstoffe fest. Anhand der ausgeprägt gerillten Oberfläche nahm er an, daß der Hauptverschleißmechanismus abrasiver Verschleiß ist. Bei der Auswertung der Morphologie der Kompositoberfläche konnten Füllerverlust und abgeschliffene Quarzfüllkörper sichtbar gemacht werden.

Gemeinsam mit Dickson (1979) entwickelte er eine Pin-on-disk-Maschine, und orientierte sich bei der Simulation des Kauvorganges an seinem Pin-on-block-Aufbau. Hiermit kam er zu gleichem Ranking für Amalgam und Komposite.

Die Arbeitsgruppe um Bailey und Rice legt großen Wert auf die Untersuchung der Ursachen für einzelne Verschleißerscheinungen. Dazu müssen einzelne Parameter variiert werden (Bailey 1981 a, b).

Als Prüfmaschine wird eine Pin-on-disk-Anordnung mit fünf Prüfständen, ein sogenannter Gleitverschleiß-Tester, gewählt. Der Pin besteht aus Schmelz von Molaren.

Die Variation der Oberflächenrauigkeit durch unterschiedliche Endbearbeitung der Probe mit SiC-Schleifpapier von 240 und 400 Grit, sowie unterschiedliche Gleitgeschwindigkeiten haben wenig Einfluß auf den Verschleiß von Kompositen. Deutlich beeinflusst wird dagegen der Verschleiß durch die Erhöhung der Flächenbelastung. Belastungsänderungen, die im Bereich der natürlichen Kaulast liegen, führen zu einem stark erhöhten Abrieb der Komposite und erzeugen ausgeprägte Oberflächendefekte (Bailey 1981 b).

Es wird auch geprüft, ob die Einspannlänge des Schmelzpins d. h. seine Starrheit, das Verschleißverhalten beeinflusst (Rice 1982) und welcher Werkstoff mit gleichbleibender Qualität als Ersatz für Schmelzpins geeignet ist (Rice 1984 a).

Bei längeren Pins werden sowohl am Pin als auch auf der Verschleißoberfläche morphologische Veränderungen festgestellt. Hinsichtlich der Verschleißrate kommt es zu einer höheren Streuung aber nicht zu einer signifikanten Veränderung des Mittelwertes. Daraus folgt, daß eine möglichst steife Versuchsanordnung bei Pin-on-disk-Aufbauten vor allem für die morphologische Auswertung von Verschleißsimulationen von Bedeutung ist (Rice 1982). Als Ersatzmaterial für Schmelzpins erweist sich gesintertes Aluminiumoxid als gut geeignet. Zum einen sind die Verschleißwerte für Schmelz und Aluminiumoxid identisch. Darüber hinaus erzeugen beide Werkstoffe morphologisch ähnliche Verschleißspuren (Rice 1984 a). Die Anwendung des Gleitverschleiß-Testers auf verschiedene Komposite ergab eine signifikant höhere Verschleißfestigkeit für Mikrofüllerkomposite im Vergleich zu konventionellen Kompositen und eine höhere Verschleißfestigkeit für lichtgehärtete Mikrofüllerkomposite im Vergleich zu chemisch gehärteten Mikrofüllerkompositen. Alle getesteten Komposite weisen nach dem Verschleißvorgang eine höhere

Oberflächenrauigkeit auf, wobei diese bei Mikrofüllerkompositen weniger ausgeprägt ist (Rice 1984 b).

McKinney und Wu (McKinney 1982) vom National Bureau of Standards übernehmen den Pin-on-disk-Aufbau mit drei Prüfständen von Powell und Dickson (Dickson 1979). Geprüft wird der Verschleiß eines kommerziellen Komposits bei variierender Last von 2,5-20 MPa, mit Pins aus Stahl, Schmelz und Durapatit.

Die plötzliche Zunahme des Verschleißes bei höheren Zyklenzahlen, wird durch einen Wechsel des Verschleißmechanismus erklärt. Bei höherer Belastung wird dieser Zustand früher erreicht. Es kommt bei höheren Zyklenzahlen zu erhöhtem Verschleiß durch Schadensakkumulation unter der Oberfläche (Bailey 1981 b, McKinney 1982).

Die Mikrodefektanalyse von Wu (1984) ergibt bei der Untersuchung von In-vivo- und In-vitro-Proben, daß der Verschleißprozeß von Kompositen nicht nur auf Oberflächenbelastung zurückzuführen ist, sondern daß auch die Erweichung des Materials durch das Mundmilieu eine Rolle spielt.

Um bereits im Labor eine bessere Vorauswahl von für die Klinik geeigneten Materialien treffen zu können und damit die Zahl der in der Klinik notwendigen Studien zu reduzieren, entwickelten Douglas und DeLong (DeLong 1983) eine neue Simulationsumgebung. Ziel ist es, ein speichelähnliches Zwischenmedium zu verwenden, die Temperaturänderungen in der Mundhöhle mit in den Versuchsaufbau einzubeziehen und die Kräfte und Bewegungsabläufe des Kauzyklus so genau wie möglich nachzuahmen.

Zur Realisierung der Forschungsziele wird eine hydraulisch angetriebene, computergesteuerte Prüfmaschine verwendet. Die natürliche dreidimensionale Kaubewegung wird vereinfacht zu einer Bewegung in horizontaler und vertikaler Richtung. Dabei kann die vertikale Last im Bereich von 9-180 N variiert werden

(DeLong 1983, 1985). Der annähernd sinusförmige Kraftverlauf soll dem natürlichen Belastungsmuster während des Kauzyklus entsprechen (Coffey 1985). Für die Testphase des Versuchsaufbaus (DeLong 1983) dient als Prüfkörper ein V-förmiger Testblock gegen einen Stahlantagonisten. Später hat der Prüfkörper eine plane Oberfläche und als Antagonisten werden Höcker von Molaren verwendet (DeLong 1985, Sakaguchi 1986, Pintado 1990), oder obere und untere dritte Molaren (Coffey 1985) oder Prämolaren (Douglas 1985).

Durch die Verwendung einer Plexiglas-Kammer, in der die Proben mit einem Wasserstrahl gespült werden, sollen die natürlichen Bedingungen der Mundhöhle simuliert werden (Coffey 1985). Douglas (1985) weist anhand natürlicher Zähne nach, daß in Bezug auf den Reibungskoeffizienten kein Unterschied zwischen destilliertem Wasser und menschlichem Speichel als Zwischenmedium besteht.

Um die klinische Übereinstimmung zu belegen, vergleicht DeLong (1985) den zeitlichen Verlauf der Verschleißentwicklung von Amalgam in vivo und in vitro. Dazu verwendet er klinische Daten von Lambrecht und setzt 250 000 Zyklen mit einem Jahr klinischer Tragedauer gleich.

Die von De Gee (1986) entwickelte ACTA-Verschleißtestmaschine stellt heute eine international anerkannte Abrasionsprüfmethode dar (Pelka 1998). De Gee beschreibt die Versuchsanordnung als reine Simulation des Verschleißes in kontaktfreien, okklusalen Bereichen unter Anwendung eines nahrungsförmigen Zwischenmediums. Die Maschine besteht aus zwei gegenläufig rotierenden Rädern mit unterschiedlichem Durchmesser, die durch konstanten Druck entlang ihrer Mantelflächen in Kontakt treten. Dabei läuft das kleine Rad gegenüber dem großen Rad mit einer Verzögerung, dem sogenannten Slip. Das kleinere Antagonistenrad aus Edelstahl weist eine strukturierte Oberfläche auf, die dem Transport des Zwischenmediums dient, auf der Mantelfläche des großen Rades werden die Proben in rechteckigen Kerben befestigt. Zusammen mit einem Rührstab, der für die

Homogenität der Suspension sorgt, sind die Räder in einem Gefäß, daß zur Aufnahme des Abrasionsmediums dient, untergebracht (De Gee 1986, 1994).

In einer ersten Studie werden bei gleichbleibender Belastung, Geschwindigkeit und Slip verschiedene Zwischenmedien verwendet, die natürliche Nahrung simulieren sollen. Hierbei wurden mit einer Mischung aus Wasser, Hirsesamen und PMMA-Perlen für verschiedene Füllungsmaterialien ein Verschleißmuster und eine Reihenfolge der Verschleißzunahme gefunden, welche mit dem Verschleißmuster und Ranking klinischer Untersuchungen vergleichbar sind (De Gee 1986).

Pallav (1989) untersucht mit dieser Versuchsanordnung, welchen Einfluß die Substitution (der prozentuale Austausch) von Makrofüllkörpern (3 µm) gegen Mikrofüller (0,04 µm) auf den Verschleiß, die Brinell-Härte und die Zugfestigkeit hat. Die Härte und Zugfestigkeit bleiben über einen Anteil von 0-15 % Mikrofülleranteil unbeeinflusst, der Verschleiß nimmt von 120 auf 80 % relativen Verschleiß im Vergleich zu dem Referenzmaterial P10, ein Hybridkomposit, ab. Daraus wird abgeleitet, daß Hybride, also Gemische aus Makro- und Mikrofüllern, verschleißfester sind als Makrofüller. Die Interpretation der Ergebnisse erweist sich als problematisch, weil das Ergebnis im Bereich des Rauschens liegt.

Roulet (1987) entwickelt einen Verschleißsimulator, zur Untersuchung von Materialermüdung durch mechanischen Verschleiß. Zusätzlich kann thermische Wechsellast hinzu geschaltet werden. Es können Proben in sechs Prüfständen getestet werden. Als Prüfkörper werden Füllungen in extrahierten Zähnen verwendet, so daß Ermüdung im Kontaktbereich gegen Stahlantagonisten geprüft werden kann. Gleichzeitig kann der Einfluß der okklusalen mechanischen Belastung auf den Verbund zur Zahnschicht untersucht werden.

Er stellt fest, daß 500 000 Zyklen, die etwa 1,5 Jahren klinischer Belastung entsprechen sollen, ausreichen, um Ermüdungsphänomene im Kontaktbereich zu bewirken. Die Tests bei thermischer Belastung liefern keine brauchbaren Ergebnisse,

weil durch die Erwärmung der Proben der Verschleiß durch Vergütung vermindert und durch Creep beschleunigt werden kann.

Um Restaurationsmaterialien unter klinisch nahen Bedingungen zu testen, entwickelt Krejci (1990 a, 1992 a) einen computergesteuerten Kaukraftsimulator. Damit wird zunächst eine zyklische mechanische Kaubelastung und thermischer Stress nachgeahmt. In einer weiteren Studie werden chemische Degradation und die Zahnbürst-/Zahnpasta-Abrasion von Füllungswerkstoffen simuliert und als weitere Parameter in den In-vitro-Test integriert (Krejci 1990 b). Die Übereinstimmung mit der Klinik wird durch quantitativen Verschleiß und die Aufnahmen unter dem Rasterelektronenmikroskop belegt (Krejci 1990 c).

Der Kausimulator hat sechs synchronisierte Prüfkammern. In ihnen sind die Proben auf Gummipuffern gelagert, die 15° zur Horizontalen geneigt sind. Zum einen soll dadurch der Aufsetzimpuls des Antagonisten gedämpft werden, was der ligamentären Aufhängung des Zahnes gleichkommt. Zum anderen will man eine minimale laterale Abgleitbewegung unter okklusaler Belastung simulieren. Um das Auftreffen des Gegenzahnes auf die Füllungsoberfläche im Sinne einer Impulsbelastung nachzuahmen, bewegt sich der Antagonist aus seiner Ruhelage 2 mm über der Probe magnetbeschleunigt auf die Prüfkörperoberfläche zu und wird nach dem Kontakt durch Federkraft in seine Ausgangslage zurückgebracht. Die Proben haben eine plane Oberfläche. Als Antagonisten werden Schmelzhöcker verwendet. Die vorderen Kammerwände sind mit abschraubbaren Sichtfenstern versehen.

Zur abflachenden Verschleißkurve kommt es infolge der Druckverminderung auf der Füllungsoberfläche durch Vergrößerung der Kontaktfläche (Krejci 1990 a, 1990 d). Auch die Beschädigung der Kompositoberfläche beim Ausarbeiten der Probe sowie die Veränderung der Oberflächenrauigkeit kommen als Ursache für das Abflachen in Betracht (Krejci 1990 a). Weil auch in vivo Schmelzhöcker verschleifen und

damit sich die Belastung pro Fläche verändert, bzw. abnimmt, werden auch für In-vitro-Versuche Antagonisten aus natürlichen Schmelzhöckern mit unterschiedlich großen Kontaktflächen (0,26, 0,38, 1,18 und 4,10 mm²) verwendet. Das Komposit und der Schmelzantagonist zeigten mit zunehmender Fläche einen signifikant geringeren Verschleiß (Krejci 1992b).

Bei gleichbleibender Kontaktfläche wird auch die Belastung von 25-100 N variiert. Es konnte eine signifikante Zunahme des Verschleißes für das Komposit sowie für den Schmelzantagonisten bei zunehmender Belastung festgestellt werden (Lutz 1992).

Leinfelder (1989), modifiziert den Verschleißsimulator von Roulet (1987), um zum einen eine bessere Korrelation mit der Klinik zu erreichen, zum anderen um die Verschleißmechanismen von Kompositen, die für okklusale Belastung bestimmt sind, genauer zu untersuchen. Neu ist das Zwischenmedium: eine Polyethylenfolie mit 5 µm Dicke, die nach jeder Belastung um 1 mm weiter transportiert wird. Durch Metallantagonisten mit 2 mm Spitzenradius werden die Proben, extrahierte Molaren mit Klasse I-Füllungen des Testwerkstoffes, über eine Feder belastet. Simultan erfolgt thermische Belastung; abwechselnd bei 5° C und 65° C, im 20-minütigen Wechsel.

Die klinische Bedeutung wird durch die morphologische Übereinstimmung der klinischen und der In-vitro-Befunde belegt.

In einer zum Teil veränderten Versuchsanordnung (Kawai 1992) werden die Prüfkörper plangeschliffen. Der Gegenkörper ist hier ein Kunststoff-Zylinder (Delrin) mit 6 mm Durchmesser und es wird mit einem anderen Bewegungsmodus gearbeitet: Der Antagonist dreht sich um 30° hin und her, in einem Zwischenmedium aus PMMA-Perlen mit 44 µm Durchmesser, anstelle von Polyethylenfolie.

Mit der von Leinfelder (1989) zuerst beschriebenen Versuchsanordnung werden verschiedene Forschungsfragen bearbeitet (Shinkai 1994a, b, Suzuki 1993, 1994, 1995a, b, Matsumur 1994). Komposite werden unter anderem auf ihre beachtlich unterschiedlich abrasive Wirkung gegenüber antagonistischen Schmelzhöckern untersucht (Suzuki 1993).

Kunzelmann (1998) stellte fest, daß sich selbst vergleichbare Verschleißsimulationen (Finger 1987, Pallav 1988) bei der Bewertung von Werkstoffen zum Teil erheblich unterscheiden.

Daraufhin wird eine In-vitro-Verschleißprüfroutine entwickelt, um einen zügigen Test möglichst vieler Materialien zu ermöglichen. In diesem Rahmen wird zur Simulation der okklusalen Belastung der computergesteuerte Kausimulator „Erlangen Typ 1“ entwickelt (Kunzelmann 1998). In acht Prüfständen werden plane Proben gegen Schmelzantagonisten geprüft. Dazu werden die Proben auf Probenhaltern befestigt, die mit einem Gummipuffer fest verbunden sind, der um 15° geneigt ist, um eine laterale Abgleitbewegung zu simulieren.

Die hohe Variationsbreite der Meßwerte nach Belastung im Kausimulator macht eine genaue Fehleranalyse erforderlich. Als mögliche Fehler werden neben der Schwankungsbreite der Antagonistenform und der sehr unterschiedlichen Schmelzqualität auch konstruktive Probleme diskutiert.

Nach kompletter Überarbeitung wird die neue Simulationsumgebung als Kausimulator „Erlangen Typ 2“ bezeichnet. Mit dieser Versuchsanordnung wird für das Hybridkomposit Ful-Fil ein signifikant höherer Volumenverlust als für das Mikrofüllerkomposit Heliomolar RO ermittelt.

2.4 Pin-on-block-Verschleißsimulationen in der Zahnmedizin

Hauptziel von Pin-on-block-Verschleißsimulationen in der Zahnmedizin ist es, den natürlichen Kauzyklus zu simulieren, um gründlich und in kürzester Zeit das Verschleißverhalten möglichst vieler Füllungswerkstoffe zu vergleichen (Harrison 1975). So können bessere Vorhersagen für den klinischen Erfolg von Füllungswerkstoffen gemacht werden (DeLong 1983).

Eine Pin-on-block-Anordnung besteht im einfachsten Fall aus einem planen Prüfkörper (Block), der durch einen Antagonisten (Pin) mit Normalkraft belastet wird. In den meisten Fällen ist der Pin die abradierende Komponente und der Block, der abradert wird, die Komponente, deren Verschleiß primär interessiert. Bei Simulationen mit Schleifpapier dagegen ist der Pin der Prüfkörper (Harrison 1975, 1976, 1977; Draughn 1978; Harrison 1985). Es können sowohl Gleitbewegungen als auch Impulsbelastungen simuliert werden. Im einfachsten Fall bewegen sich Probe und Pin gegeneinander bidirektional, unter ständigem Kontakt (Powell 1975). Eine andere Möglichkeit ist eine unidirektionale, repetitive Belastung im Sinne eines immer neuen Kontaktes zwischen Probe und Antagonisten (DeLong 1983, Krejci 1990 a). Zusätzlich kann ein Aufsetzimpuls überlagert (Krejci 1990 a) oder der Kraftverlauf variiert werden (DeLong 1983). Untersuchungen haben ergeben, daß durch reine Impulsbelastung (21 MPa, 250 000 Zyklen) bei Amalgam und Komposit kein meßbarer Substanzverlust festgestellt werden konnte (Powell 1975).

Grundparameter des Pin-on-block-Aufbaus sind Last pro Fläche, Relativgeschwindigkeit, Relativbewegung zwischen Pin und Block (uni- oder bidirektionale Bewegung), Prüfumgebung (Wasser, Luft), Anzahl der Zyklen und Testdauer. Der Bewegungsmodus ist in sofern von Bedeutung, als Powers (1973 c)

durch Scratch-Tests nachweisen konnte, daß die Oberflächenschädigung bei bidirektionaler Belastung stärker ist als bei unidirektionaler Belastung.

Weitere mögliche Parameter sind Vorbehandlungen, z.B. durch organische Lösungen (Krejci 1990 b), Thermowechselast (Roulet 1987) und eventuell verwendete Zwischenmedien (Leinfelder 1989).

Die Auswertung der Ergebnisse geschieht entweder durch Auswertung der Proben selbst (Harrison 1975, 1976, 1977; Draughn 1978; Harrison 1985; Jagger 1994), oder indem Repliken angefertigt und ausgewertet werden (Roulet 1987). Gemessen wird der Verschleiß, also das verlorene Volumen über die Zeit.

Es gibt mehrere Möglichkeiten der quantitativen Verschleißmessung. Anwendung findet das Mikrometer, d.h. eine Feinmeßschraube zur Längenmessung (Harrison 1975, 1976, 1977, Draughn 1978, Harrison 1985). Ebenso kann der Verschleiß dreidimensional mit einem Perthometer ermittelt werden (Pelka 1996, Kunzelmann 1998). Vielfach schließt sich eine morphologische Untersuchung der Verschleißoberfläche mit Aufnahmen im Rasterelektronenmikroskop an (Powell 1975, Lutz 1984, Roulet 1987). Zum Teil werden die Daten und Aufnahmen mit klinischen Studien verglichen (DeLong 1985, Sakaguchi 1986, Krejci 1990 c).

Eine besondere Vielfalt zeigt sich bei der Wahl des Antagonistenmaterials. Häufig werden Schmelzantagonisten verwendet, mit der Begründung, daß in einer klinischen Studie überwiegend Schmelz als Antagonist beobachtet wurde (Phillips 1971). Dabei werden die extrahierten Molaren und Prämolaren auf unterschiedliche Art bearbeitet (Powell 1975, DeLong 1985, Sakaguchi 1986, Pintado 1990, Krejci 1990 d, 1992 b, Kunzelmann 1998). Da die biologische Variationsbreite des Schmelzes die Testergebnisse beeinflußt, werden Alternativen gesucht. Verwendet werden Steatitkugeln (Pelka 1996, Kunzelmann 1998). Es kommen Stahlantagonisten in Form von Kugeln und Kegeln mit einem Spitzenradius von 2 mm zum Einsatz (DeLong 1983, Roulet 1987, Leinfelder 1989). Gesintertes

Aluminiumoxid ist ein adäquater Ersatz für Schmelz. Untersuchungen mit einem Pin-on-Block- (Kunzelmann 1998, Scheufele 2000) und mit einem Pin-on-disk-Aufbau (Rice 1984 a) haben das bestätigt.

Scheufele (2000) belegt, dass die Variationsbreite der Ergebnisse bei der Verwendung von Schmelz-Antagonisten rund drei Mal höher ist als die von Degussit-Gegenkörpern.

Als Antagonistenform empfiehlt Wassel (1994) für den Zwei-Medien-Verschleiß die Verwendung von kugelförmigen Antagonisten. Zylinderförmige Antagonisten können durch Graben und Schneiden den Materialabtrag erheblich erhöhen.

Zudem ist es nur schwer möglich, die plane Oberfläche des Antagonisten und die Probenoberfläche parallel auszurichten (Powell 1975).

Bei der Verwendung von Kugeln ist zu bedenken, daß mit dem Einsinken der Kugel im Verlauf des Verschleißprozesses die Flächenpressung abnimmt.

2.5 Einteilung der Komposite

Eine kurze Übersicht über die allgemeine Einteilung dentaler Komposite in der Literatur erscheint sinnvoll, da die Einteilung in Füllstoffklassen als Grundlage für die Aufstellung von Hypothesen und die Diskussion der Versuchsergebnisse dient.

Der Begriff Komposit ist von dem lateinischen Wort „compositum“ (Zusammengesetztes) abgeleitet. Das Komposit stellt also mindestens eine Kombination von zwei unterschiedlichen Komponenten dar (Eichner 1985, Dorsch 1990). Die Hauptbestandteile sind die organische Matrix, die Füllkörper und die Silane als Verbundphase zwischen den anorganischen Füllkörpern und der organischen Matrix. Neben diesen beiden Hauptbestandteilen enthalten Komposite auch Initiatoren, Stabilisatoren, Farbstoffe und Pigmente (Dorsch 1990).

Die Klassifikation der Kompositmaterialien basiert üblicherweise auf Art und Größe der verwendeten Füllkörper (Lutz 1983, Hellwig 1995). Man unterscheidet dementsprechend zwischen konventionellen Kompositen, die Makrofüller enthalten, Mikrofüllern und Hybridkompositen.

Konventionelle Komposite besitzen Makrofüller mit einer Korngröße zwischen 0,1-100 μm . Die rein anorganischen, splitterförmigen Partikel sind Quarz, Glas oder Keramik. Moderne konventionelle Komposite enthalten vermehrt rundliche, weichere Partikel.

Bei Mikrofüllerkompositen liegt die Partikelgröße unter 0,1 μm . Gebräuchliche Mikrofüller enthalten hochdisperse Kieselsäuren (Siliziumdioxid), mit einer Größenverteilung zwischen 0,007 und 0,04 μm . Die Einzelpartikel sind meist kugelförmig. Die Mikrofüller haben eine große Oberfläche, und erhöhen bei Zugabe in eine organische Matrix die Viskosität sehr rasch. Um trotzdem einen maximalen Füllstoffgehalt zu erreichen, ohne daß das Material für die Verarbeitung zu hart wird, wurden inhomogene Mikrofüllerkomposite entwickelt.

Um inhomogene Mikrofüller herzustellen, werden Mikrofüllerkomposite zermahlen. Das Produkt sind sogenannte splitterförmige Vor- oder Präpolymerisate (Hellwig 1995). Eine andere Möglichkeit ist die Inkorporation von Siliziumdioxid in unvollständig ausgehärtete Polymerkugeln. Die Teilchengröße der kugelförmigen Vorpolymerisate liegt zwischen 10 und 30 μm . Zusammen mit weiteren Mikrofüllern werden sie der Matrix zugesetzt. Ebenso kommen agglomerierte Mikrofüllerkomplexe zum Einsatz. Diese bestehen aus künstlich agglomeriertem, pyrogenem Siliziumdioxid, mit einer Teilchengröße von 1 bis 25 μm . Im Gegensatz zu den bereits beschriebenen sind sie praktisch rein anorganischer Natur (Lutz 1983).

Hybridkomposite stellen eine Kombination aus Makrofüllern und Mikrofüllern dar, wobei der Anteil der Makrofüller 10-15 Gewichtsprozent beträgt. Die sogenannten Feinstpartikelhybridkomposite besitzen Makrofüller mit einem Durchmesser kleiner 2 μm .

Die Deutsche Gesellschaft für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde (DGZMK) zählt zu den Kompositen auch die Kompomere. Kompomere sind polyacrylsäuremodifizierte Kunststoffe (Hickel 1997).

3 Material und Methode

3.1 Prüfkörper

3.1.1 Verwendete Füllungsmaterialien

Getestet wurden 19 kommerziell aktuell verfügbare, lichthärtende Komposite. Von jedem in Tabelle 3.1 beschriebenen Material wurden je acht Prüfkörper angefertigt.

Die Materialien aus fünf Füllstoffklassen wurden zur Auswertung in vier Gruppen zusammengefaßt. Dabei handelt es sich um die Gruppen der Mikrofüller, der Hybrid- und Feinstpartikelhybridkomposite, der Kompomere und eine weitere Gruppe, die aus drei Feinstpartikelhybridkompositen besteht. Hierzu zählen zwei Materialien mit hohem Mikrofülleranteil und eines mit porösen Füllkörpern.

Füllungsmaterial	Batchnummer	Hersteller	Füllstoffklasse	Füllstofftyp	Partikelgrößen (durchschnittliche Partikelgröße)	Füllergehalt
Durafill VS	Ch. B.: 47	Heraeus Kulzer, D-61273 Wehrheim	Mikrofüllerkomposit (heterogen)	Siliziumdioxid, splitterförmiges Präpolymerisat	0,01-0,04 µm (0,04 µm), (30 µm)	~60 % (Gew.) ~50 % (Vol.)
Estilux Hybrid	Ch. B.: 29	Heraeus Kulzer, D-61273 Wehrheim	Hybridkomposit (grob)	Ba-Al-Si-Glas, Li-Al-Si-Glaskeramik, hochdisperses Siliziumdioxid	0,04-5,2 µm, 0,04-5,2 µm, 0,01-0,04 µm	84 % (Gew.) 68 % (Vol.)
TPH-Spectrum	Ch. B.: 9607182	Dentsply DeTrey, D-78467 Konstanz	Feinstpartikelhybrid- komposit	Ba-Al-B-Si-Glas, hochdisperses Siliziumdioxid	max. 5 µm (1 µm), 0,01-0,04 µm	77 % (Gew.) 57 % (Vol.)
Pertac II	Ch. B.: 002	ESPE, D-82229 Seefeld	Feinstpartikelhybrid- komposit (Quarzfüllkörper)	ultrafein gemahlener Quarz, hoch disperses Siliziumdioxid, Yttriumfluorid	max. 1,8 µm (0,9 µm)	80 % (Gew.)
Heliomolar RO	Ch. B.: 823373	Vivadent, Schaan/Lichtenstein	Mikrofüllerkomposit (heterogen)	hochdisperses Siliziumdioxid, Kopolymer, Ytterbiumtrifluorid	0,04-0,2 µm (0,04 µm), 0,04-0,2 µm (15 µm), 0,04-0,2 µm (0,24 µm)	76,5 % (Gew.) 64 % (Vol.)
Z 100	Ch. B.: 19950224	3 M Medica, D-46322 Borken	Feinstpartikelhybrid- komposit	synthetisches Mineral aus Zirkonium/Silizium	0,01-3,5 µm (0,6 µm)	84,5 % (Gew.) 66 % (Vol.)
Tetric*	Ch. B.: 825971	Vivadent, Schaan/Lichtenstein	Feinstpartikelhybrid- komposit	Ba-Glas, Ytterbiumtrifluorid, Mischoxid, hochdisperses Siliziumdioxid	0,04-3,0 µm (1,5µm), 0,04-3,0 µm (0,24 µm), 0,04-3,0 µm (0,20 µm), 0,04-3,0 µm (0,04 m)	79,5 % Gew. 61 % (Vol.)

* heißt heute Tetric Classic

Tab. 3.1: Übersicht über die in der Kausimulatorstudie verwendeten Materialien. Alle Daten entsprechen den Herstellerangaben.

Füllungsmaterial	Batchnummer	Hersteller	Füllstoffklasse	Füllstofftyp	Partikelgrößen (durchschnittliche Partikelgröße)	Füllergehalt
Degufill ultra	Ch. B.: 1016	Degussa, D-63403 Hanau	Feinstpartikelhybrid- komposit	Ba-Al-B-Si-Glas, pyrogene Kieselsäure (Agglomerate)	0,01-3,5 µm (1 µm)	78 % (Gew.)
Arabesk	Ch. B.: 70500	Voco, D-27457 Cuxhaven	Feinstpartikelhybrid- komposit	Ba-Al-Si-Glas, Li-Al-Si-Glaskeramik, feinstteiliges Siliziumdioxid	D ₉₀ 2,0 µm (1,0 µm)	76,5 % (Gew.) 59,0 % (Vol.)
Artglass	Ch. B.: 103	Heraeus Kulzer, D-61273 Wehrheim	Feinstpartikelhybrid- komposit (mit hohem Mikrofülleranteil)	Ba-Al-B-Si-Glas (55 %), spezielles Siliziumdioxid (14 %) (kein pyrogenes)	D ₅₀ 0,7 µm, D ₉₉ 2,0 µm, D ₅₀ 4 µm, D ₉₉ 10 µm	~69 % (Gew.) ~54 % (Vol.)
Charisma F	Ch. B.: 27	Heraeus Kulzer, D-61273 Wehrheim	Feinstpartikelhybrid- komposit	Ba-Al-B-F-Si-Glas (70 %), pyrogenes Siliziumdioxid (5 %)	D ₅₀ 0,7 µm, D ₉₉ 2,0 µm, D ₉₉ 0,01-0,04 µm	~75 % (Gew.) ~62 % (Vol.)
Pertac Hybrid	Ch. B.: 120	ESPE, D-82229 Seefeld	Feinstpartikelhybrid- komposit	fein gemahlener Quarz, disperses Siliziumdioxid, Yttriumfluorid	max. 4 µm (1,5 µm)	80,0 % (Gew.)
Compoglass	Ch. B.: 800065	Vivadent, Schaan/Lichtenstein	Kompomer	Ba-Al-F-Si-Glas, Ytterbiumfluorid, Mischoxide	0,2-3,0 µm (1 µm), 0,2-3,0 µm (0,24 µm), 0,2-3,0 µm (0,20 µm)	79 % (Gew.) 55 % (Vol.)

Tab. 3.1 (Fortsetzung): Übersicht über die in der Kausimulatorstudie verwendeten Materialien. Alle Daten entsprechen den Herstellerangaben.

Füllungsmaterial	Batchnummer	Hersteller	Füllstoffklasse	Füllstofftyp	Partikelgrößen (durchschnittliche Partikelgröße)	Füllergehalt
Compoglass F	Ch. B.: 905702	Vivadent, Schaan/Lichtenstein	Kompomer	Ba-Al-F-Si-Glas, Ytterbiumtrifluorid, Mischoxid	0,2-1,6 µm (1 µm), 0,2-1,6 µm (0,24 µm), 0,2-1,6 µm (0,20 µm)	77 % (Gew.) 55 % (Vol.)
Dyract AP	Ch. B.: 9706000779	Dentsply De Trey, D-78467 Konstanz	Kompomer	Si-Al-Na-F-P-Si-Glas, Strontiumfluorid	D10 0,35 µm, D90 1,5 µm (0,8 µm)	75 % (Gew.) 50 % (Vol.)
Hytac	Ch. B.: 25	ESPE, D-82229 Seefeld	Kompomer	Ca-Al-F-Si-Glas, disperses Siliziumdioxid, Yttriumfluorid	max. 19µm (10µm)	85 % (Gew.)
Charisma	Ch. B.: 044	Heraeus Kulzer, D-61273 Wehrheim	Feinstpartikelhybrid- komposit	Ba-Al-B-Si-Glas (67 %), pyrogenes Siliziumdioxid (5 %)	D50 0,7 µm, D99 2,0 µm, D99 0,01-0,04 µm	~72 % (Gew.) ~60 % (Vol.)
Solitaire	Ch. B.: 22	Heraeus Kulzer, D-61273 Wehrheim	Feinstpartikelhybrid- komposit (mit porösen Füllkörpern)	Ba-Al-B-F-Si-Glas (26 %), hoch poröses Siliziumdioxid (30 %), Al-F-Si-Glas (5 %), Fluorid-Salz (5 %)	D50 0,7 µm, D99 2,0 µm, D50 8,0 µm, D99 22,0 µm, D50 0,8 µm, D99 2,0 µm, D99 < 1,0 µm	~66 % (Gew.) ~90 % (Vol.)
Metafill CX	Ch. B.: 70301	Sun medical, Japan	Mikrofüllerkomposit (nur organische Füllkörper)	Präpolymerisat aus organischen Füllkörpern	1-100 µm (20 µm)	66 % (Gew.) 54 % (Vol.)

Tab. 3.1 (Fortsetzung): Übersicht über die in der Kausimulaturstudie verwendeten Materialien. Alle Daten entsprechen den Herstellerangaben.

3.1.2 Prüfkörperherstellung

Zur Prüfkörperherstellung wurden Aluminiumprobenträger (Müller, Schwarzenbruck) mit einem Durchmesser von 7,5 mm Durchmesser und 2 mm Tiefe verwendet (Abb. 3.1). Diese wurden an ihren Innenflächen zur besseren Haftung der Komposite silikatisiert (Rocatector, ESPE, Seefeld) und anschließend silanisiert (ESPE-Sil, ESPE, Seefeld).

Die pastenartigen Füllungsmaterialien wurden in einer Schicht in die vorbereiteten Träger appliziert. Zur Vermeidung einer Sauerstoffinhibitionsschicht wurden sie mit Frasco Universal-Streifen extra-dünn (Sachs, Tettngang) abgedeckt und 180 Sekunden im Lichtpolymerisationsgerät (Dentacolor-XS-Lichtgerät, Heraeus Kulzer, Wehrheim) ausgehärtet. Die Oberflächen der Prüfkörper wurden maschinell (LD 40, LECO, St. Joseph/USA) unter fließendem Wasser mit SiC-Schleifpapierscheiben (LECO, St. Joseph/USA) der Körnung P1000 plan geschliffen. Die Aluminiumprobenträger wurden mit einem Rosenbohrer gekennzeichnet.

Nach Abspülen unter Leitungswasser wurden die Proben in Ringer-Lösung in einem geschlossenen Kunststoffbehälter für 24 Stunden bei 37°C im Wasserbad (HaakeW15, Haake DC1, Karlsruhe) gelagert.

Zur Definition des Scanbereiches wurde jeder Prüfkörper nach 6000 Zyklen, vor der ersten Abformung zur Herstellung von Repliken, mit einer Markierung versehen. Die Vertiefung wurde 1 mm neben der Verschleißspur angebracht (Abb. 3.7).

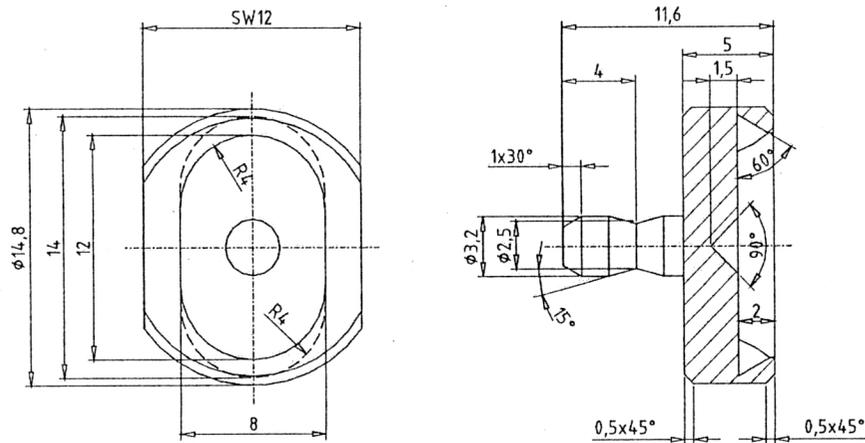


Abb. 3.1: Grafische Darstellung eines Aluminiumprobenträgers

3.1.3 Antagonistenherstellung

Die Antagonistenträger (Abb. 3.2) aus Aluminium mit einem Durchmesser von 6 mm (Müller, Schwarzenbruck) wurden in der gleichen Weise wie die Probenträger silikatisiert und silanisiert.

Da eine Standardisierung von Schmelzantagonisten nicht möglich ist, dienten Degussit-Kugeln aus hochverdichteter Aluminiumoxid-Keramik (Mahlkörper Degussit AL 23, FRIATEC, Mannheim) mit einem Durchmesser von 5 mm als Antagonisten. Mit selbst- und lichthärtendem Zwei-Komponenten-Komposit (Twinlock cement, Heraeus Kulzer, Wehrheim) wurden die Kugeln in der Mitte des Antagonistenhalters positioniert und zur Endpolymerisation auf einem Kunststoffträger für 180 Sekunden in ein Lichtpolymerisationsgerät (Dentacolor-XS-Lichtgerät, Heraeus Kulzer, Wehrheim) eingebracht. Sie wurden ebenfalls mit einem Rosenbohrer gekennzeichnet.

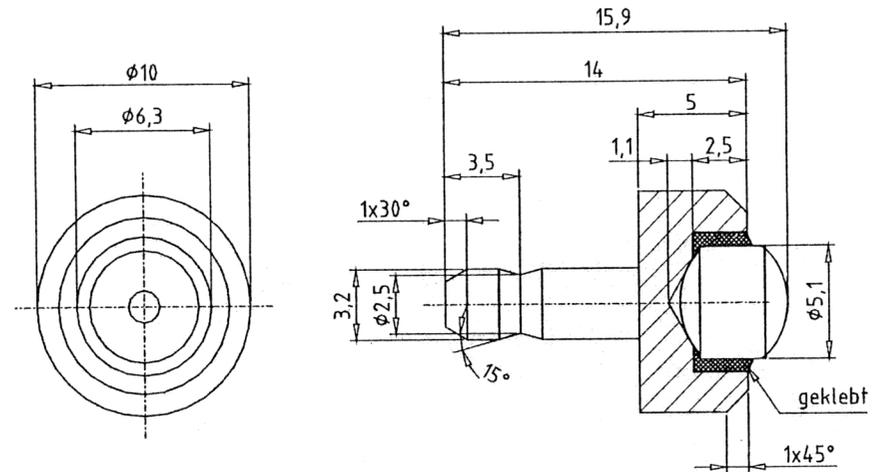


Abb. 3.2: Schnitt durch den Antagonisten nach der Endpolymerisation

3.2 Versuchsaufbau

3.2.1 Kausimulator

Für die Verschleißsimulation wurde der an der Poliklinik für Zahnerhaltung und Parodontologie der Ludwig-Maximilians-Universität in München entwickelte, computergesteuerte Kausimulator „München“ (Festo, Denkendorf) verwendet (Abb. 3.3).

Der Kausimulator gliedert sich in die vier Funktionsgruppen Mechanik, Pneumatik, Thermoregelung und Systemsteuerung.

Die Funktionsgruppe Mechanik enthält acht Prüfstände, die in einem zusammengesetzten Stahlrahmen mit Querverstrebungen montiert sind. Jeder

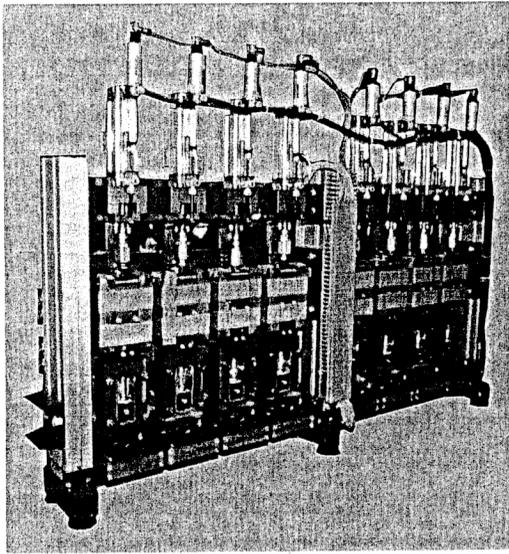


Abb. 3.3: Gesamtansicht des Kausimulators München

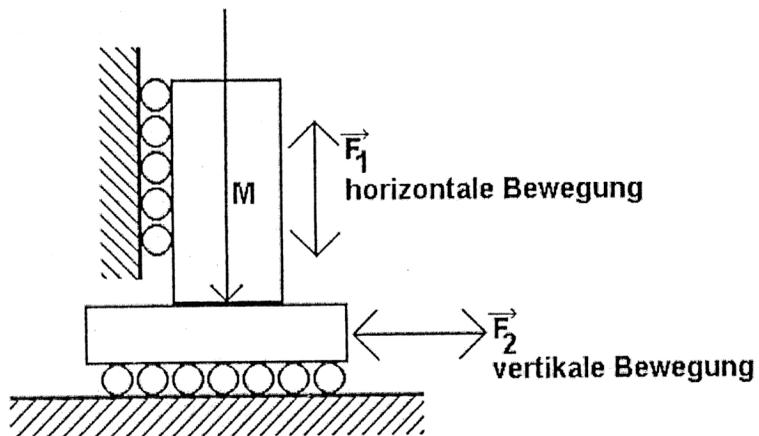


Abb. 3.4: Bewegungsmöglichkeiten des Kausimulators

Prüfstand besteht aus einer Stahlkammer mit Zu- und Abflußbohrungen für den Wasserkreislauf und wird durch eine durchsichtige, abschraubbare Plexiglasplatte verschlossen. Im Innern der Kammer ist der Prüfkörper mit einer Imbusschraube auf einem herauschraubbaren, würfelförmigen Sockel aus Stahl befestigt (Abb. 3.5). Die Befestigung der einzelnen würfelförmigen Probenhalter auf den horizontalen Verschiebetischen ermöglicht eine aktive Bewegung des Grundkörpers (Abb. 3.4)

Jeder Prüfstand hat einen Führungsstab für den Antagonisten, der sich vertikal bewegen läßt. Der Antagonist ist am Führungsstab mit einer Imbusschraube befestigt. An den Führungsstäben sind Messinggewichte befestigt, um das Auflagegewicht der Antagonisten auf die Prüfkörper einzustellen. Die Achsen der Antagonisten werden durch Öffnungen auf den Oberseiten der Probenkammern geführt.

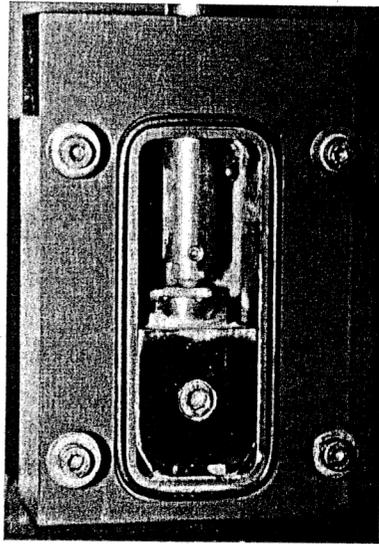


Abb. 3.5: Ansicht einer einzelnen Kammer

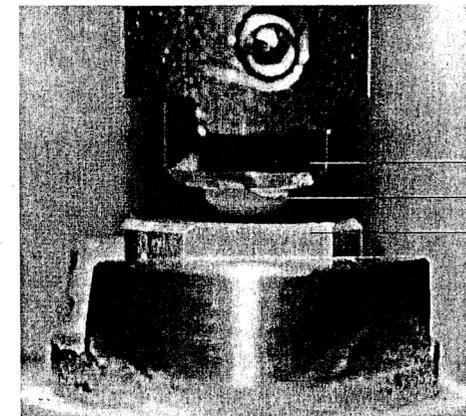
Der Antrieb der horizontalen Verschiebeeinheit erfolgt über Druckluft. Die Pneumatikzylinder, von denen die Verschiebetische bewegt werden, sind an der Rückseite des Kausimulators angebracht und werden durch die Systemsteuerung geregelt.

Um das Wasser für die Kammerspülung auf konstanter Temperatur zu halten, wird ein Wasserbad mit Temperaturregler (Haake SK 92, Haake Fisons N3, Karlsruhe) verwendet. Der Zufluß zu den Kammern wird mit einer Pumpe und einem mechanischen Drosselregler reguliert. Von der Pumpe erzeugter Unterdruck entwässert die Kammern. Die Probenträger und die Antagonisten können mit dem Wasserstrahl ständig gespült werden. Von einem Filter (Sartopure PP Capsule, Sartorius, Göttingen) mit einer Abscheiderate von $3\ \mu\text{m}$ werden Verschleißpartikel aus dem Kreislauf entfernt.

Die programmierbare Steuereinheit (FPC 405, Festo, Denkendorf) des Kausimulators ist in einem Schaltschrank mit Bedienpult untergebracht. Über das Anzeige- und Bedienpult (Typ PCS 600) wird die Steuerung programmiert.

3.3 Versuchsdurchführung

Die Versuche wurden nach dem Pin-on-block-Design (Abb. 3.5) durchgeführt. Dabei stellt der Antagonistenhalter mit der eingeklebten Degussit-Kugel den „pin“, der Probenhalter mit dem darin eingebrachten Füllungsmaterial den „block“ dar. Die horizontale Bewegung hatte eine Amplitude von 8 mm und der Prüfkörper oszillierte unter ständigem Kontakt zum Antagonisten. Die vertikale Last betrug 50 N. Jede Probe wurde über 50 000 Zyklen geprüft, was 100 000 mechanischen Belastungen mit alternierender Lastrichtung entspricht. Die Dauer des Zyklus (eine Hin- und Herbewegung) war auf 1 s eingestellt. Die acht Kammern wurden während der Versuche mit destilliertem Wasser (37°C) gespült.



Antagonistenhalter mit 50 N vertikaler, konstanter Last
Degussitantagonist
Probenhalter, horizontal bewegt

Abb. 3.6: Pin-on-block-Design: Antagonistenhalter mit Degussitantagonist und Probenhalter

Um Unterschiede auszuschalten, die durch Reibungsunterschiede in den Lagern hervorgerufen werden können, wurde als Versuchsschema das Lateinische Quadrat (Tab. 3.2) gewählt, d.h. jedes Material wurde in jeder Prüfkammer getestet.

Kammer	1	2	3	4	5	6	7	8
Lauf 1	Material 1	Material 2	Material 3	Material 4	Material 5	Material 6	Material 7	Material 8
Lauf 2	Material 2	Material 3	Material 4	Material 5	Material 6	Material 7	Material 8	Material 1
Lauf 3	Material 3	Material 4	Material 5	Material 6	Material 7	Material 8	Material 1	Material 2
Lauf 4	Material 4	Material 5	Material 6	Material 7	Material 8	Material 1	Material 2	Material 3
Lauf 5	Material 5	Material 6	Material 7	Material 8	Material 1	Material 2	Material 3	Material 4
Lauf 6	Material 6	Material 7	Material 8	Material 1	Material 2	Material 3	Material 4	Material 5
Lauf 7	Material 7	Material 8	Material 1	Material 2	Material 3	Material 4	Material 5	Material 6
Lauf 8	Material 8	Material 1	Material 2	Material 3	Material 4	Material 5	Material 6	Material 7

Tab. 3.2: Versuchsschema Lateinisches Quadrat

Zur Auswertung und um den zeitlichen Verlauf des Verschleißes zu erfassen, wurden jeweils nach 6000, 10 000, 30 000 und 50 000 Zyklen Repliken der Proben hergestellt. Die Herstellung der Repliken erfolgte mit den Präzisionsabformmassen Permadyne Penta (ESPE, Seefeld) und Permadyne Garant (ESPE, Seefeld) in Doppelmischtechnik. Für die Abformung wurden speziell für die Prüfkörper angefertigte Halterungen (Abb. 3.7) und Abformlöffel aus Messing verwendet.

Die Abformungen wurden entsprechend den Herstellerangaben mindestens eine Stunde gelagert und anschließend mit weißem Superhartgips (New Fuji Rock, G.C. Belgium N.V.) ausgegossen. Dazu wurden 350g Gips mit 70ml destilliertem Wasser im Vakuumanrührgerät (Multivac 4 Degussa, Hanau) angemischt. Jeder Versuchslauf war innerhalb von 24 Stunden abgeschlossen.

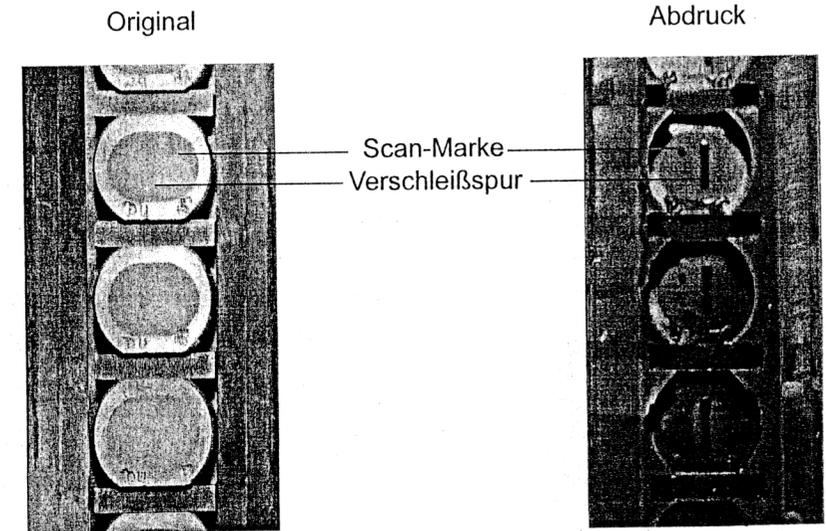


Abb. 3.7: Detailsicht von Messinghalterung mit Prüfkörpern und Abformung

3.4 Auswertung

3.4.1 Quantitative Abriebsmessung

Die Verschleißspur war bei allen Proben mit bloßem Auge zu erkennen. Die Prüfkörperrepliken wurden in der Mitte der 8 mm langen Spur auf einer Länge von 2 mm, beginnend bei der Markierung mit dem Laserscanner (LaserScan 3D, Willytec, München) abgetastet. Die Breite des Abtastfensters war mit 5,6 mm wesentlich größer als die Verschleißspur.

Zur Berechnung der abgetasteten Werte diente die an der Poliklinik für Zahnerhaltung und Parodontologie entwickelte Software „Match 3D“. Das Verschleißvolumen wird berechnet, indem über die planen Randareale mathematisch

eine Ebene gelegt wird. Unter Einbeziehung von allen Meßpunkten wird nach einer Least-square-Methode eine weitere Ebene berechnet, die den minimalen Abstand zu allen Einzelmeßpunkten besitzt. Die beiden Ebenen und die Seiten der Verschleißspur beschreiben einen 2 mm langen Quader, dessen Volumen dem Verschleißvolumen entspricht (Abb. 3.8).

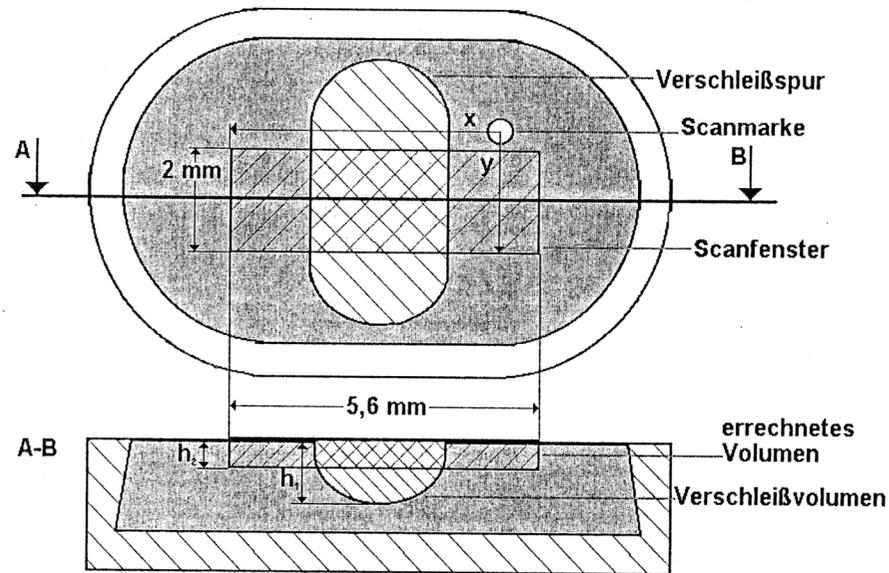


Abb. 3.8: Skizze der quantitativen Abriebsmessung (x und y: Koordinaten für die stets gleiche Lage des Scanfensters,
 h_1 : gescannter Höhenverlust,
 h_2 : errechneter Höhenverlust)

3.4.2 Morphologische Verschleißanalyse

Nach Abschluß der Verschleißsimulation im Kausimulator wurde von allen Materialien je ein Prüfkörper zufällig ausgewählt. Dieser wurde im Sputter Coater (SEM Coating System, Polaron Equipment, Watford, Hertfordshire, England) mit

300 nm Gold bedampft und unter dem Rasterelektronenmikroskop (Typ JSM-35CF, JOEL, Tokio, Japan) bei 480-, 1000-, 4000- und 10 000-facher Vergrößerung bei einer Spannung 15 kV fotografiert. Der Verschleißbereich war bei allen Proben scharf begrenzt. Damit war sichergestellt, daß Aufnahmen nur in der Verschleißspur angefertigt wurden.

3.4.3 Auswertung der Antagonisten

Die Kontaktfläche der Degussit-Antagonisten wurde mit der Software UTHSCA image tool for windows V 2.0 unter dem Lichtmikroskop (Stemi SV 11, Zeiss, Jena) beobachtet. Wenn eine klare Begrenzung des Kontaktes zu erkennen war, wurde die Fläche vermessen.

3.4.4 Statistische Auswertung und grafische Darstellung

Die statistische Auswertung und grafische Darstellung aller Daten erfolgte mit dem Programm SPSS/PC 8.0.

Um eine bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse dieser Arbeit zu gewährleisten, wurden die gemessenen Verschleißvolumina in einen Höhenverlust umgerechnet.

$$\text{Höhenverlust } (\mu\text{m}) = \frac{\text{Verschleißvolumen } (\mu\text{m}^3)}{\text{Scanbereich } (\mu\text{m}^2)}$$

Es wurden Mittelwerte, Standardabweichungen und Variationskoeffizienten für den Verschleiß aller Materialien und die Verschleißflächen aller ausgewerteten Antagonisten berechnet.

Für die grafische Darstellung wurden Verschleißkurven und Boxplots gewählt. Unterschiede zwischen einzelnen Materialien wurden auf ihre Signifikanz überprüft. Dafür wurde eine Varianzanalyse nach Levene durchgeführt. Bei vorliegender Varianzhomogenität, wurde die Signifikanz mit dem T-Test für unabhängige Stichproben überprüft. Andernfalls kam der Mann-Whitney-U-Test zum Einsatz.

Der Korrelationskoeffizient für den Materialverschleiß und die Verschleißfläche der Antagonisten wurde mit der Methode nach Spearman bestimmt.

4 Ergebnisse

Die Auswertung der Ergebnisse erfolgte mit der Software SPSS/PC 8.0 (siehe 3.4.4). Die Ergebnisse werden entsprechend den Füllkörperklassen zusammengefaßt. Zwei Feinstpartikelhybridkomposite mit besonderen Zusammensetzungen werden separat besprochen. Im Anschluß daran werden die Ergebnisse aller getesteten Füllungsmaterialien gegenübergestellt.

Da es sich bei dem Versuchsaufbau um ein geschlossenes tribologisches System handelt, werden auch die Antagonisten in die Auswertung mit einbezogen.

Die Mittelwerte, Standardabweichungen und Variationskoeffizienten der Verschleißbestimmung nach 6000, 10 000, 30 000 und 50 000 Zyklen sind in Tabelle 4.1 zusammengefaßt.

In Bezug auf die Grafiken wurde sich für die Darstellung des Verschleißes im zeitlichen Verlauf entschieden, um den initial erhöhten Verschleiß der einzelnen Materialien zu vergleichen und die Linearisierung des Verschleißvorgangs untersuchen zu können.

Der Höhenverlust geht sowohl aus der Darstellung des Verschleißes im zeitlichen Verlauf als auch aus den Boxplots hervor.

Boxplots sind im Vergleich zu den Verschleißkurven der genauere Ansatz, denn tatsächlich liegen für jede Verschleißkurve nur vier Meßpunkte vor. Die Meßpunkte werden verbunden, ohne daß weitere Messungen für die Bereiche zwischen den Meßpunkten gemacht wurden. Im Boxplot ist zusätzlich die Variationsbreite der Ergebnisse enthalten. Es wird jeweils der größte und kleinste Meßwert angegeben, der Bereich, in dem 50 % der Meßwerte liegen und der Zentralwert (Median). Das Erstellen von Boxplots jeweils nach 50 000 Zyklen soll einen Überblick in Bezug auf die Reihenfolge (das Ranking) der Verschleißfestigkeit geben.

Material	6000			10000			30000			50000		
	μm	SD	VaKo	μm	SD	VaKo	μm	SD	VaKo	μm	SD	VaKo
Hytac	34,55	15,25	0,44	65,79	11,43	0,17	180,10	50,34	0,28	284,95	138,92	0,49
Compoglass	17,96	2,83	0,16	28,66	4,90	0,17	94,40	22,73	0,24	163,00	56,92	0,35
Compoglass F	8,16	1,21	0,15	14,22	1,87	0,13	52,24	4,04	0,08	96,36	6,37	0,07
Dyract AP	9,43	2,10	0,22	15,52	3,33	0,21	52,34	6,86	0,13	83,04	11,96	0,14
Estilux-Hybrid	18,41	2,88	0,16	23,23	3,79	0,16	42,40	6,61	0,16	56,31	9,30	0,17
Pertac II	7,91	3,53	0,45	13,19	2,22	0,17	27,43	4,07	0,15	31,35	4,39	0,14
Tetric	1,74	0,41	0,23	3,35	0,45	0,13	14,31	1,04	0,07	26,01	1,69	0,06
Z100	3,16	0,73	0,23	4,86	0,20	0,04	14,41	0,74	0,05	21,64	1,96	0,09
TPH-Spectrum	2,70	0,55	0,20	4,27	0,85	0,20	12,36	1,96	0,16	20,34	2,25	0,11
Degufill Ultra	1,64	0,23	0,14	2,67	0,48	0,18	8,30	1,03	0,12	14,00	1,45	0,10
Charisma	1,68	0,33	0,20	2,61	0,56	0,21	7,80	1,20	0,15	13,56	1,56	0,12
Pertac Hybrid	2,08	1,98	0,95	2,93	1,92	0,66	8,27	1,79	0,22	13,24	2,19	0,17
Charisma F	1,43	0,21	0,15	2,29	0,33	0,15	7,48	0,94	0,13	13,23	1,19	0,09
Artglass	2,08	0,55	0,26	3,13	0,67	0,21	8,13	1,40	0,17	12,72	2,98	0,23
Arabesk	1,52	0,34	0,22	2,34	0,30	0,13	7,47	0,99	0,13	12,49	2,71	0,22
Solitaire	1,10	0,11	0,10	1,74	0,10	0,06	4,51	0,45	0,10	7,39	0,76	0,10
Heliomolar RO	0,25	0,29	1,16	0,96	0,57	0,59	3,57	0,86	0,24	6,79	1,03	0,15
Metafil CX	1,40	0,45	0,32	2,27	0,58	0,26	4,71	0,60	0,13	6,64	0,76	0,11
Durafill VS	0,60	0,47	0,78	1,02	0,64	0,63	2,50	0,56	0,22	4,02	0,59	0,15

Tab. 4.1: Mittlerer Höhenverlust in μm , Standardabweichung (SD) und Variationskoeffizient (VaKo) jeweils nach 6000, 10 000, 30 000 und 50 000 Zyklen

4.1 Mikrofüllerkomposite

4.1.1 Verschleiß im zeitlichen Verlauf

Anhand der Abbildung 4.1 läßt sich für die Mikrofüllerkomposite nach 10 000 Zyklen ein ähnliches Verschleißverhalten feststellen.

Nach 10 000 Zyklen kann bei Durafill VS ein zeitlich lineares, bei Heliomolar RO und Metafil CX ein annähernd zeitlich lineares Verschleißverhalten festgestellt werden. Die Steigung der Verschleißkurve von Metafil CX nimmt mit der Zyklenzahl leicht ab, die von Heliomolar RO leicht zu (vergleiche Abb. 4.1).

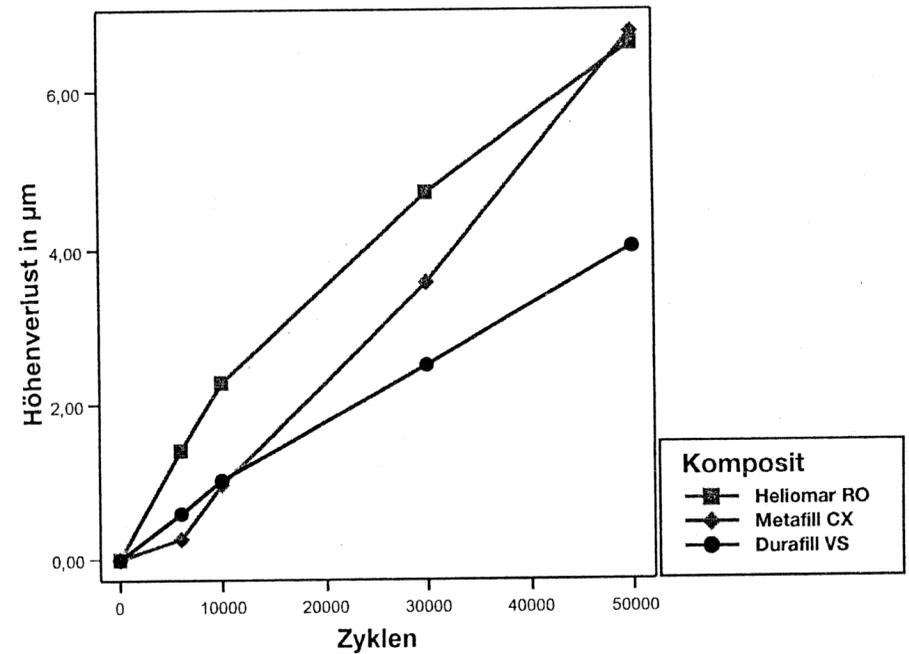


Abb. 4.1: Höhenverluste der Mikrofüllerkomposite im zeitlichen Verlauf

4.1.2 Ranking der Mikrofüllerkomposite in Bezug auf ihre Verschleißfestigkeit

In Abhängigkeit von der Zahl der Belastungszyklen ergibt sich folgendes Ranking in Bezug auf die Verschleißfestigkeit (vergleiche Abb. 4.2):

- Nach 6000 Belastungszyklen: Heliomolar RO > Durafill VS > Metafil CX
 - Nach 10 000 Belastungszyklen: Heliomolar RO > Durafill VS > Metafil CX
 - Nach 30 000 Belastungszyklen: Durafill VS > Heliomolar RO > Metafil CX
 - Nach 50 000 Belastungszyklen: Durafill VS > Metafil CX > Heliomolar RO
- Nach 10 000 Belastungszyklen findet ein Platzwechsel von Heliomolar RO und Durafill VS zugunsten von Durafill VS statt. Nach 30 000 Belastungszyklen findet

ein Platzwechsel von Heliomolar RO und Metafill CX zugunsten von Metafill CX statt.

Durafill VS erweist sich nach anfänglich höherem Volumenverlust als verschleißfester gegenüber Heliomolar RO und Metafill CX. Der Verschleiß von Heliomolar und Metafill CX liegt nach 50 000 Zyklen mehr als 1,5 mal höher, als der von Durafill VS. Dieser Unterschied ist hochsignifikant.

Der Variationskoeffizient aller drei Materialien liegt nach 50 000 Zyklen unter 15 %.

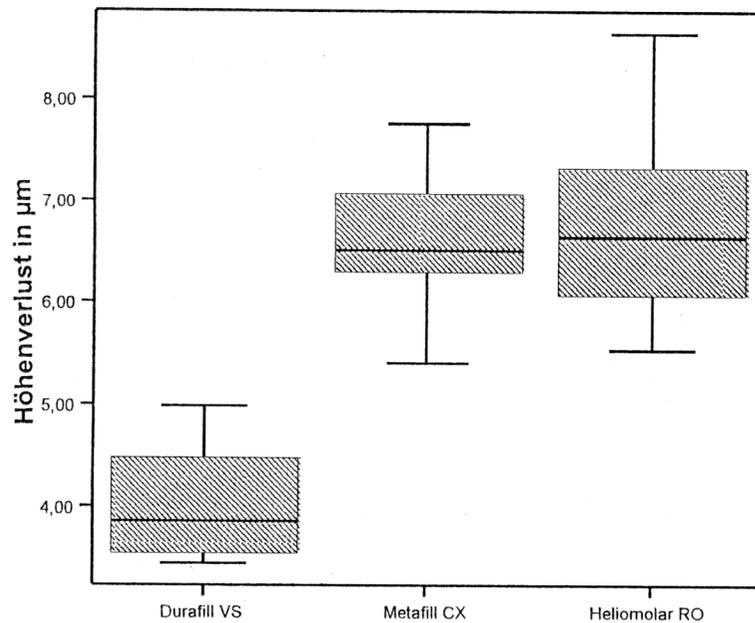


Abb. 4.2: Verschleiß der Mikrofillerkomposite nach 50 000 Zyklen

4.2 Hybrid- und Feinstpartikelhybridkomposite

Bei der Betrachtung der folgenden Verschleißdaten muß bedacht werden, daß Estilux Hybrid ein Hybridkomposit ist, während die anderen Materialien dieser Gruppe Feinstpartikelhybridkomposite sind.

4.2.1 Verschleiß im zeitlichen Verlauf

Bei den Feinstpartikelhybridkompositen können zwei verschiedene Verschleißverhalten festgestellt werden, wobei sich die Füllungsmaterialien Arabesk, Charisma F, Pertac Hybrid, Charisma, Degufill Ultra und TPH-Spectrum ähnlich verhalten. Abbildung 4.3 läßt für die sechs Füllungsmaterialien ein zeitlich lineares Verschleißverhalten erkennen, bei leicht variierendem Höhenverlust. Für Tetric ist die Linearität im zeitlichen Verlauf des Verschleißes erst nach 10 000 Zyklen zu beobachten, wobei es nach 10 000 Zyklen als einziges Material einen Anstieg der Verschleißrate verzeichnet. Kein zeitlich lineares Verschleißverhalten stellt sich bei Z 100, Pertac II und Estilux Hybrid ein. Hier beobachtet man eine mit zunehmender Zyklenzahl abnehmende Verschleißrate.

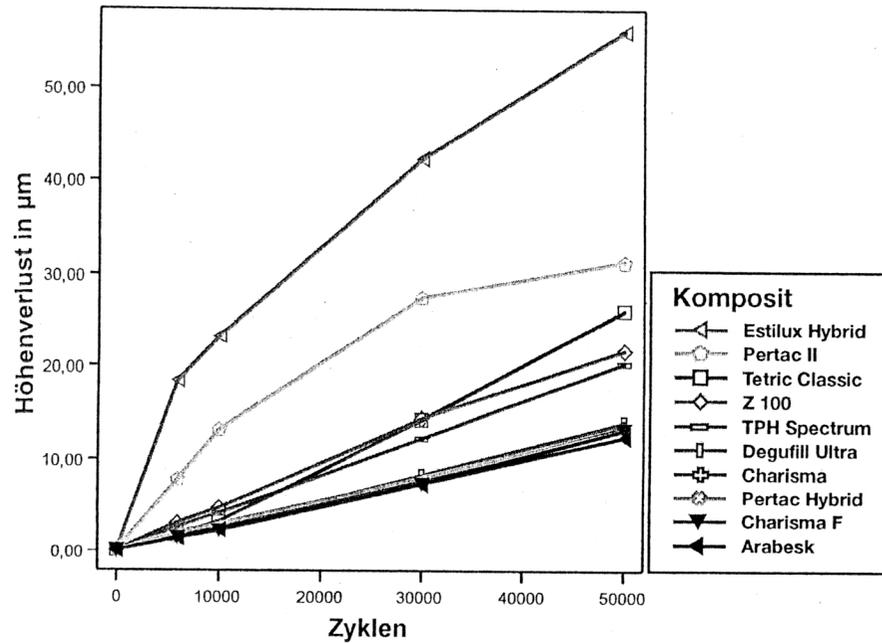


Abb. 4.3: Höhenverluste der Hybrid- und Feinstpartikelhybridkomposite im zeitlichen Verlauf

4.2.2 Ranking der Hybrid- und Feinstpartikelhybridkomposite in Bezug auf ihre Verschleißfestigkeit

In Abhängigkeit von der Zahl der Belastungszyklen ergibt sich folgendes Ranking in Bezug auf die Verschleißfestigkeit (vergleiche Abb. 4.4):

- Nach 6000 Belastungszyklen: Charisma F > Arabesk > Degufill Ultra > Charisma > Tetric > Pertac Hybrid > TPH-Spectrum > Z 100 > Pertac II > Estilux Hybrid
- Nach 10 000 Belastungszyklen: Charisma F > Arabesk > Charisma > Degufill Ultra > Pertac Hybrid > Tetric > TPH-Spectrum > Z 100 > Pertac II > Estilux Hybrid

Nach 10 000 Zyklen findet ein Platzwechsel von Degufill Ultra und Charisma statt, zugunsten von Charisma sowie von Tetric und Pertac Hybrid zugunsten von Pertac Hybrid statt.

c. Nach 30 000 Belastungszyklen: Arabesk > Charisma F > Charisma > Pertac Hybrid > Degufill Ultra > TPH-Spectrum > Tetric > Z 100 > Pertac II > Estilux Hybrid

Nach 30 000 Zyklen findet ein Platzwechsel von Charisma F und Arabesk statt, zugunsten von Arabesk, von Degufill Ultra und Pertac Hybrid zugunsten von Pertac Hybrid, sowie von Tetric und TPH-Spectrum zugunsten von TPH-Spectrum.

d. Nach 50 000 Belastungszyklen: Arabesk > Charisma F > Pertac Hybrid > Charisma > Degufill Ultra > TPH-Spectrum > Z 100 > Tetric > Pertac II > Estilux Hybrid

Nach 50 000 Zyklen findet ein Platzwechsel von Charisma und Pertac Hybrid zugunsten von Pertac Hybrid sowie von Tetric und Z 100 zugunsten von Z 100 statt. Ein Blick in Tabelle 4.1 verdeutlicht, daß die Materialien dieser Gruppe quantitativ betrachtet sehr unterschiedlich verschleifen. Nach 50 000 Zyklen verzeichnen das Hybridkomposit Estilux Hybrid (56,31 µm) und das Feinstpartikelkomposit Pertac II (31,35 µm) ein deutlich erhöhten Verschleiß und Arabesk (12,49 µm) den geringsten.

Der höchste Variationskoeffizient nach 50 000 Zyklen lag in dieser Materialgruppe bei 22 %, der durchschnittliche für diese Materialgruppe betrug 13 %.

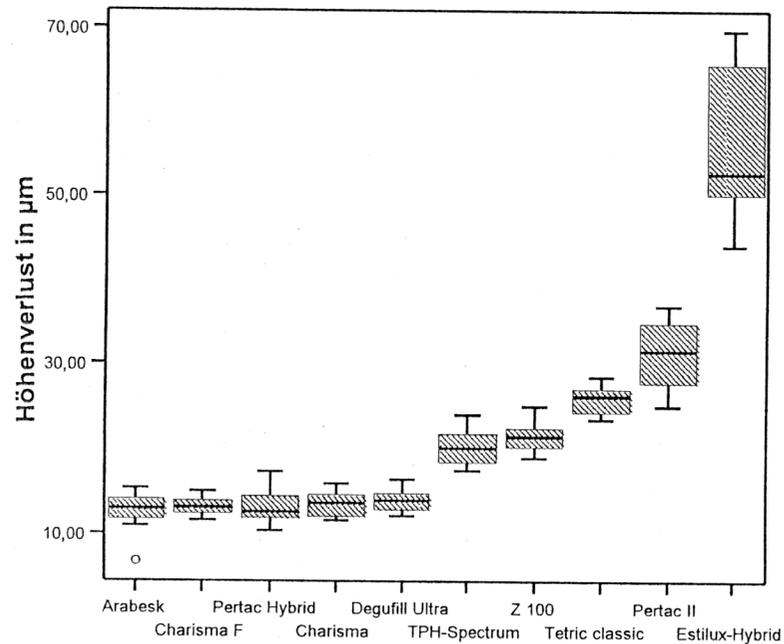


Abb. 4.4: Verschleiß der Hybrid- und Feinstpartikelhybridkomposite nach 50 000 Zyklen

4.3 Kompomere

4.3.1 Verschleiß im zeitlichen Verlauf

Bei allen vier getesteten Kompomeren ist ein ähnliches Verschleißverhalten festzustellen. Abbildung 4.3 läßt für die vier Materialien nach 10 000 Zyklen ein zeitlich annähernd lineares Verschleißverhalten erkennen. Dabei verzeichnen Hytac und Compoglass über die Zeit einen deutlich größeren Höhenverlust als Compoglass F und Dyract AP.

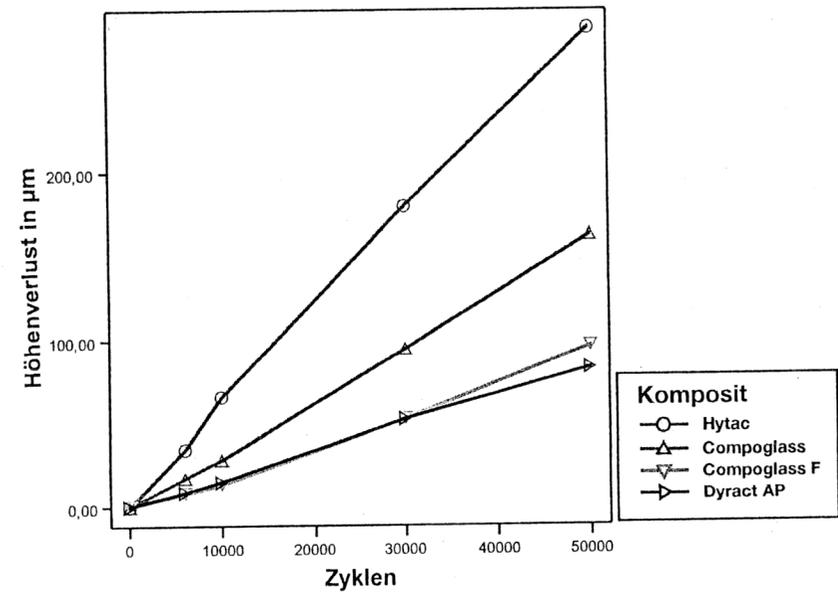


Abb. 4.5: Höhenverluste der Kompomere im zeitlichen Verlauf

4.3.2 Ranking der Kompomere in Bezug auf ihre Verschleißfestigkeit

In Abhängigkeit von der Zahl der Belastungszyklen ergibt sich folgendes Ranking in Bezug auf die Verschleißfestigkeit (vergleiche Abb. 4.6):

- Nach 6000 Belastungszyklen: Compoglass F > Dyract AP > Compoglass > Hytac
- Nach 10 000 Belastungszyklen: Compoglass F > Dyract AP > Compoglass > Hytac
- Nach 30 000 Belastungszyklen: Compoglass F > Dyract AP > Compoglass > Hytac
- Nach 50 000 Belastungszyklen: Dyract AP > Compoglass F > Compoglass > Hytac

In Bezug auf das Ranking findet lediglich ein Platzwechsel von Compoglass F und Dyract AP, zugunsten von Dyract AP nach 30 000 Zyklen, statt.

Beim Vergleich des Gesamthöhenverlustes über 50 000 Zyklen erweisen sich Dyract AP und Compoglass F gegenüber Compoglass und Hytac als verschleißfester.

Der Verschleiß von Hytac (284,95 μm), dem Kompomer mit dem höchsten Füllergehalt ist mehr als dreimal so hoch wie der von Dyract AP (83,04 μm) mit dem niedrigsten Füllergehalt.

Der Variationskoeffizient für Dyract AP und Compoglass F war unter 14%. Die Streuungen von Compoglass und Hytac waren mit 35 % und 49 % sehr hoch.

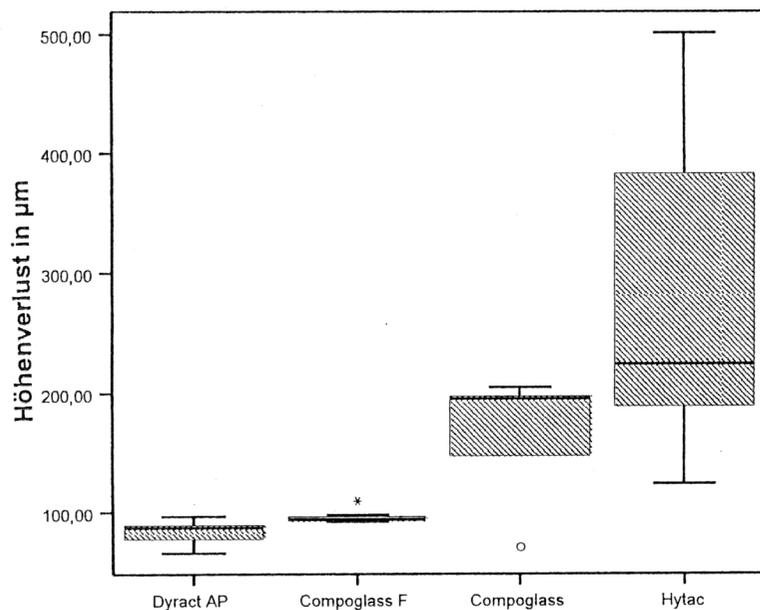


Abb. 4.6: Verschleiß der Kompomere nach 50 000 Zyklen

4.4 Feinstpartikelhybridkomposite mit hohem Mikrofülleranteil oder porösen Füllkörpern

Aufgrund ihrer von den übrigen Feinstpartikelhybridkompositen stark abweichenden Füllkörperzusammensetzungen werden die zwei folgenden Materialien hier gesondert besprochen. Artglass ist ein Feinstpartikelhybridkomposit mit hohem Mikrofülleranteil. Solitaire hat poröse Füllkörper.

4.4.1 Verschleiß im zeitlichen Verlauf

Für Solitaire und Artglass kann nach 6000 Zyklen ein zeitlich lineares Verschleißverhalten beobachtet werden (vergleiche Abb. 4.7).

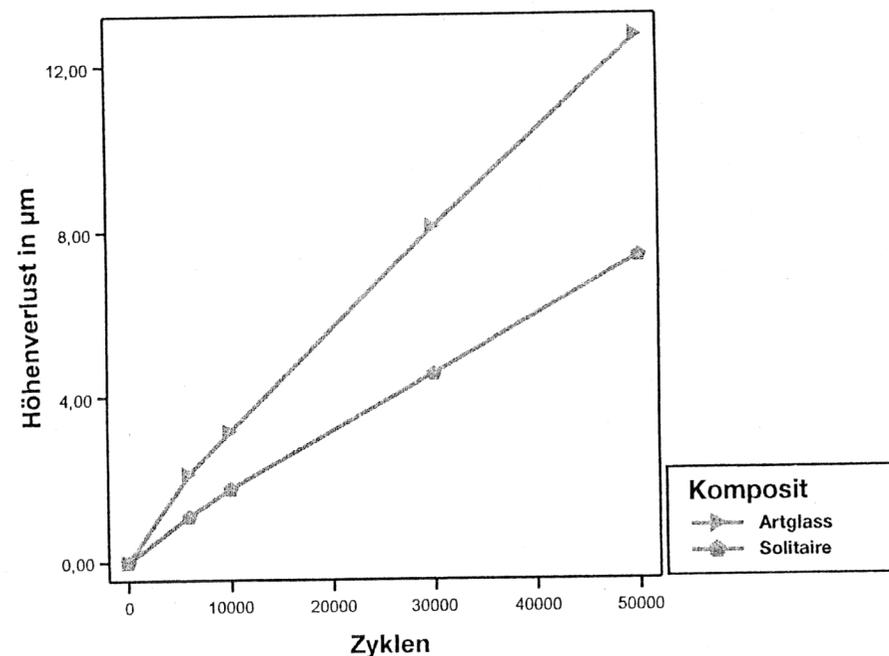


Abb. 4.7: Höhenverluste der Feinstpartikelhybridkomposite mit hohem Mikrofülleranteil oder porösen Füllkörpern im zeitlichen Verlauf

4.4.2 Ranking der Feinstpartikelhybridkomposite mit hohem Mikrofülleranteil oder porösen Füllkörpern in Bezug auf ihre Verschleißfestigkeit

In Abhängigkeit von der Zahl der Belastungszyklen ergibt sich folgendes Ranking in Bezug auf die Verschleißfestigkeit (vergleiche Abb. 4.8):

- a. Nach 6000 Belastungszyklen: Solitaire > Artglass
- b. Nach 10 000 Belastungszyklen: Solitaire > Artglass
- c. Nach 30 000 Belastungszyklen: Solitaire > Artglass
- d. Nach 50 000 Belastungszyklen: Solitaire > Artglass

In Bezug auf das Ranking findet kein Platzwechsel zwischen Solitaire und Artglass statt.

Das Material mit den porösen Füllkörpern, Solitaire, erweist sich verglichen mit Artglass bei Betrachtung des Gesamthöhenverlustes nach 50 000 Zyklen (Tab. 4.1) als verschleißfester.

Der Variationskoeffizient für beide Materialien lag unter 23 %.

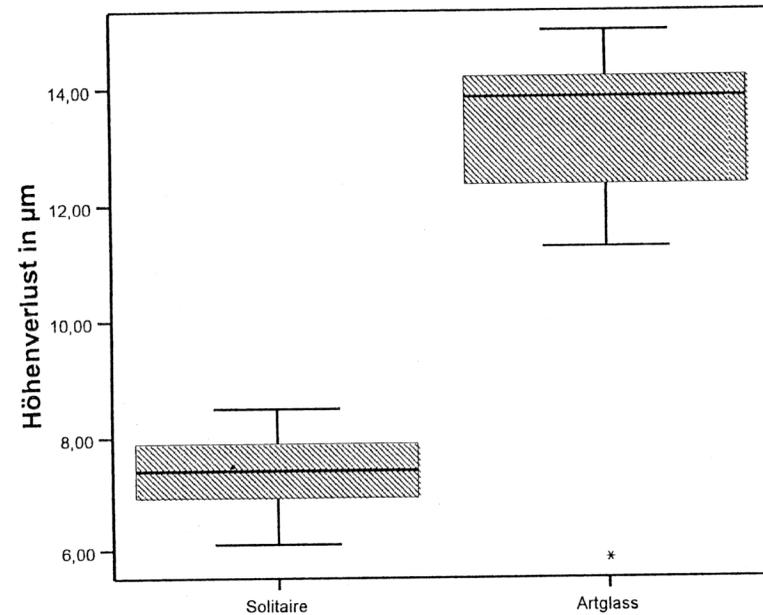


Abb. 4.8: Verschleiß der Feinstpartikelhybridkomposite mit hohem Mikrofülleranteil oder porösen Füllkörpern nach 50 000 Zyklen

4.5 Zusammenfassung der Ergebnisse der Verschleißbestimmung aller getesteten Materialien

In Abbildung 4.9 ist der Verschleiß im zeitlichen Verlauf aller getesteten Füllungsmaterialien zusammengefaßt. Dabei erweisen sich die überwiegend mikrogefüllten Komposite (Durafill VS, Heliomolar RO und Metafill CX) sowie die Feinstpartikelhybridkomposite mit hohem Mikrofülleranteil oder porösen Füllkörpern (Solitaire und Artglass) im Vergleich zu den Hybridkompositen als

verschleißfester. Eine vergleichbare Verschleißfestigkeit hat nur Arabesk als verschleißresistentestes Material seiner Füllstoffklasse. Die Kompomere verschleiben erwartungsgemäß viel schneller als alle anderen getesteten Materialgruppen. Die Ergebnisse der Materialien liegen jeweils fast alle entsprechend ihrer Gruppenzugehörigkeit beieinander.

In Bezug auf die einzelnen Materialgruppen ergibt sich daraus, mit einer Ausnahmen, folgendes Ranking für die Verschleißfestigkeit:

Mikrofüllerkomposite > Feinstpartikelhybridkomposite mit hohem Mikrofülleranteil oder porösen Füllkörpern > Feinstpartikelhybridkomposite (Ausnahme: Arabesk > Artglass) > Hybridkomposit > Kompomere.

Damit ist das Feinstpartikelhybridkomposit Arabesk verschleißfester als das Feinstpartikelhybridkomposit mit hohem Mikrofülleranteil, Artglass.

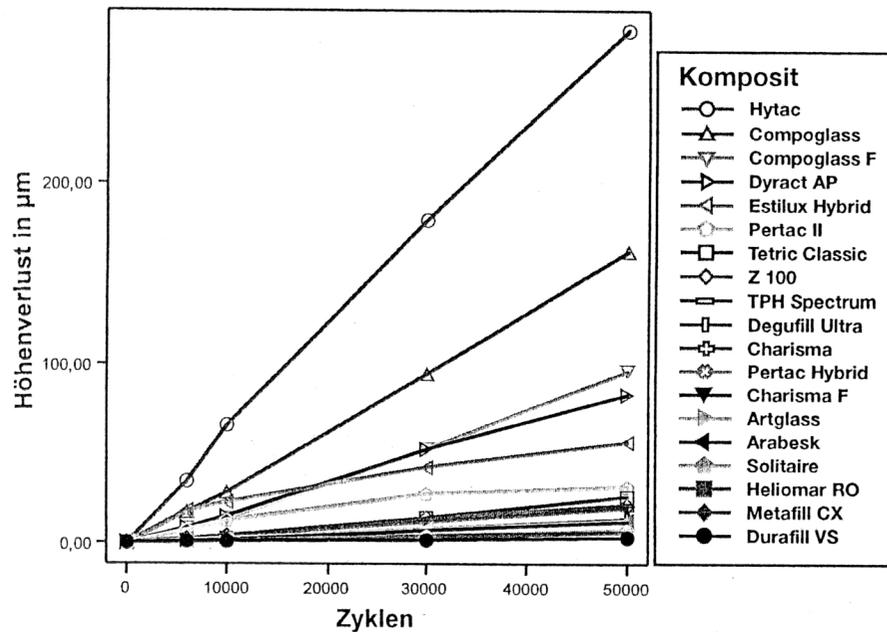


Abb. 4.9: Höhenverluste aller Materialien im zeitlichen Verlauf

In Abbildung 4.10 ist das Ranking nach 50 000 Zyklen mechanischer Belastung und der ermittelte Gesamthöhenverlust für jedes in dieser Arbeit getestete Material noch einmal graphisch zusammengefaßt.

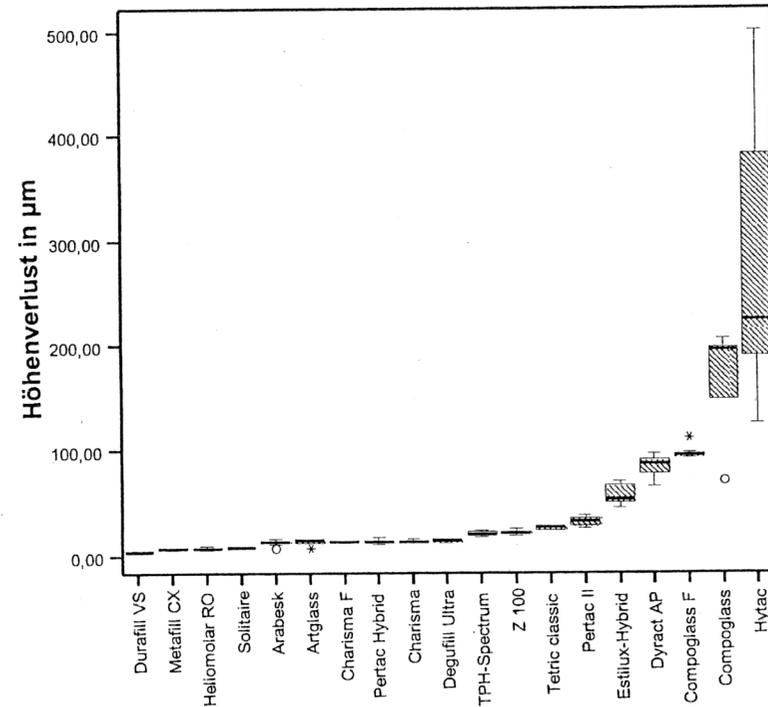


Abb. 4.10: Verschleiß aller Materialien nach 50 000 Zyklen

Der Variationskoeffizient liegt mit Ausnahme zweier Kompomere für alle Materialien unter 23 %. Mit einem Variationskoeffizient von 35 % für Compoglass und 49 % für Hytac hatten diese beiden Füllungsmaterialien nicht nur in ihrer Materialgruppe sondern auch im Vergleich aller getesteten Materialien die höchsten Streuungen.

Vergleicht man das Ranking des Höhenverlustes mit dem Ranking der von den Herstellern angegebenen maximalen Füllkörpergrößen (vergleiche Tab. 3.1), erhält man bei der Berechnung des Korrelationskoeffizienten nach Pearson einen hochsignifikanten Korrelationswert von 0,783.

4.6 Ergebnisse der morphologischen Verschleißanalyse

Bei der morphologischen Verschleißanalyse werden die Ergebnisse wie bei der quantitativen Verschleißanalyse nach Materialgruppen zusammengefaßt. Die Abbildungen 4.11-4.68 zeigen die mit dem Rasterelektronenmikroskop (REM) aufgenommenen Verschleißoberflächen nach 50 000 Zyklen mechanischer Belastung. Die morphologischen Unterschiede der Materialien werden bei 1000-, 4000- und 10 000-facher Vergrößerung betrachtet.

Die Oberflächen der Mikrofüllerkomposite Durafill VS, Heliomolar RO und Metafill CX erscheinen im Bereich von 1000- bis 4000-facher Vergrößerung verglichen mit den verschleißstarken Hybrid- und Feinstpartikelhybridkompositen relativ glatt.

Besonders ausgeprägt ist dies bei Durafill VS und Metafill CX. Zusätzlich werden hier Rillen entsprechend der Bewegungsrichtung des Antagonisten sichtbar. Die Begrenzungen splitterförmiger Präpolymerisate mit einer durchschnittlichen Größe von ca. 30 µm werden bei 1000-facher Vergrößerung durch umgebende feine und ausgeprägte Risse sichtbar. Die Präpolymerisate sind zum Teil im Vergleich zur Matrix erhaben. Bei Metafill CX sind diese auf Abb. 4.53 sehr deutlich zu erkennen.

Auch Heliomolar RO zeigt bei 1000- bis 4000-facher Vergrößerung zumindest andeutungsweise feine Rillen auf der gesamten Oberfläche entsprechend der Bewegungsrichtung des Antagonisten. Die einzelnen Kopolymere (15 µm) werden

bei 1000-facher Vergrößerung durch umgebende Risse sichtbar. In Abbildung 4.14 ist am rechten Bildrand der Aufnahmen ein Defekt infolge von einem, bzw. zwei herausgelösten Kopolymeren erkennbar. Im Bereich von 4000- bis 10 000-facher Vergrößerung werden einzelne freie Füllkörper oder Verschleißpartikel in der Größenordnung um 0,1-0,2 µm sichtbar.

Das Hybridkomposit Estilux Hybrid zeigt plane Bereiche, deren Größe deutlich über der durchschnittlichen Füllkörpergröße liegt. Dazwischen befinden sich rauhe Vertiefungen. Dabei hat das Material deutlich mehr Krater als plane Flächen. Bei 1000-facher Vergrößerung findet man innerhalb der planen Bereiche Risse entlang der Füllkörpergrenzen. In den zwischen den planen Bereichen liegenden vertieften Arealen liegen einzelne losgelöste Füllkörper oder Verschleißpartikel.

Außerdem fallen gleichmäßig über die Aufnahmen verteilte, Krater bildende senkrecht stehende, abgesprengt wirkende Bruchflächen auf. Bei einer Vergrößerung von 4000 und 10 000 sieht man, daß diese in Belastungsrichtung entstandenen Wände eine splitterförmige Morphologie haben.

Auch die Feinstpartikelhybridkomposite zeigen plane Bereiche, deren Größe über der durchschnittlicher Füllkörpergröße liegt. Dazwischen befinden sich rauhe Vertiefungen. Unterschiede finden sich bei den einzelnen Feinstpartikelhybridkompositen zum einen in Größe, Form und Anteil der planen Flächen, zum anderen in der vertikalen Ausdehnung der rauhen, tiefer liegenden Bereiche. Besonders ins Auge fallen diese Flächen und Vertiefungen bei den verschleißstarken Materialien Pertac II, Tetric, Z 100 und TPH-Spectrum. Charisma, Charisma F und Arabesk zeigen bei 1000-facher Vergrößerung eine weniger stark strukturierte Oberfläche.

Bei Pertac Hybrid und Charisma F ist der Rand der planen Flächen zum Teil angelöst und aufgewölbt. Partikel, die mit Schollen vergleichbar sind, liegen auch auf den

planen Flächen. Charisma F imponiert zusätzlich durch Risse und Ausbrüche, die senkrecht zur Bewegungsrichtung verlaufen.

Degufill Ultra weist bei 4000- und 10 000-facher Vergrößerung viele, über die ganze Fläche verteilte Partikel in der Größenordnung um 0,2-0,4 μm auf. Diese scheinen aus dem Polymerverbund herausgelöst worden zu sein. Die für die Hybridkomposite typischen planen Flächen sind kaum mehr erhalten.

Arabesk, das verschleißfesteste Material dieser Gruppe, hat kaum lose Partikel. Es weist tiefe Risse entsprechend der vertikalen Belastungsrichtung auf, die keine bevorzugte horizontale Richtung erkennen lassen. Dabei reicht der oberflächliche Materialabtrag nur wenig in die Tiefe.

Bei Solitaire und Artglass imponieren vor allem die tiefen Risse entsprechend der vertikalen Belastungsrichtung, ähnlich wie bei Arabesk ohne bevorzugte horizontale Richtung. Es sind mehr lose Partikel als bei Arabesk vorhanden.

Bei den Kompomeren kommt man für Hytac und Compoglass zu morphologisch ähnlichen Ergebnissen. Beide weisen im Bereich von 4000- bis 10 000-facher Vergrößerung plane Flächen und raue Vertiefungen auf. Deutliche Risse entsprechend der vertikalen Belastungsrichtung findet man ebenso auf den Flächen wie in den Vertiefungen. Compoglass F und Dyract AP haben nicht nur gegenüber Hytac und Compoglass, sondern auch beim Vergleich aller Materialien eine auffallend homogene Oberfläche. Auf dieser sind vereinzelt lose Partikel in der Größe um 1 μm zu erkennen.

Zusammenfassend kann man sagen, daß die Oberflächenstruktur der Komposite durch die Füllkörpergröße beeinflusst wird. Je größer die Füllkörper, desto größer ist die Verschleißoberfläche der Materialien.

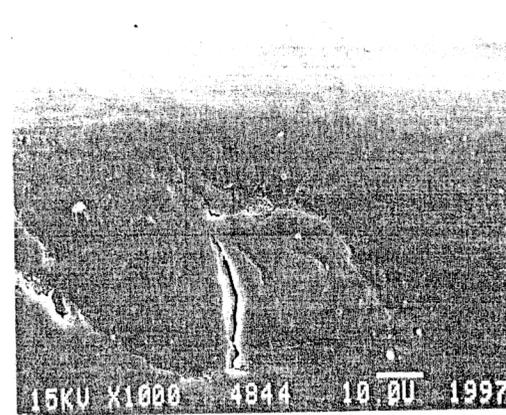


Abb. 4.11: Durafill VS, Verschleißspur in 1000-facher Vergrößerung im Rasterelektronenmikroskop: Die Oberfläche des Materials ist verglichen mit den Aufnahmen verschleißstarker Hybrid- und Feinstpartikelhybridkomposite relativ glatt. Die feinen horizontalen Linien, besonders deutlich in der Bildmitte zu sehen, sind Rillen entsprechend der Bewegungsrichtung des Antagonisten.

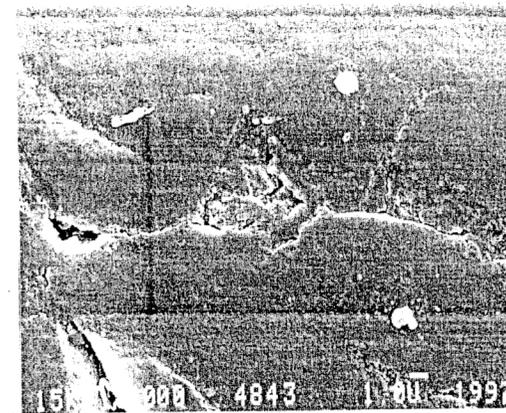


Abb. 4.12: Durafill VS, Verschleißspur in 4000-facher Vergrößerung im Rasterelektronenmikroskop: Die ausgeprägten Risse begrenzen die splitterförmigen Präpolymerisate, die eine durchschnittliche Größe von ca. 30 μm haben.

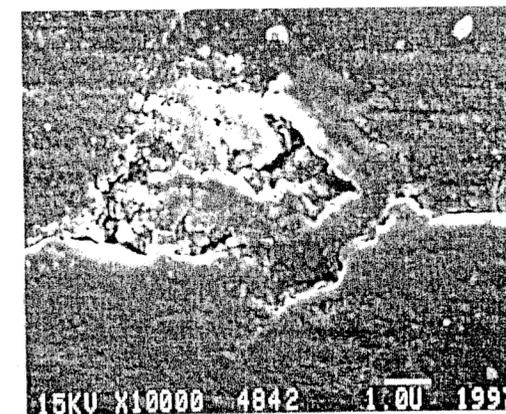


Abb. 4.13: Durafill VS, Verschleißspur in 10 000-facher Vergrößerung im Rasterelektronenmikroskop: Das Präpolymerisat im rechten unteren Bildviertel ist deutlich erhaben im Vergleich zur Matrix.

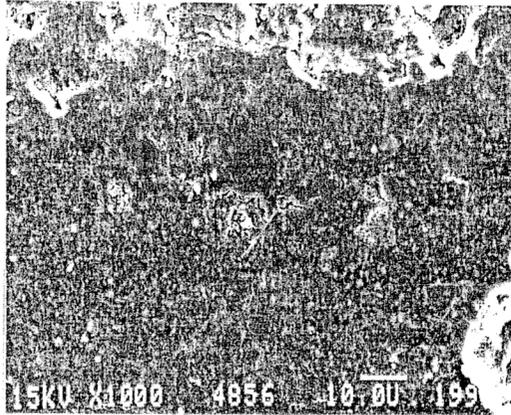


Abb. 4.14: Heliomolar RO, Verschleißspur in 1000-facher Vergrößerung im Rasterelektronenmikroskop: Die Oberfläche des Materials ist verglichen mit den Aufnahmen verschleißstarker Hybrid- und Feinstpartikelhybridkomposite relativ glatt. Die feinen Linien in horizontaler Richtung entsprechen der Bewegungsrichtung des Antagonisten. Feine Risse begrenzen einzelne Kopolymere, die eine durchschnittliche Größe von ca. 15µm haben. Am rechten Rand ist ein Defekt durch den Verlust von zwei herausgelösten Kopolymeren erkennbar.

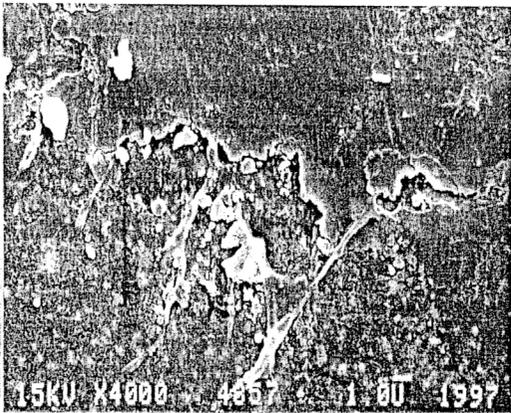


Abb. 4.15: Heliomolar RO, Verschleißspur in 4000-facher Vergrößerung im Rasterelektronenmikroskop: Kopolymere in der oberen Bildhälfte, seitlich begrenzt durch feine Risse. Die einzelnen Kopolymere haben eine durchschnittliche Größe von ca. 15 µm. Ein Teil der oberen Begrenzung des Defektes in der Bildmitte entsprechen der Form und der Größe eines Kopolymers.

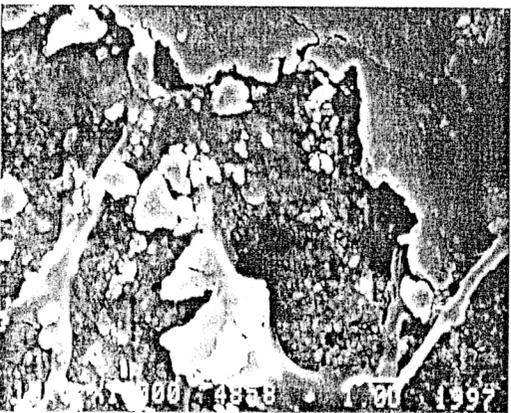


Abb. 4.16: Heliomolar RO, Verschleißspur in 10 000-facher Vergrößerung im Rasterelektronenmikroskop: Im Bereich des Defektes sind einzelne freie Füllkörper oder Verschleißpartikel in der Größenordnung um 0,1-0,2µm sichtbar.

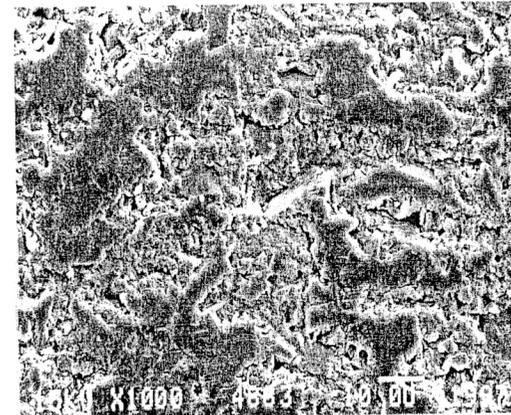


Abb. 4.17: Estilux Hybrid, Verschleißspur in 1000-facher Vergrößerung im Rasterelektronenmikroskop: Plane Bereiche, deren Größe deutlich über der durchschnittlichen Füllkörpergröße liegt. Dazwischen befinden sich raue Vertiefungen. Auf den planen Flächen zeigen sich Risse entlang der Füllkörpergrenzen.

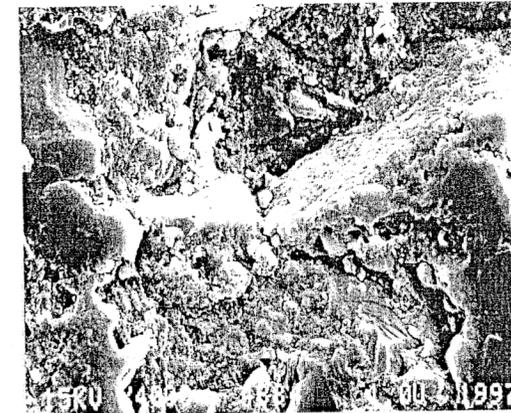


Abb. 4.18: Estilux Hybrid, Verschleißspur in 4000-facher Vergrößerung im Rasterelektronenmikroskop: Einzelne losgelöste Füllkörper und Verschleißpartikel liegen in einer rauhen Vertiefung.

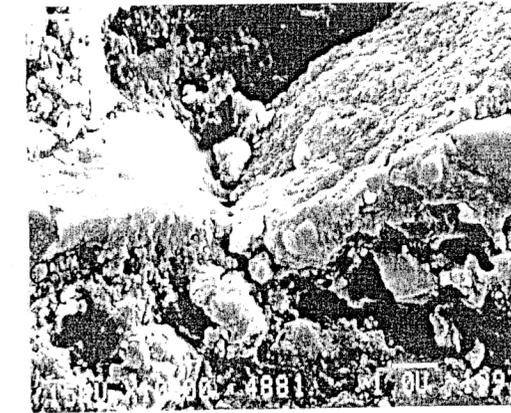


Abb. 4.19: Estilux Hybrid, Verschleißspur in 10 000-facher Vergrößerung im Rasterelektronenmikroskop: Fast senkrecht stehende, Krater bildende Bruchfläche.

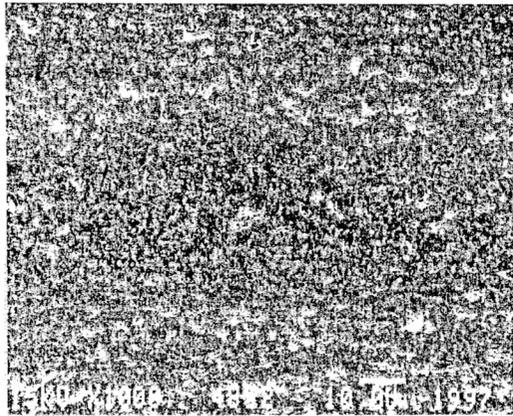


Abb. 4.20: Pertac II,
Verschleißspur in 1000-facher
Vergrößerung im
Rasterelektronenmikroskop:
Plane Bereiche, deren Größe deutlich
über der durchschnittlichen
Füllkörpergröße liegt. Dazwischen
befinden sich rauhe Vertiefungen.

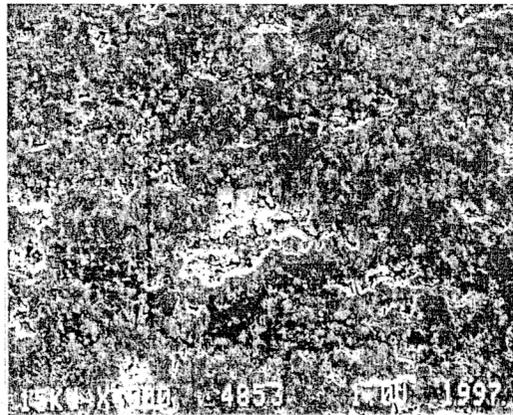


Abb. 4.21: Pertac II,
Verschleißspur in 4000-facher
Vergrößerung im
Rasterelektronenmikroskop:
Auf den planen Flächen zeigen sich
Risse entlang der Füllkörpergrenzen.

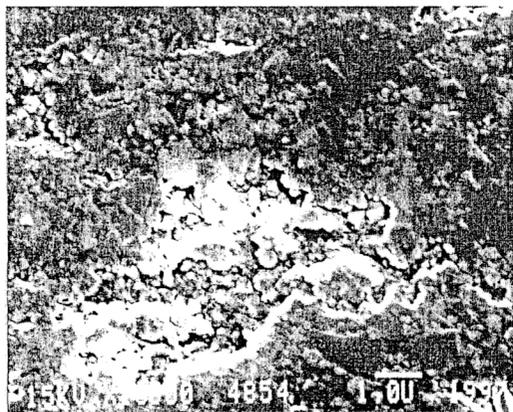


Abb. 4.22: Pertac II,
Verschleißspur in 10 000-facher
Vergrößerung im
Rasterelektronenmikroskop:
Einzelne losgelöste Füllkörper und
Verschleißpartikel in einer rauhen
Vertiefung.

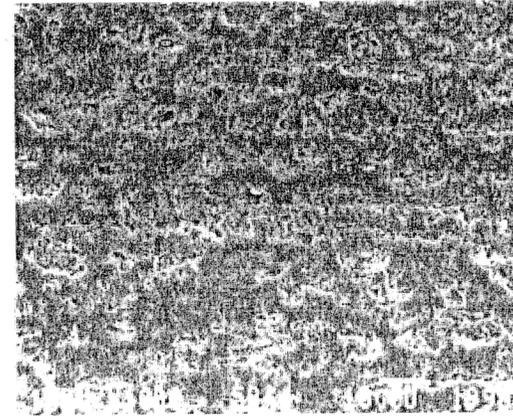


Abb. 4.23: Tetric,
Verschleißspur in 1000-facher
Vergrößerung im
Rasterelektronenmikroskop:
Plane Bereiche, deren Größe deutlich
über der durchschnittlichen
Füllkörpergröße liegt. Dazwischen
befinden sich rauhe Vertiefungen.

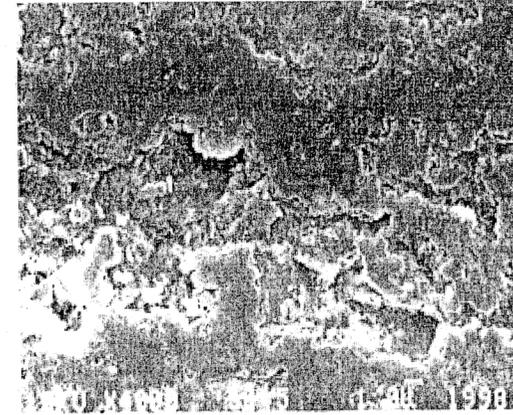


Abb. 4.24: Tetric,
Verschleißspur in 4000-facher
Vergrößerung im
Rasterelektronenmikroskop:
Auf den planen Flächen zeigen sich
Risse entlang der Füllkörpergrenzen.

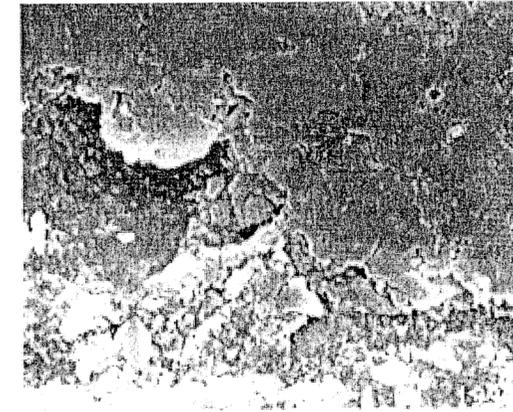


Abb. 4.25: Tetric,
Verschleißspur in 10 000-facher
Vergrößerung im
Rasterelektronenmikroskop:
Auf den planen Flächen zeigen sich
Risse entlang der Füllkörpergrenzen.
Im linken unteren Bildteil sind
einzelne losgelöste Füllkörper und
Verschleißpartikel in einer rauhen
Vertiefung zu erkennen.

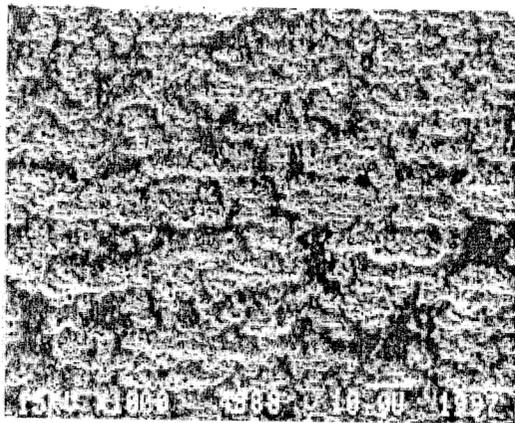


Abb. 4.26: Z 100,
Verschleißspur in 1000-facher
Vergrößerung im
Rasterelektronenmikroskop:
Plane Bereiche, deren Größe deutlich
über der durchschnittlichen
Füllkörpergröße liegt. Dazwischen
befinden sich raue Vertiefungen.

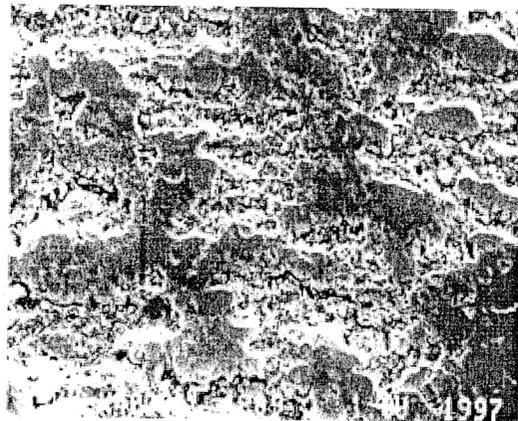


Abb. 4.27: Z 100,
Verschleißspur in 4000-facher
Vergrößerung im
Rasterelektronenmikroskop:
Auf den planen Flächen zeigen sich
Risse entlang der Füllkörpergrenzen.

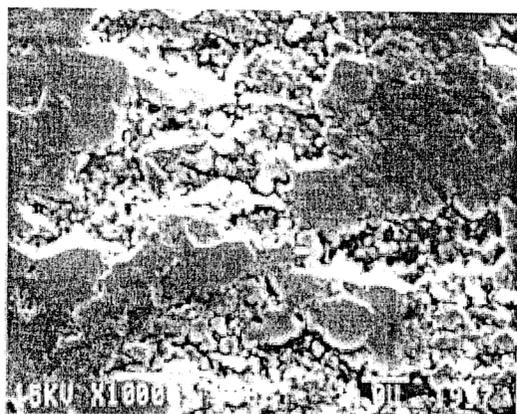


Abb. 4.28: Z 100,
Verschleißspur in 10 000-facher
Vergrößerung im
Rasterelektronenmikroskop:
Auf den planen Flächen zeigen sich
Risse entlang der Füllkörpergrenzen.
Im mittleren oberen und rechten
unteren Bildteil sind einzelne
losgelöste Füllkörper und
Verschleißpartikel in rauen
Vertiefungen zu erkennen.

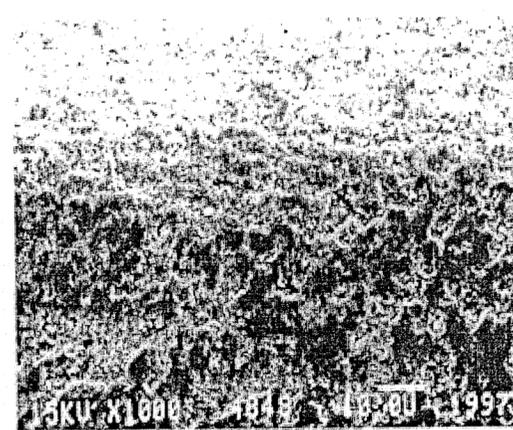


Abb. 4.29: TPH-Spektrum,
Verschleißspur in 1000-facher
Vergrößerung im
Rasterelektronenmikroskop:
Plane Bereiche, deren Größe deutlich
über der durchschnittlichen
Füllkörpergröße liegt. Dazwischen
befinden sich raue Vertiefungen.

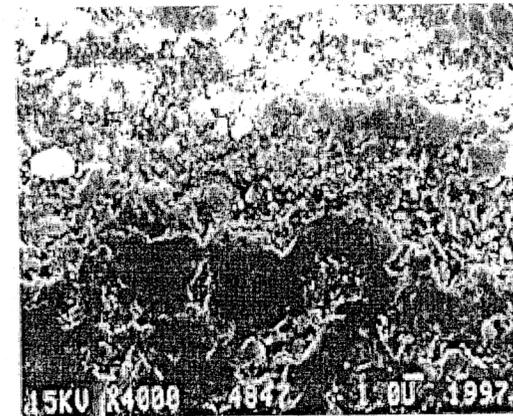


Abb. 4.30: TPH-Spektrum,
Verschleißspur in 4000-facher
Vergrößerung im
Rasterelektronenmikroskop:
Auf den planen Flächen zeigen sich
Risse entlang der Füllkörpergrenzen.

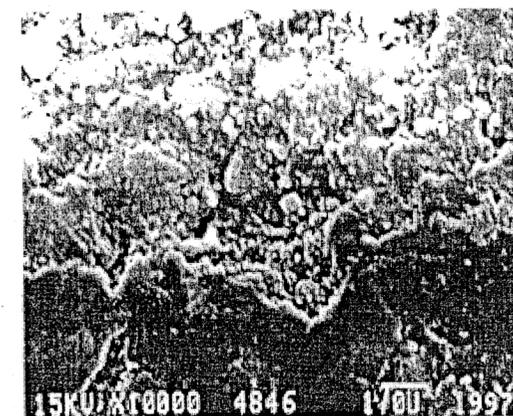


Abb. 4.31: TPH-Spektrum,
Verschleißspur in 10 000-facher
Vergrößerung im
Rasterelektronenmikroskop:
Auf den planen Flächen im unteren
Bildteil sind Risse entlang der
Füllkörpergrenzen zu sehen. Im
oberen Bildteil liegen einzelne
losgelöste Füllkörper und
Verschleißpartikel in einer rauen
Vertiefung.

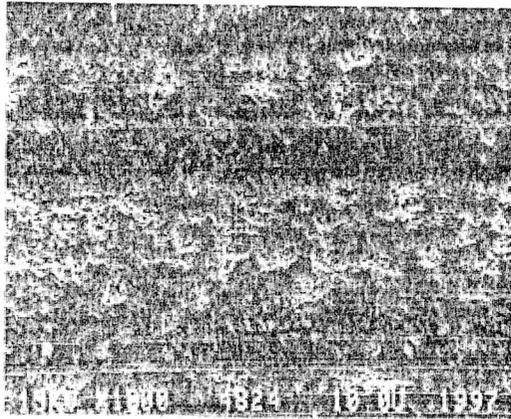


Abb. 4.32: Degufill ultra, Verschleißspur in 1000-facher Vergrößerung im Rasterelektronenmikroskop: Kaum erhaltene plane Bereiche, deren Größe deutlich über der durchschnittlichen Füllkörpergröße liegt. Dazwischen befinden sich rauhe Vertiefungen



Abb. 4.33: Degufill ultra, Verschleißspur in 4000-facher Vergrößerung im Rasterelektronenmikroskop: Auf den noch erhaltenen planen Flächen zeigen sich Risse entlang der Füllkörpergrenzen. Sowohl auf den planen Flächen als auch in den rauhen Vertiefungen finden sich einzelne aus dem Polymerverbund herausgelöste Partikel in der Größenordnung um 0,2-0,4 µm.

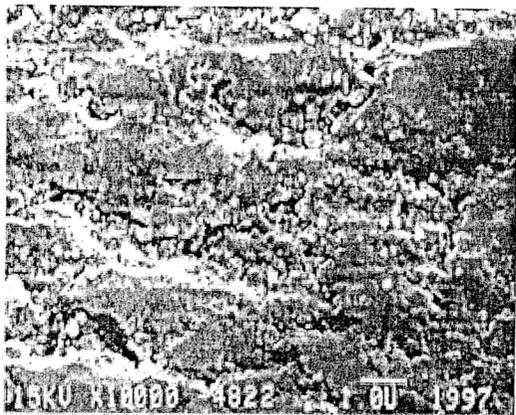


Abb. 4.34: Degufill ultra, Verschleißspur in 10 000-facher Vergrößerung im Rasterelektronenmikroskop: Sowohl auf den planen Flächen als auch in den rauhen Vertiefungen finden sich einzelne aus dem Polymerverbund herausgelöste Partikel in der Größenordnung um 0,2-0,4 µm.

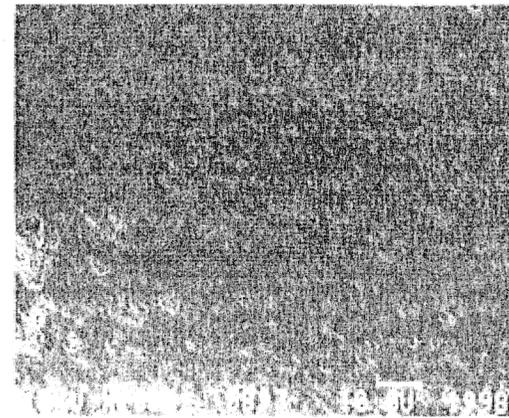


Abb. 4.35: Charisma, Verschleißspur in 1000-facher Vergrößerung im Rasterelektronenmikroskop: Verglichen mit anderen Materialien der gleichen Füllstoffklasse ist die Oberfläche wenig strukturiert.

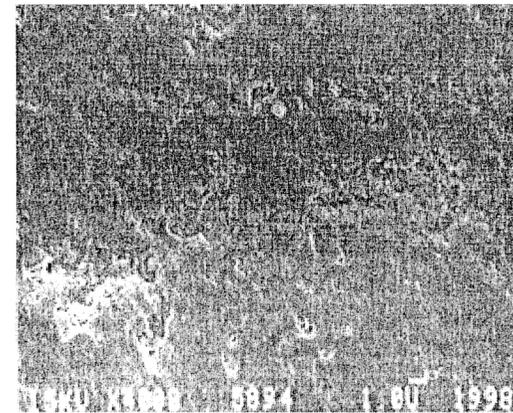


Abb. 4.36: Charisma, Verschleißspur in 4000-facher Vergrößerung im Rasterelektronenmikroskop: Überwiegend plane Flächen, in der Bildmitte sind rauhe Vertiefungen zu erkennen.



Abb. 4.37: Charisma, Verschleißspur in 10 000-facher Vergrößerung im Rasterelektronenmikroskop: In der Mitte der Aufnahme ist eine plane Fläche, rechts und links sind rauhe Vertiefungen zu erkennen.

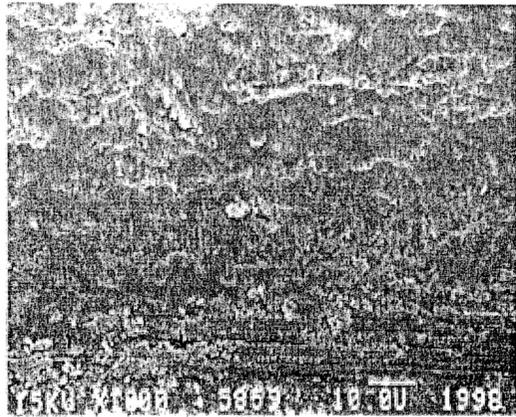


Abb. 4.38: Pertac Hybrid,
Verschleißspur in 1000-facher
Vergrößerung im
Rasterelektronenmikroskop:
Überwiegend plane Flächen, die
aneinandergrenzen. Die Ränder der
Flächen sind zum Teil angelöst und
aufgewölbt.

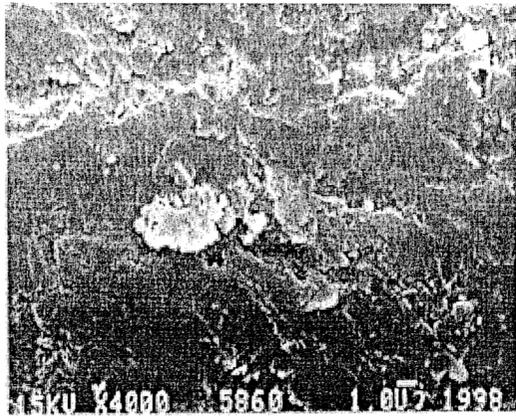


Abb. 4.39: Pertac Hybrid,
Verschleißspur in 4000-facher
Vergrößerung im
Rasterelektronenmikroskop:
In Bildmitte liegen auf den planen
Flächen schollenartige Partikel.

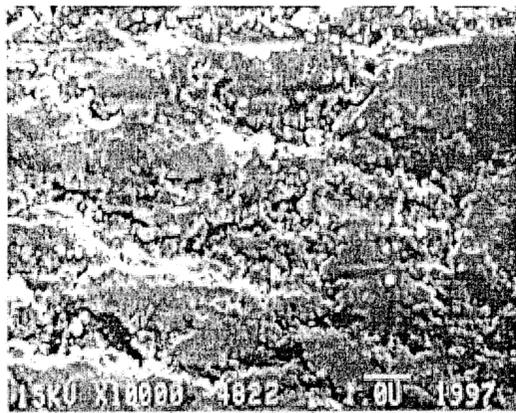


Abb. 4.40: Pertac Hybrid,
Verschleißspur in 10 000-facher
Vergrößerung im
Rasterelektronenmikroskop:
Einzelne aus dem Polymerverbund
herausgelöste Partikel.

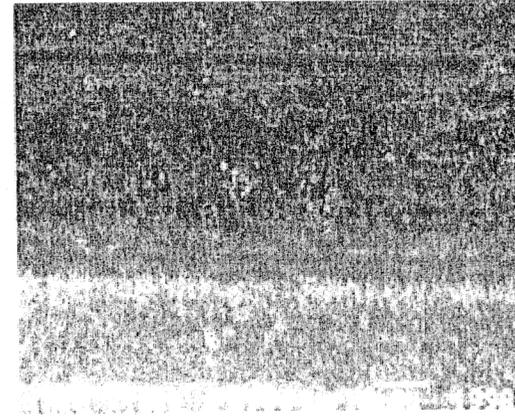


Abb. 4.41: Charisma F,
Verschleißspur in 1000-facher
Vergrößerung im
Rasterelektronenmikroskop:
Verglichen mit anderen Materialien
der gleichen Füllstoffklasse ist die
Oberfläche wenig strukturiert.



Abb. 4.42: Charisma F,
Verschleißspur in 4000-facher
Vergrößerung im
Rasterelektronenmikroskop:
Überwiegend plane Flächen, die
aneinandergrenzen. Die Ränder der
Flächen sind zum Teil angelöst und
aufgewölbt. Am linken Bildrand
Verlust von Schollen.



Abb. 4.43: Charisma F,
Verschleißspur in 10 000-facher
Vergrößerung im
Rasterelektronenmikroskop:
Die Risse und Ausbrüche zwischen
den planen Flächen verlaufen
senkrecht zur Bewegungsrichtung des
Antagonisten.

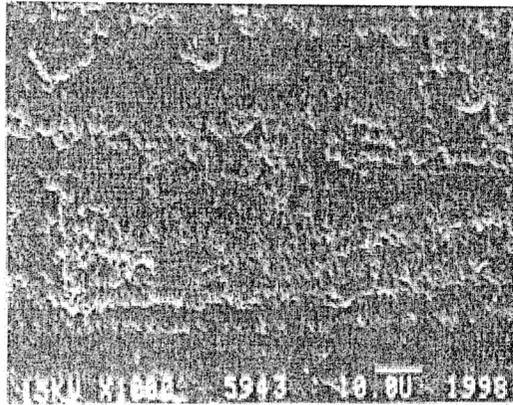


Abb. 4.44: Arabesk,
Verschleißspur in 1000-facher
Vergrößerung im
Rasterelektronenmikroskop:
Verglichen mit anderen Materialien
der gleichen Füllstoffklasse ist die
Oberfläche wenig strukturiert.

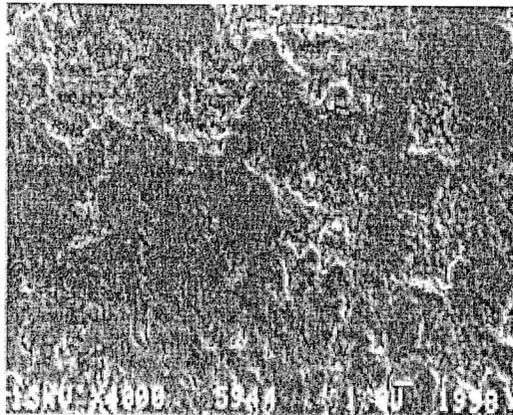


Abb. 4.45: Arabesk,
Verschleißspur in 4000-facher
Vergrößerung im
Rasterelektronenmikroskop:
Tiefe Risse im Bereich der flachen,
rauen Vertiefungen. Langer
horizontaler RiB am oberen Bildrand.

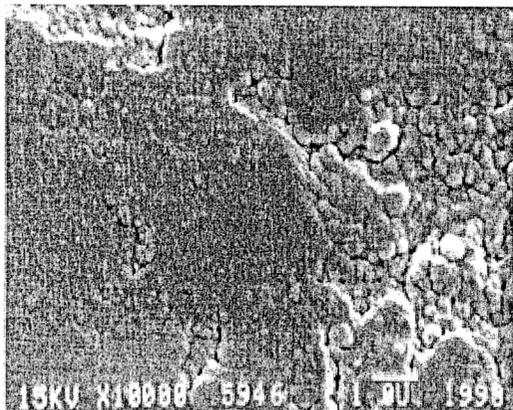


Abb. 4.46: Arabesk,
Verschleißspur in 10 000-facher
Vergrößerung im
Rasterelektronenmikroskop:
In der rechten Hälfte der Aufnahme
sind einzelne Füllkörper gut
erkennbar. Jedoch finden sich kaum
lose Partikel.

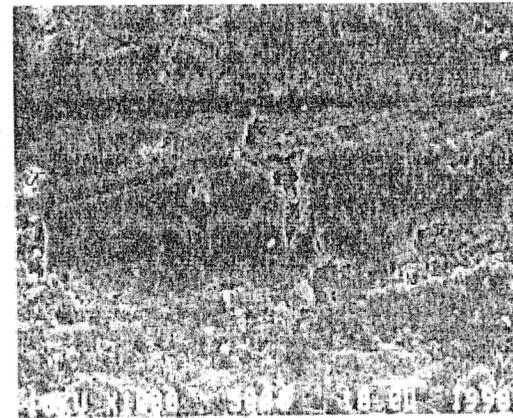


Abb. 4.47: Artglass,
Verschleißspur in 1000-facher
Vergrößerung im
Rasterelektronenmikroskop:
Überwiegend plane Flächen, wenig
Vertiefungen.



Abb. 4.48: Artglass,
Verschleißspur in 4000-facher
Vergrößerung im
Rasterelektronenmikroskop:
Senkrecht zur planen Oberfläche
verlaufen Risse. Die Wände der
Ausbrüche in der rechten Bildhälfte
verlaufen ebenfalls senkrecht zur
Oberfläche.

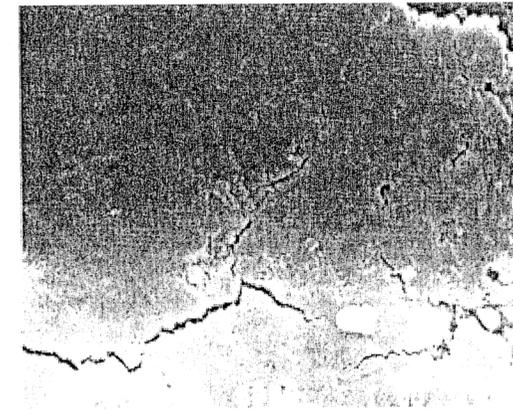


Abb. 4.49: Artglass,
Verschleißspur in 10 000-facher
Vergrößerung im
Rasterelektronenmikroskop:
Tiefer, langer RiB, beginnend am
linken Bildrand, auf einer sonst
planen Oberfläche.

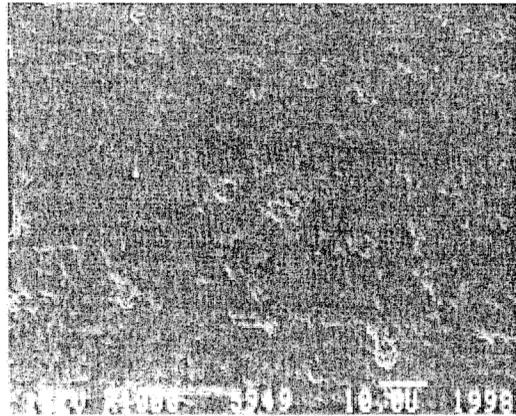


Abb. 4.50: Solitaire,
Verschleißspur in 1000-facher
Vergrößerung im
Rasterelektronenmikroskop:
Überwiegend plane Flächen, kaum
Vertiefungen.

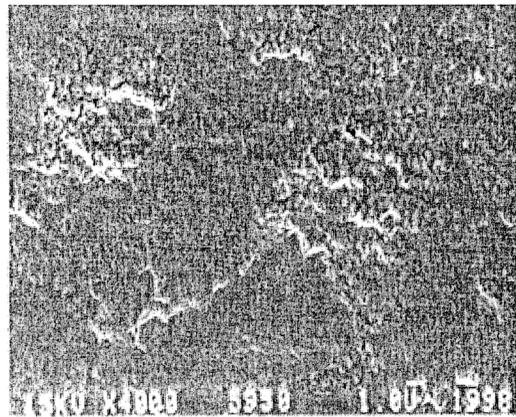


Abb. 4.51: Solitaire,
Verschleißspur in 4000-facher
Vergrößerung im
Rasterelektronenmikroskop:
Die zwei erkennbaren Vertiefungen
sind von geringer Tiefe. Am Rande
der planen Fläche, besonders am
linken Bildrand tiefe, senkrecht zur
Oberfläche verlaufende Risse.

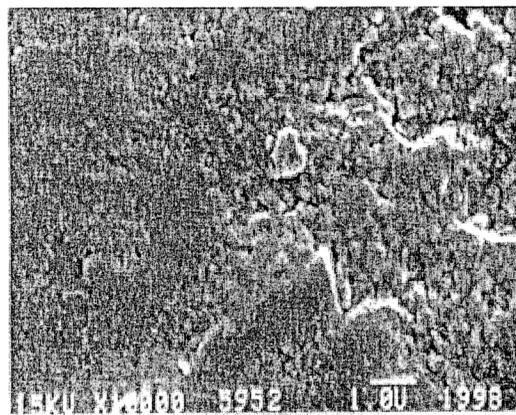


Abb. 4.52: Solitaire,
Verschleißspur in 10 000-facher
Vergrößerung im
Rasterelektronenmikroskop:
Senkrecht zur Oberfläche verlaufende
Risse und Bruchflächen in der rechten
Hälfte der Aufnahme.

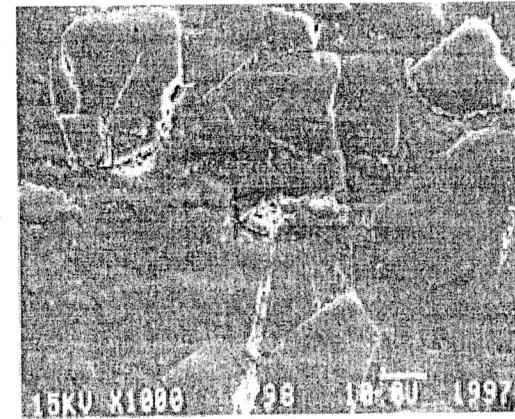


Abb. 4.53: Metafill CX,
Verschleißspur in 1000-facher
Vergrößerung im
Rasterelektronenmikroskop:
Die Oberfläche des Materials ist
verglichen mit den Aufnahmen
verschleißstarker Hybrid- und
Feinstpartikelhybridkomposite relativ
glatt. Die feinen horizontalen Linien
sind Rillen entsprechend der
Bewegungsrichtung des
Antagonisten. Sehr deutlich sind die
einzelnen Präpolymerisate mit einer
durchschnittlichen Größe von
ca. 30 μm zu erkennen.

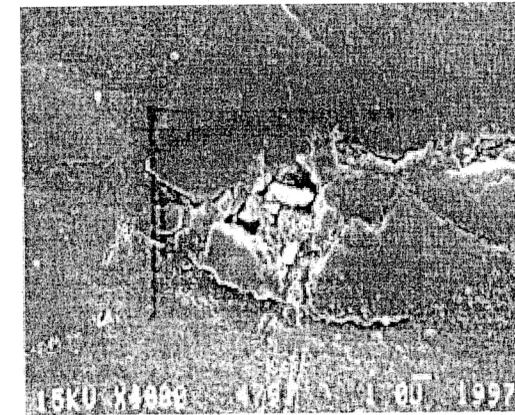


Abb. 4.54: Metafill CX,
Verschleißspur in 4000-facher
Vergrößerung im
Rasterelektronenmikroskop:
In der Bildmitte ist ein Bruchspalt mit
Bruchstücken zu erkennen. Der
Bruchspalt liegt am Rand eines
Kopolymers.

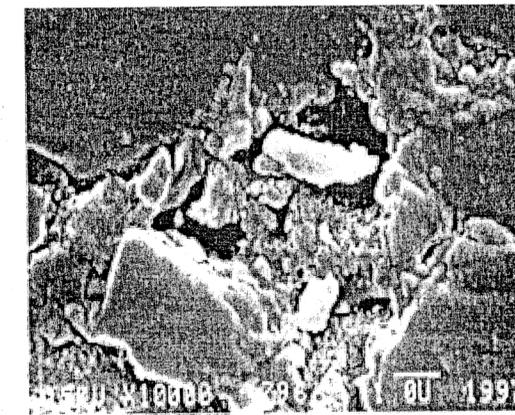


Abb. 4.55: Metafill CX,
Verschleißspur in 10 000-facher
Vergrößerung im
Rasterelektronenmikroskop:
Bruchspalt mit Bruchstücken am
Rand des Kopolymers.

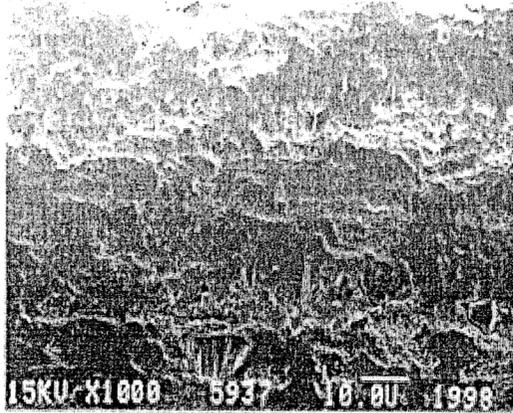


Abb. 4.56: Hytac,
Verschleißspur in 1000-facher
Vergrößerung im
Rasterelektronenmikroskop:
Stark strukturierte Oberfläche.

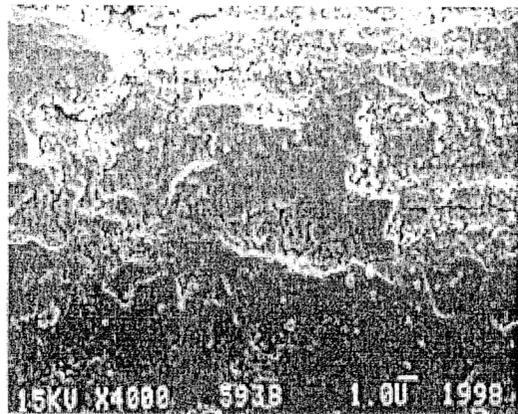


Abb. 4.57: Hytac,
Verschleißspur in 4000-facher
Vergrößerung im
Rasterelektronenmikroskop:
Plane Bereiche, deren Größe deutlich
über der durchschnittlichen
Füllkörpergröße liegt. Dazwischen
befinden sich raue Vertiefungen

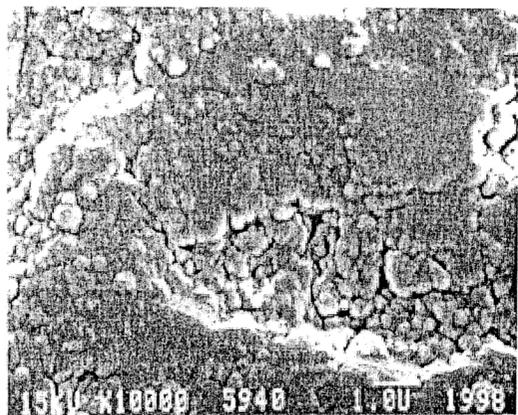


Abb. 4.58: Hytac,
Verschleißspur in 10 000-facher
Vergrößerung im
Rasterelektronenmikroskop:
In der rechten Hälfte der Aufnahme
und links oben sind einzelne
Füllkörper zu sehen. Zwischen den
Füllkörpern und auf den planen
Flächen finden sich tiefe senkrechte
Risse. Lose Partikel sind kaum
vorhanden.

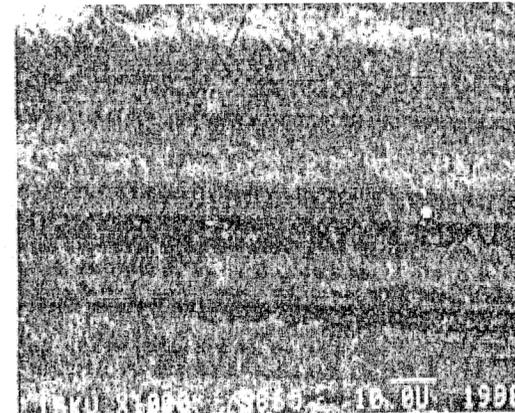


Abb. 4.59: Compoglass,
Verschleißspur in 1000-facher
Vergrößerung im
Rasterelektronenmikroskop:
In der planen Oberfläche sind wenig
Vertiefungen.



Abb. 4.60: Compoglass,
Verschleißspur in 4000-facher
Vergrößerung im
Rasterelektronenmikroskop:
Im oberen Viertel der Aufnahme
findet sich eine einzelne raue
Vertiefung in der Oberfläche.

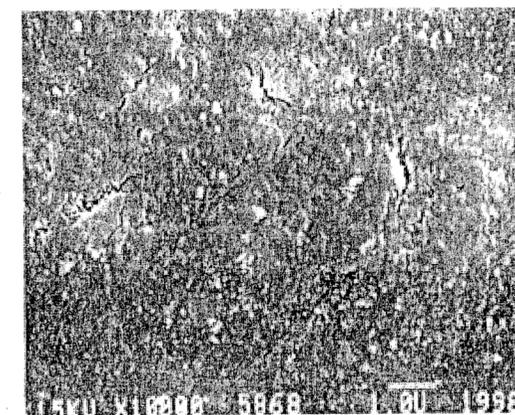


Abb. 4.61: Compoglass,
Verschleißspur in 10 000-facher
Vergrößerung im
Rasterelektronenmikroskop:
Die gesamte Oberfläche weist tiefe
senkrechte Risse auf. Auf der
Oberfläche liegen viele lose Partikel.

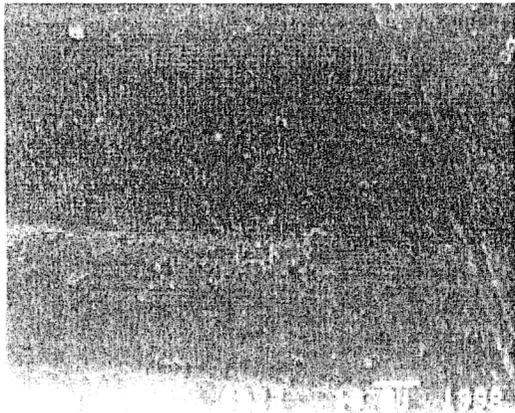


Abb. 4.62: Compoglass F,
Verschleißspur in 1000-facher
Vergrößerung im
Rasterelektronenmikroskop:
Sehr plane und homogene
Oberfläche.

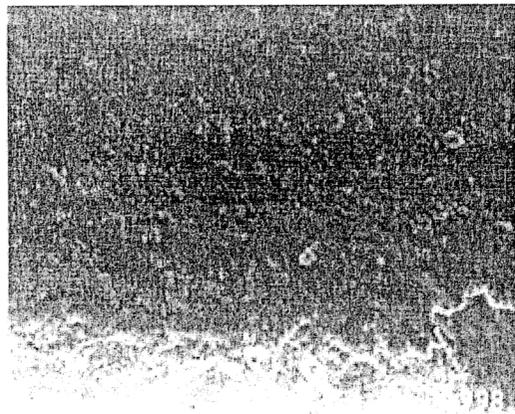


Abb. 4.63: Compoglass F,
Verschleißspur in 4000-facher
Vergrößerung im
Rasterelektronenmikroskop:
Homogene Oberfläche. Im unteren
rechten Viertel der Aufnahme sind
senkrechte Risse erkennbar.

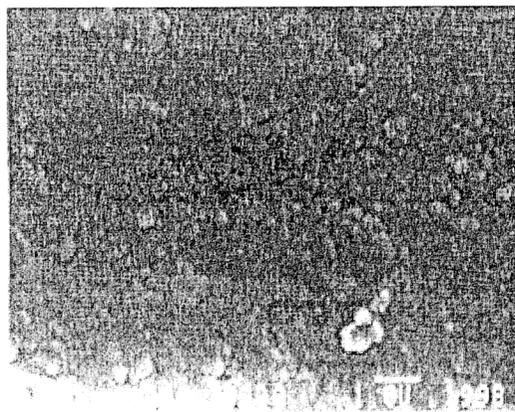


Abb. 4.64: Compoglass F,
Verschleißspur in 10 000-facher
Vergrößerung im
Rasterelektronenmikroskop:
Lose Partikel in Füllkörpergröße in
der rechten Ecke der Aufnahme.

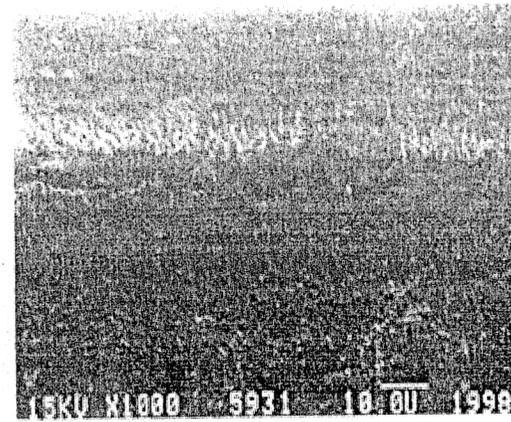


Abb. 4.65: Dyract AP,
Verschleißspur in 1000-facher
Vergrößerung im
Rasterelektronenmikroskop:
Sehr plane und homogene
Oberfläche.

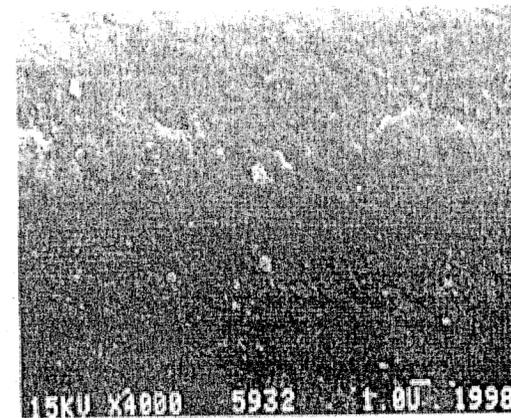


Abb. 4.66: Dyract AP,
Verschleißspur in 4000-facher
Vergrößerung im
Rasterelektronenmikroskop:
Wenige senkrechte Risse in der
Oberfläche. Vereinzelt liegen lose
Partikel in Füllkörpergröße auf der
Oberfläche.

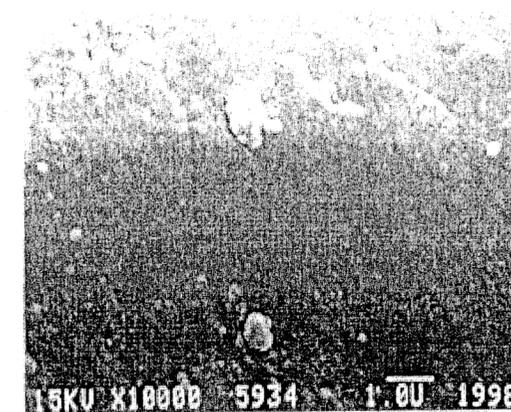


Abb. 4.67: Dyract AP,
Verschleißspur in 10 000-facher
Vergrößerung im
Rasterelektronenmikroskop:
Vereinzelt lose Partikel in der Größe
um $1\mu\text{m}$ auf der Oberfläche.

4.7 Antagonistenauswertung

Die Kontaktfläche der Degussit-Antagonisten wurde nach 50 000 Zyklen mechanischer Belastung mit der Software UTHSCA Image Tool for Windows V 2.0 unter dem Lichtmikroskop betrachtet. Dabei wurde die Kontaktfläche auf Unterscheide zwischen den einzelnen Materialien und Materialgruppen untersucht. Wenn es eine klare Begrenzung der Verschleißfläche zuließ, wurde die Fläche vermessen. Bei den Kompomeren Dyract AP, Compoglass F und Compoglass war das nicht möglich.

Die Mittelwerte der Verschleißflächen, die Standardabweichungen und die Variationskoeffizienten der gemessenen Verschleißflächen auf den Antagonisten sind für alle Materialien in Tabelle 4.2 zusammengefaßt.

Material	mm ²	SD	VaKo
Durafill VS	0,778571429	0,319031272	0,40976494
Estilux-Hybrid	1,79	0,094415495	0,05274609
TPH-Spectrum	1,2275	0,20513062	0,16711252
Pertac II	0,785714286	0,101793442	0,12955529
Heliomolar RO	0,8225	0,220243372	0,2677731
Z100	1,55625	0,164224367	0,1055257
Tetric	1,36	0,144518906	0,1062639
Degufill Ultra	1,23125	0,298780258	0,24266417
Metafil CX	0,788571429	0,138495315	0,17562812
Arabesk	0,985	0,084006802	0,08528609
Artglass	0,8675	0,091456469	0,10542532
Charisma F	1,098333333	0,099079093	0,09020858
Pertac Hybrid	1,1725	0,113483794	0,09678788
Hytac	1,661428571	0,264853958	0,15941339
Solitaire	0,71	0,08694826	0,12246234
Charisma	0,923333333	0,143619869	0,15554498

Tab. 4.2: Mittlere Kontaktfläche der Antagonisten in mm², Standardabweichung (SD) und der Variationskoeffizient (VaKo) nach 50 000 Zyklen

Nach 50 000 Zyklen weisen die Antagonisten von Estilux-Hybrid (1,79 mm²) und Hytac (1,66 mm²) die größten meßbaren Kontaktflächen auf. Die kleinsten meßbaren Kontaktflächen besitzen die Antagonisten von Solitaire (0,71 mm²), Pertac II (0,79 mm²) und Metafil CX (0,79 mm²).

Die größten Variationskoeffizienten besitzen die Antagonisten der Materialien Durafill VS (41 %), Heliomolar RO (27 %) und Degufill Ultra (24 %).

In Abbildung 4.69 sind die Ergebnisse der Vermessung der Kontaktfläche graphisch dargestellt.

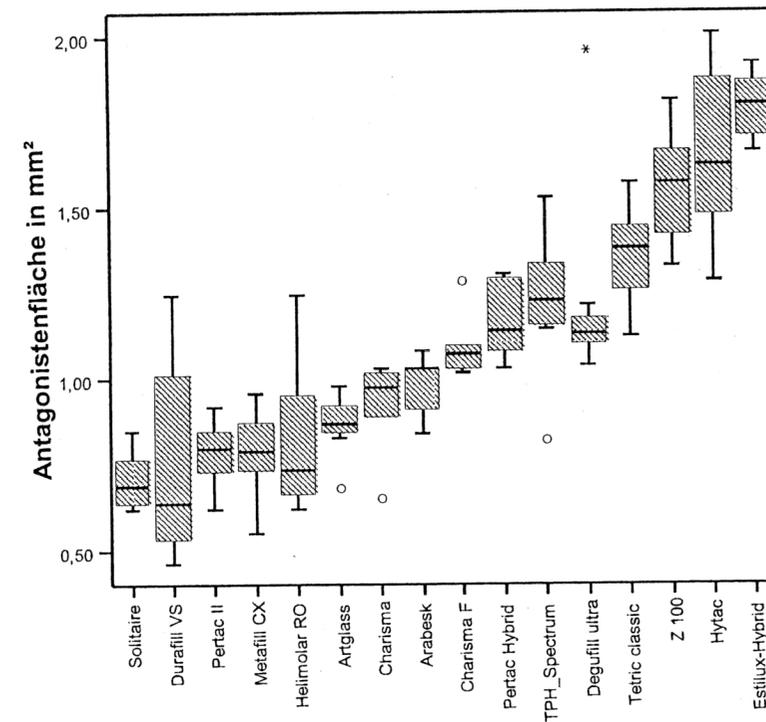


Abb. 4.69: Kontaktfläche der Antagonisten nach 50 000 Zyklen

Auffällig ist die große Variationsbreite von Durafill VS, Heliomolar RO und Hytac. Ein Ranking der Antagonistenflächen, das mit dem Ranking der getesteten Materialien nach 50 000 Zyklen übereinstimmt, konnte nicht festgestellt werden. Die Berechnung des Korrelationskoeffizienten nach Pearson ergab einen Wert von 0,424. Definitionsgemäß besteht damit eine geringe Korrelation zwischen dem Höhenverlust der Proben und der Antagonistenkontaktfläche. Diese geringe Korrelation ist hochsignifikant.

Vergleicht man das Ranking der Antagonistenflächen mit dem Ranking der von den Herstellern angegebenen maximalen Füllkörpergrößen (vergleiche Tab. 3.1), erhält man bei der Berechnung des Korrelationskoeffizienten nach Pearson einen hochsignifikanten Korrelationswert von 0,834.

Um bei gleicher maximaler Füllkörpergröße mehrerer Materialien diese in ein Ranking bringen zu können, wurde die gesamte Füllkörpermenge, das heißt der Füllergehalt in Gewichtsprozent, berücksichtigt. Damit erhöht sich der Korrelationskoeffizient nach Pearson weiter auf einen hochsignifikanten Wert von 0,906.

Die Untersuchung der Antagonisten unter dem Lichtmikroskop ließ Unterschiede in Bezug auf die Kontaktflächen und deren Begrenzung erkennen, sowohl für die Materialgruppen als auch zum Teil für einzelne Materialien. Die Verschleißspur entspricht in allen Fällen einer ovalen Grundform. Bei der optischen Auswertung wurde unterschieden zwischen „scharf begrenzt“ (Abb. 4.70), „nicht scharf begrenzt aber gut erkennbar“ (Abb. 4.71) sowie „nicht scharf begrenzt und schwer erkennbar“ (Abb. 4.72).

Bei dem Mikrofüllerkompositen Durafill VS und Metafill CX sind die Kontaktflächen der Antagonisten von geringer Ausdehnung, nur schwer erkennbar und nicht scharf begrenzt. Die Antagonistenkontaktflächen von Heliomolar RO zeigen auch eine kleine, aber scharf begrenzte Kontaktfläche.

Die Antagonisten der Hybrid- und Feinstpartikelhybridkomposite von Estilux Hybrid bis Arabesk weisen einheitlich glatt polierte, scharf begrenzte Kontaktflächen auf. Durch die Lichtreflexion können feine Rillen, die entsprechend der Bewegungsrichtung verlaufen, beobachtet werden.

Auch die Antagonisten von Artglass, ein Feinstpartikelhybridkomposit mit sehr hohem Mikrofülleranteil, lassen mit den übrigen Feinstpartikelhybridkompositen vergleichbare Kontaktflächen erkennen, d.h. sie sind glatt poliert und scharf begrenzt. Die Antagonisten von Solitaire dagegen weisen ähnliche Kontaktflächen wie die Antagonisten des Mikrofüllerkomposite Durafill VS und Metafill CX auf. Die Verschleißfläche ist gut erkennbar, aber nicht scharf begrenzt.

Bei den Kompomeren Dyract AP, Compoglass F und Compoglass waren zwar andeutungsweise Kontaktflächen auf den Antagonisten zu erkennen, aber nicht deutlich genug, um die Fläche auszumessen. Darum konnten ihre Antagonisten nicht ausgewertet werden.

Materialtransfer zum Antagonisten konnte unter dem Lichtmikroskop für keines der getesteten Füllungsmaterialien beobachtet werden.

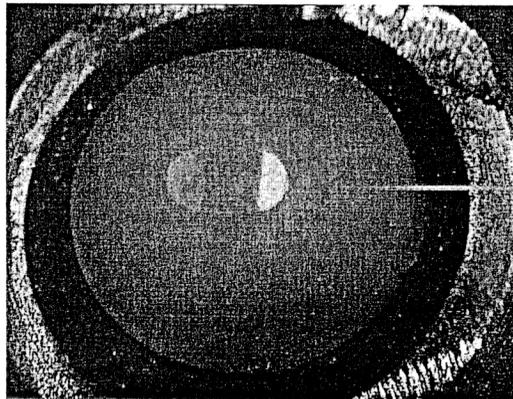


Abb. 4.70: Scharf begrenzte Kontaktfläche eines Antagonisten nach 50 000 Zyklen am Beispiel von Z. 100.

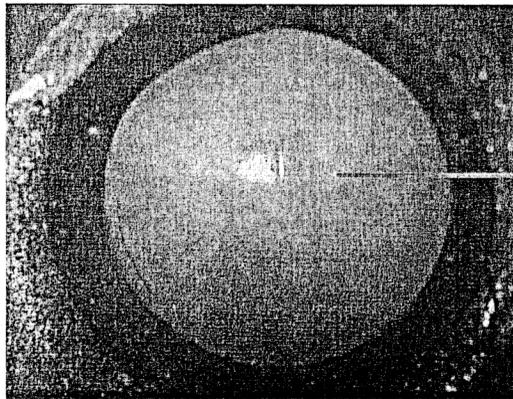


Abb. 4.71: Nicht scharf begrenzte aber gut erkennbare Kontaktfläche eines Antagonisten nach 50 000 Zyklen am Beispiel von Solitaire.

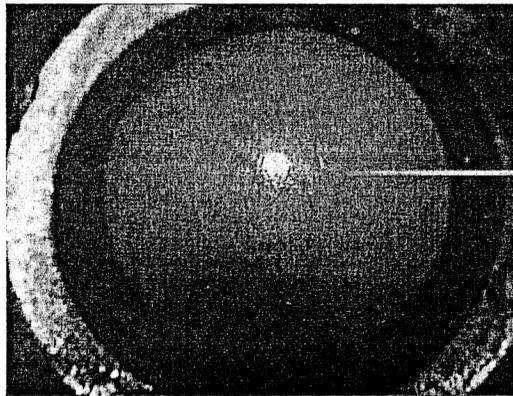


Abb. 4.72: Nicht scharf begrenzte und schwer erkennbare Kontaktfläche eines Antagonisten nach 50 000 Zyklen am Beispiel von Durafill VS.



5 Diskussion

5.1 Verschleiß im zeitlichen Verlauf

Alle in dieser Arbeit getesteten Füllungsmaterialien zeigen mit einer Ausnahme eine initial erhöhte Verschleißrate, die sich spätestens nach 10 000 Zyklen verringert und trotz der Kugelform der Antagonisten überwiegend in ein zeitlich lineares Verschleißverhalten übergeht. Lediglich das Hybridkomposit und zwei Feinstpartikelhybridkomposite verzeichnen nach dem anfänglich hohen Verschleiß auch nach 10 000 Zyklen noch eine weiter abnehmende Verschleißrate.

Bei der Interpretation des Verschleißes im zeitlichen Verlauf ist zu bedenken, daß der Abrieb nicht kontinuierlich, sondern nur zu empirisch festgelegten Zeiten gemessen wurde.

Eine denkbare Ursache für den initial deutlich erhöhten Materialabtrag ist die Traumatisierung der Materialoberfläche beim Ausarbeiten mit Schleifpapier (Leinfelder 1985). Eine weitere Erklärung könnte die Tatsache sein, daß die Belastung pro Fläche zwischen Antagonisten und Prüfkörper trotz konstanter Last anfangs höher ist. Durch die zunehmende Kontaktfläche im Laufe des Verschleißvorganges nimmt die Belastung pro Fläche ab und es kommt zum Abflachen der Verschleißkurve (Krejci 1990 a).

Ungeachtet der Ursache für den initial erhöhten Verschleiß ist ein anfänglicher Einschleifvorgang zwischen Probe und Antagonist festzustellen. Diese Periode wird als Running-in-Phase bezeichnet. Die Dauer der Running-in-Phase ist abhängig von den Beanspruchungsparametern sowie von den verwendeten Prüfkörpern und Gegenkörpern.

Diese Phase ist abgeschlossen, wenn die Verschleißzunahme in eine konstante Steigung übergeht. Der Abschnitt des zeitlich linearen Verlaufes wird als Steady-state-Bereich bezeichnet. Nur in dieser Phase dürfen die Verschleißraten von Füllungswerkstoffen miteinander verglichen werden (Holzner-Hartmannsgruber 1997).

Auch Roulet (1980), Leinfelder (1985) und Krejci (1990) stellten bei Zwei-Medien-Verschleißtests einen Verschleiß fest, der initial hoch war und dann abflachte. Auch DeLong (1985) stellte linearen Verschleiß erst nach einer kurzen Einlaufphase fest.

Weil alle Materialien unter den gleichen Bedingungen getestet wurden, sind unterschiedliche Versuchsparameter als Ursache für die bis 50 000 Zyklen abnehmende Verschleißrate von Estilux Hybrid, Pertac II und Z 100 weitgehend auszuschließen. Als mögliche Ursache muß der Antagonistenverschleiß dieser Materialien in Betracht gezogen werden. Die abflachende Verschleißkurve könnte dann Folge der abnehmenden Last pro Fläche sein. Diese Annahme trifft für Estilux Hybrid und Z 100 zu, die tatsächlich hohen Antagonistenverschleiß aufweisen. Bei den Antagonisten von Pertac II konnte das nicht beobachtet werden.

Interessant ist, daß alle drei Materialien mit abflachender Verschleißkurve Hybridkomposite sind und verglichen mit den anderen Materialien ihrer Füllstoffklassen große Füllkörper haben.

Für den Anstieg der Verschleißrate, wie er in der vorliegenden Arbeit nur bei Tetric nach 10 000 Zyklen beobachtet wurde, kommt als mögliche Erklärung das Hinzutreten einer zusätzlichen Verschleißkomponente in Betracht. Es findet nicht nur abrasiver, sondern auch Verschleiß durch Ermüdung statt. Dabei kommt es durch Spannungen innerhalb des Materials zu Ribbildung und Ribausbreitung. Schließlich vereinigen sich die Risse, so daß größere Stücke des Materials herausbrechen. Dieser

Vorgang, den Suh (1987) als „delamination wear“ beschreibt, führt zu einem zu einem höheren Materialverlust, zum anderen aber auch zu einer rauheren Oberfläche. Die wiederum begünstigt weitergehenden Verschleiß und einen weiteren Anstieg der Verschleißrate.

Eine weitere denkbare Ursache für die ansteigende Verschleißkurve könnte folgende Überlegung sein: Herausgelöste Füllkörper und Verschleißpartikel bleiben um so länger zwischen Probe und Antagonist, je größer die Kontaktfläche ist. Solange die Partikel unter der Last des Antagonisten bewegt werden, führen sie durch Mikropflügen und Kratzen zu zusätzlichem Verschleiß. Die Antagonistenfläche von Tetric ist groß, morphologisch können jedoch keine Kratzer nachgewiesen werden.

Zunehmende Verschleißraten wurden auch von Bailey (1981), Mc Kinney (1982) und für Tetric von Holzner-Hartmannsgruber (1997) festgestellt. Allerdings führen diese ihre Versuche mit Pin-on-disk-Maschinen durch, zum Teil unter Verwendung von Stahlantagonisten (Mc Kinney 1982). Dabei wurde die zunehmende Verschleißrate von allen als Materialermüdung interpretiert.

Die rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen führen in Bezug auf die zunehmende Verschleißrate zu keinem weiteren Ergebnis.

Da Tetric mit 6 % den geringsten Variationskoeffizienten aller geprüften Materialien hat, kann ein Meßfehler ausgeschlossen werden.

5.2 Verschleißfestigkeit der getesteten Füllungsmaterialien

In Bezug auf die Verschleißfestigkeit erzielten die Mikrofüllerkomposite (Durafill VS, Heliomolar RO, Metafill CX) und das Feinstpartikelhybridkomposit mit porösen Füllkörpern (Solitaire) die besten Ergebnisse.

Das Hybridkomposit (Estilux Hybrid) und Pertac II schneiden hochsignifikant schlechter ab als die übrigen Feinstpartikelhybridkomposite. Beide besitzen große Füllkörper innerhalb ihrer Materialgruppe. Pertac II ist das einzige quarzgefüllte Komposit. Die Komposiere weisen erwartungsgemäß die geringste Abriebfestigkeit auf.

Es gibt mehrere mögliche Ansätze, Verschleiß, d. h. den Materialverlust von Kompositen zu erklären.

Grundsätzlich hängt der Verschleiß von verschiedenen Parametern des Prüfkörpers und des Gegenkörpers ab. Dazu gehören Art, Form, Größe, Ausrichtung und Volumenanteil der Füllkörper und der Matrix sowie die Beschaffenheit des Gegenkörpers.

Bessere Verschleißfestigkeit von Kompositen im Kontaktabrieb wird durch Verwendung von möglichst vielen und kleinen Füllkörpern erreicht. Damit wird der Abstand zwischen den Partikeln so klein wie möglich gehalten. Kleinere Partikel ragen weniger aus der Oberfläche heraus. Die beanspruchte Fläche bleibt relativ glatt und der Verschleiß durch Abrasion wird so gering gehalten (Mair 1996). Außerdem wird die weniger verschleißresistente Matrix durch die kleinen, eng beieinander liegenden Füllkörper gut vor Abrieb geschützt (Bayne 1992).

Wenn die Oberfläche rauh ist, weil große Partikel aus der Oberfläche herausragen, werden diese im Lauf der mechanischen Beanspruchung herausgerissen oder geglättet (Scheufele 2000). Die so entstehenden Defekte durch herausgerissene Partikel führen zu höheren Verschleißwerten. Diese Defekte sind in den rasterlektronenmikroskopischen Aufnahmen der Verschleißflächen zu sehen.

Eine weitere mögliche Erklärung für die hohe Verschleißfestigkeit der Mikrofüller und die geringe Verschleißfestigkeit der Hybrid- und Feinstpartikelhybridkomposite ist die unterschiedliche Größe der Füllkörper. Abhängig von ihrer Größe hinterlassen herausgelöste Füllkörper Kratzspuren im Füllungsmaterial und erhöhen damit den Verschleiß. Je größer die Füllkörper, desto höher der Verschleiß.

Bestätigt wird diese Hypothese durch die Tatsache, daß Mikrofüllerkomposite nur in der okklusalen Kontaktzone (OCA) verschleißfester als Hybrid- und Feinstpartikelhybridkomposite sind. In der kontaktfreien Zone (CFA) wie sie in der ACTA-Maschine simuliert wird, sind Mikrofüllerkomposite weniger verschleißfest als Hybrid- und Feinstpartikelhybridkomposite (Kunzelmann 1998).

Daß der Verschleiß der Füllungsmaterialien von der Größe der Füllkörper abhängt, konnte statistisch belegt werden. Beim Vergleich des Rankings des Höhenverlustes der Füllungsmaterialien mit dem Ranking der von den Herstellern angegebenen maximalen Füllkörpergrößen ergibt sich ein hochsignifikanter Korrelationskoeffizient nach Pearson von 0,783.

Alle diese Hypothesen werden von den vorliegenden Ergebnissen bestätigt und sind mögliche Erklärungen für geringen Verschleiß von Mikrofüllerkompositen.

Fraglich ist, warum das Feinstpartikelhybridkomposit mit porösen, großen Füllkörpern (Solitaire) im Kausimulator eine ebenso hohe Verschleißfestigkeit aufweist wie die Mikrofüllerkomposite. Ähnlich wie bei Mikrofüllerkompositen kommt es bei Solitaire nicht zu tiefen Kratzspuren, da der poröse Füllkörper bei Beanspruchung schnell „abgehobelt“ wird. Die entstehenden kleinen Verschleißpartikel erzeugen nur geringe Kratzspuren, ähnlich wie Verschleißpartikel von Mikrofüllerkompositen. Das wäre eine mögliche Erklärung, warum ein Material mit großen, porösen Füllkörpern in der okklusalen Kontaktzone ebensowenig Verschleiß aufweist wie Mikrofüllerkomposite.

Eine andere denkbare Ursache für den geringen Verschleiß von Solitaire wäre der geringe Abstand zwischen den Füllkörpern, denn geringe Abstände durch kleine Füllkörper und einen hohen Volumenteil der Füllkörpern führen zu hoher Verschleißfestigkeit des Materials (Kunzelmann 1998). Der Füllkörperanteil ist mit 90 Volumenprozent bei Solitaire sehr hoch, jedoch sind die porösen Füllkörper mit bis zu 22 µm so groß, daß diese Vermutung allein nicht zutreffen kann.

Eine Erklärungsmöglichkeit dafür wäre, daß sich der poröse Füllkörper wie ein Schwamm gegenüber dem Matrixmaterial verhält. Die Matrix wird aufgesogen. Beim Abrieb des Materials entspricht der von Matrix durchzogene Füllkörper dann vielen kleinen, von Matrix umgebenen Füllkörpern. Die weichen, bimssteinartigen Füllkörper werden abgespannt und nicht herausgerissen. Der Verlust ganzer Füllkörper würde den Verschleiß deutlich erhöhen.

Das Verschleißverhalten der Komomere könnte ebenfalls mit den Hypothesen von Bayne (1992) und Mair (1996) erklärt werden. Dyract AP (0,8 µm durchschnittliche Partikelgröße) weist in dieser Materialgruppe den geringsten Verschleiß auf, Hytac (5 µm durchschnittliche Partikelgröße) den höchsten.

Weitere Hypothesen sind die Theorien von Scheufele (2000) und Axén (1994), die die Zahl der Mikrokontakte zwischen Antagonist und Füllungsmaterial mit in die Betrachtung einbeziehen. Je kleiner die Füllkörper des Füllungsmaterials, desto mehr Mikrokontakte gibt es, auf die sich die Gesamtlast des Antagonisten verteilt. Die geringere Last pro Mikrokontakt führt zu geringerem Verschleiß. Das würde erklären, warum das Kompomer mit den kleinsten Füllkörpern, Dyract AP, den geringsten Verschleiß aufweist.

Leinfelder (1986) erklärt den höheren Verschleiß von Kompositen mit größeren Füllkörpern mit einer kleineren Kontaktfläche zwischen Füllungsmaterial und Antagonist im Vergleich zu Kompositen mit vielen kleinen Füllkörpern. Bei

Materialien mit großen Füllkörpern ist die Belastung pro Fläche höher, die auf die umliegende Matrix übertragen wird. Es kommt zu internen Spannungen, die Mikrorisse in der Matrix zur Folge haben, die sich verbinden und ein Herausbrechen der Füllkörper zur Folge haben.

Auch das könnte eine Ursache für den höheren Verschleiß von Hybridkompositen mit großen Füllkörpern sein.

Die größte Rolle beim unterschiedlichen Verschleiß von Hybrid- bzw. Feinstpartikelhybridkompositen und Mikrofüllerkompositen spielt wahrscheinlich, daß die Füllkörper und damit auch die Verschleißpartikel der Hybridkomposite größer sind als die der Mikrofüllerkomposite. Dann würden die Verschleißpartikel von Hybridkomposit zu mehr Verschleiß führen als die Verschleißpartikel der Mikrofüllerkomposite. Das entspricht der Wirkung von Schleifpapierpartikeln, die umso mehr Verschleiß verursachen, je größer sie sind (Harrison 1985).

Hinzu kommt, daß laut Draughn (1978) der Verschleiß am größten ist, wenn das Abrasivmedium die gleiche Größe hat, wie die Füllkörper, bzw. die sich lockernden Verschleißpartikel. Das träfe im Fall der herausgerissenen Füllkörper, bzw. Verschleißpartikel zu. Dem widerspricht die Feststellung von Harrison (1985), daß der geringste Verschleiß vorliegt, wenn Abrasiv und Füllkörper in gleicher Größenordnung vorliegen.

Untersuchungen mit der ACTA-Maschine (Pallav 1989) und einem Pin-on-disk-Aufbau (Rice 1984 b) bestätigen die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit, daß Hybridkomposite stärker verschleifen als Mikrofüllerkomposite. Die gleiche Beobachtung wurde auch im Kausimulator gemacht (Kunzelmann 1998).

Sindel (1998) untersucht Komposite im ACTA-Kausimulator. Er erklärt das schlechte Abschneiden von Kompomeren mit der für das Material typischen erhöhten Wasseraufnahme, die den Verbund zwischen Matrix und Füllkörper schwächt. Als weiteren Grund für den hohen Verschleiß von Dyract AP gibt er den niedrigen Volumenanteil der Füllkörper (50 % Vol.) im Vergleich zu Kompositen (Tetric 61 % Vol.) an.

Das erklärt aber nicht das deutlich schlechtere Verschleißverhalten der übrigen hier getesteten Kompomere, für die ein höherer Volumenanteil der Füllkörper (55 % Vol.) als für Dyract AP angegeben wird.

Eine mögliche Erklärung für die geringere Verschleißfestigkeit der Kompomere könnten die unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften der verschiedenen, als Füllkörper verwendeten Gläser sein.

Auch der Verbund von Matrix und Füllkörpern könnte einen Einfluß auf die Verschleißfestigkeit haben.

Wahrscheinlich ist die Ursache für die geringe Verschleißfestigkeit der Kompomere jedoch die Matrix, welche leichter Wasser aufnimmt, als andere Komposite. Dadurch wird die Matrix weicher und ist so weniger verschleißbeständig.

Innerhalb der Mikrofüllerkomposite weist Heliomolar RO als einziges Material eine ansteigende Verschleißkurve auf. Dafür gibt es zwei Hypothesen:

In Heliomolar RO sind Yterbiumtrifluorid-Füllkörper enthalten. Diese sind nicht silanisiert und können daher leicht aus dem Füllungsmaterial herausgelöst werden. In der Oberfläche entstehen durch die herausgerissenen Füllkörper große Löcher, die den Verschleiß des Füllmaterials weiter beschleunigen. Schon Powers (1976) hatte in einem Scratchtest zur Untersuchung von Versagensmechanismen aufgezeigt, daß nichtsilanisierte Füllkörper früher versagen als Materialien mit silanisierten

Füllkörpern. Für diese Hypothese spricht, daß auf den REM-Bildern Defekte durch herausgerissene Füllkörper zu erkennen sind.

Die Yterbiumtrifluorid-Füllkörper in Heliomolar RO, mit einer größeren durchschnittlichen Partikelgröße als die übrigen Füllkörper in Heliomolar RO und den anderen beiden Mikrofüllerkompositen, könnten aber auch zu einem höheren Verschleiß der Antagonisten führen. Der Verschleiß der Antagonisten hätte eine Vergrößerung der Kontaktfläche zur Folge. Man könnte dann davon ausgehen, daß unter der größeren Kontaktfläche mehr lose Verschleißpartikel zu mehr Verschleiß führen.

Die Kontaktflächen der Antagonisten von Heliomolar RO und Durafill VS sind aber gleich groß. Das zeigt, daß der Antagonist durch Yterbiumtrifluorid nicht stärker verschleißt und eine größere Antagonistenkontaktfläche als Ursache für den höheren Verschleiß von Heliomolar RO nicht in Frage kommt.

5.3 Betrachtung der Oberflächen unter dem Rasterelektronenmikroskop

Nach Abschluß der 50 000 Zyklen wurde die Verschleißspur je einer Probe aller getesteten Materialien unter dem Rasterelektronenmikroskop betrachtet.

Die Mikrofüllerkomposite (Durafill VS, Heliomolar RO, Metafill CX) und zwei Kompomere (Dyract AP und Compoglass F) weisen, verglichen mit den übrigen getesteten Materialien, bei 1000- und 4000-facher Vergrößerung eine relativ glatte Oberfläche auf. Bei Metafill CX und Durafill VS sind die Präpolymerisate im Vergleich zur Matrix erhaben.

Eine mögliche Ursache für die glatten Oberflächen sind relativ kleinen Partikel dieser Komposite, die kaum aus der Oberfläche herausragen können.

Eine weitere Erklärung für die relativ glatte Oberfläche könnte die Zusammensetzung der Materialgruppe sein (Singer 1996). Die entsprechenden Komposite bestehen entweder zu einem Teil oder im Fall von Metafill CX ganz aus organischen Füllkörpern. Diese verschleifen schneller als anorganische Füllkörper. Sie werden abradiert und weniger aus dem Polymerverbund herausgerissen.

Diese Beobachtung der glatten Oberflächen würde auch die Hypothese von Mair (1996) bestätigen. Er führt den geringen Verschleiß von Mikrofüllerkompositen auf die relativ glatte beanspruchte Fläche zurück (siehe 5.2).

Die erhabenen Präpolymerisate könnten eine Folge der unterschiedlichen E-Module von Matrix und Füllkörpern sein. Wenn das E-Modul des Füllkörpers größer ist als das der ihn umgebenden Matrix, wird das Präpolymerisat bei Belastung durch den Antagonisten in die Tiefe gedrückt. Ist der Kontakt zwischen Antagonist und Präpolymerisat wieder aufgehoben, wird das Präpolymerisat entlastet und tritt wieder aus der planen Oberfläche hervor. Durch diese Bewegung zwischen Füllkörper und Matrix kommt es zu Spannungen in der Umgebung der Präpolymerisate. Diese Spannungen führen zu Materialermüdung, die die in der REM-Auswertung beobachteten Risse zur Folge hat.

Das Hybridkomposit (Estilux Hybrid) und die Feinstpartikelhybridkomposite (Pertac II, Tetric, Z 100, TPH-Spectrum, Degufill Ultra, Charisma, Pertac Hybrid, Charisma F, Arabesk) zeigen unterschiedlich große plane Bereiche und raue Vertiefungen. Eine mögliche Erklärung für die Flächen und Vertiefungen, die bei besonders verschleißstarken Materialien mit verhältnismäßig großen Füllkörpern (Estilux

Hybrid, Pertac II, Tetric, Z 100, TPH-Spectrum) besonders offensichtlich sind, wäre das Herausbrechen von Materialpartikeln aus der Oberfläche.

Zum Gahr (1992) beschreibt dieses Materialversagen als "Mikrobrechen" infolge von Ribbildung und Ribwachstum, besonders bei spröden, weniger bei duktilen Materialien. Die von ihm beschriebenen Risse konnten in Rasterelektronenmikroskopaufnahmen der vorliegenden Arbeit beobachtet werden. Die senkrecht stehenden, abgesprengt wirkenden Bruchflächen des Hybridkomposites sind ein weiterer Anhaltspunkt dafür, daß die Partikel herausgebrochen und nicht herausgelöst worden sind. Die aufgewölbten Ränder der planen Flächen (Pertac Hybrid, Charisma F) weisen auf das beginnende Herausbrechen von Partikeln hin. Kompomere mit großen Füllkörpern (Hytac, Compoglass) zeigen durch plane Flächen und raue Vertiefungen morphologisch ähnliche Ergebnisse.

Die verschleißarmen Feinstpartikelhybridkomposite und Kompomere mit kleinen Füllkörpern (Solitaire, Arabesk, Artglass, Dyract AP, Compoglass F) zeigen viele Risse und nur wenige, flache Vertiefungen.

Die Beobachtung der ausgeprägten planen Bereiche und rauhen Vertiefungen, der Risse und der senkrechten Bruchflächen, besonders bei Kompositen mit großen Füllkörpern, führt zu der Annahme, daß hoher Verschleiß von Materialien mit großen Füllkörpern als abrasiver Verschleiß durch Mikrobrüche erklärt werden kann. Der Prozeß des Mikrobrechens wird durch eine zunehmende Größe der abrasiven Teilchen, durch eine abnehmende Bruchzähigkeit und durch eine zunehmende Härte des verschleißenden Werkstoffes begünstigt (Czichos 1992).

Schon in einer früheren Untersuchung mit dem Kausimulator München (Kunzelmann 1998), bei der parallel zu Tischebene plan geschliffene Degussit-Pins verwendet

wurden, weisen Hybridkomposite in rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen raue Vertiefungen und plane Flächen auf.

Suh (1986) hat das Herausbrechen von Partikeln als ermüdungsbedingten Verschleiß beschrieben.

Eckfeldt (1988) stellte in einer In-vivo-Studie Verschleiß durch Ermüdung für lighthärtende Komposite fest. In der klinischen Untersuchung zum Verschleiß von lighthärtendem Komposit gegen Kunststoff- und Porzellanzähne fand er die gleichen rauen Vertiefungen, wie sie in der vorliegenden Arbeit beobachtet wurden. Diese wurden von ihm als Defekte infolge von Materialverlust durch Mikrobrüche interpretiert.

5.4 Abrasivität der Komposite auf den Antagonisten

Bei der Untersuchung der Verschleißfestigkeit von Füllungsmaterialien muß auch die Wirkung auf den Gegenzahn bzw. den Antagonisten mit einbezogen werden (Mair 1996).

Das Hybridkomposit (Estilux Hybrid) und die Feinstpartikelhybridkomposite (Pertac II, Tetric, Z 100, TPH-Spectrum, Degufill Ultra, Charisma, Pertac Hybrid, Charisma F, Arabesk) wirkten auf den Antagonisten deutlich abrasiver, als mikrogefüllte Komposite (Durafill VS, Heliomolar RO, Metafill CX). Eine den Mikrofüllern ähnlich geringe Abrasivität zeigte das Füllungsmaterial mit porösen Füllkörpern (Solitaire). Kaum abrasive Wirkung gegenüber dem Antagonisten konnte für die Kompomere (Dyract AP, Compoglass F, Compoglass) mit einer Ausnahme (Hytac) festgestellt werden. Eine mögliche Erklärung für die deutlich abrasive Wirkung von Hytac sind seine, im Vergleich zu den übrigen Kompomeren, großen Füllkörper.

Die in dieser Arbeit beobachteten Verschleißcharakteristika decken sich mit den Beobachtungen früherer Studien. Lutz (1992) und Wassel (1994) beschreiben, daß sich Hybridkomposite deutlich abrasiver gegenüber dem Antagonisten verhalten als Mikrofüllerkomposite.

Holzner-Hartmannsgruber (1997) stellt mit Degussitpins in einer Pin-on-disk-Maschine mit Estilux Hybrid den höchsten, mit Dyract AP den geringsten Abrieb am Antagonisten fest.

Um die unterschiedliche Abrasivität der Materialien zu verstehen, gibt die tribologische Literatur Aufschlüsse. Abrasion tritt in tribologischen Kontakten auf, wenn der Gegenkörper beträchtlich härter und rauher ist als der beanspruchte Grundkörper (Czichos 1992).

Komposite setzen sich aus harten Füllkörpern und einer vergleichsweise weichen Matrix zusammen. Also kann davon ausgegangen werden, daß die Abrasivität, die auf den Antagonisten wirkt, von den Füllkörpern ausgeht.

Füllkörper, die aus der Oberfläche herausragen, wirken wie Schleifpartikel und führen so zum Verschleiß des Antagonisten (Mair 1996). Dieser „Schleifvorgang“ würde die feinen Rillen entsprechend der Bewegungsrichtung, die auf den Antagonisten beobachtet wurden, erklären.

Des weiteren können lose Verschleißpartikel zwischen Grundkörper und Gegenkörper trotz ständiger Spülung des tribologischen Systems nicht ausgeschlossen werden. Denn so lange sich die Verschleißpartikel zwischen Antagonisten und Probe befinden, können sie nicht weggespült werden. Sie können so lange nicht nur auf das Füllungsmaterial, sondern möglicherweise auch auf den Antagonisten eine abrasive Wirkung ausüben.

Bei der morphologischen Verschleißanalyse der Mikrofüllerkomposite und Kompomere mit kleinen Füllkörpern zeigen sich glatte Oberflächen. Bei Hybridkompositen sind die Oberflächen, abhängig von der Füllkörpergröße, verhältnismäßig rauh. Daraus läßt sich die Vermutung ableiten, daß die abrasive Wirkung eines Werkstoffes hinsichtlich des Antagonisten von der Größe und der Härte der Abrasivpartikel abhängen könnte, sowie davon, wie weit die Partikel aus der Oberfläche herausragen (Mair 1996). Das würde erklären, warum Mikrofüllerkomposite mit weichen Präpolymerisaten und Kompomere mit kleinen Füllkörpern die Antagonisten weniger schädigen als Hybridkomposite.

Die Antagonisten des Hybridkomposites Estilux Hybrid, das besonders große Füllkörper enthält, sind stärker abradert als die der Feinstpartikelhybridkomposite, deren Füllkörper kleiner sind. Das bestätigt die Annahme, daß die Größe der Füllkörper die Abrasion der Antagonisten beeinflusst.

Die Annahme, der Antagonistenverschleiß hänge vor allem von der Härte der Füllkörper ab, wurde nicht bestätigt. Dazu hätte das quarzgefüllte Feinstpartikelhybridkomposit Pertac II zu einer starken Abrasion des Antagonisten führen müssen. Dies konnte bei der Auswertung der Antagonisten nicht festgestellt werden.

Da es sich bei der geringen Korrelation zwischen dem Höhenverlust der Proben und der Antagonistenkontaktfläche um ein hochsignifikantes Ergebnis handelt, muß nach Ursachen für die geringe Korrelation gesucht werden.

Erwartungsgemäß müßte die Kontaktfläche mit zunehmender Tiefe der Verschleißspur größer werden, da es sich bei dem Antagonisten um eine Kugel handelt. Weil aber die Antagonisten abhängig vom Material zum Teil nicht sichtbar verschleifen, ist allein durch die optische Festlegung der Kontaktfläche eine völlige Übereinstimmung nicht denkbar.

Da einige Materialien eine auffällig hohe Variationsbreite haben, sollte eine weitere Überlegung geprüft werden: Die Variationsbreite könnte dann hoch sein und folglich zu einer geringeren Korrelation führen, wenn die Verschleißfläche auf dem Antagonisten nicht scharf begrenzt ist. Diese Vermutung trifft aber nur für Durfill VS zu.

Schließlich können neben materialbedingten Streuungen Ungenauigkeiten beim Vermessen der Flächen nicht ausgeschlossen werden.

Beim Vergleich des Rankings der Antagonistenflächen mit dem Ranking der von den Herstellern angegebenen maximalen Füllkörpergrößen zeigt der hohe Korrelationskoeffizient nach Pearson von 0,834, daß die Füllkörpergröße ein entscheidender Faktor für den Verschleiß des Antagonisten sein muß.

Das wird noch deutlicher, wenn bei Materialien mit gleicher maximaler Füllkörpergröße die gesamte Füllkörpermenge, das heißt der Füllergehalt in Gewichtsprozent, berücksichtigt wird: Der Korrelationskoeffizient nach Pearson erhöht sich auf 0,908.

Die Schlußfolgerung daraus ist, daß der Antagonistenverschleiß wesentlich von der Größe und der Menge der Füllkörper abhängig ist.

5.5 Diskussion der Fehlermöglichkeiten und Optionen für zukünftige Verschleißsimulationen im Kausimulator

Während der Durchführung der Versuche mit dem Kausimulator München und der anschließenden Auswertung sind einige Kritikpunkte an der Methodik aufgetreten, die möglicherweise auch die hohen Streuungen einiger Ergebnisse der quantitativen Abriebsmessung erklären.

Abschließend sollen diese Punkte besprochen und mögliche Weiterentwicklungen für zukünftige Verschleißsimulationen mit dem Kausimulator überlegt werden.

In den acht Kammern des Kausimulators herrschen nicht immer identische Versuchsbedingungen. Das größte technische Problem war während aller Versuchsläufe die gleichmäßige Spülung der einzelnen Kammern. Wie bereits im Zusammenhang mit der Verschleißfestigkeit von Füllungsmaterial und Antagonist besprochen (siehe 5.2 und 5.4), wirken nicht entfernte Verschleißpartikel in der Spur als zusätzliches, unerwünschtes Abrasiv. Wünschenswert wäre eine gleichbleibende Spülung der Kammern, also eine gleichbleibende Durchflußmenge, ein gleichbleibender Strahl und Zielpunkt.

Sinnvoll wäre es, die Pumpe, die über einen Verteiler alle acht Kammern versorgt, durch je eine einzelne Pumpen für jede Kammer zu ersetzen. Damit wäre eine konstante Durchflußmenge für jede Kammer regelbar. Bei der Umsetzung spielt der höhere Platzbedarf und der finanzielle Mehraufwand eine entscheidende Rolle.

Darüber hinaus könnte die morphologische Analyse der Verschleißpartikel weitere Erkenntnisse bringen. Dazu müßten diese jedoch in separaten Filtern oder Sedimentationsbecken hinter jeder einzelnen Kammer gesammelt werden.

Der Verschleiß wurde nur zu empirisch festgelegten Zeiten gemessen. Eine interessante Verbesserung wäre die Online-Messung des Verschleißes. Damit hätte man eine durchgehende Messung des Verschleißes im zeitlichen Verlauf. Änderungen im Abriebverhalten ließen sich zeitlich genau ermitteln. Ein zusätzlicher Vorteil wäre eine verkürzte Versuchszeit, wie sie bereits Cornell (1957) gefordert hat. Die aufwendige Herstellung von Repliken zur Ermittlung des Verschleißvolumens würde entfallen. Ob damit auch finanziell eine Einsparung zu erzielen wäre, hängt von den Installationskosten der Online-Messung ab.

Bei der Herstellung der Prüfkörper wurden in einigen Fällen material- oder herstellungsbedingte Blasen und Poren beobachtet. Dabei handelt es sich nicht unbedingt um einen methodischen Fehler, sondern um ein Problem der Herstellung, da nur die Prüfkörper bestimmter Materialien Blasen aufwiesen. Diese Blasen und Poren könnten eine Ursache für die festgestellten Streuungen und sogenannte Ausreißer innerhalb der Ergebnisse einiger Materialien sein.

Bezüglich der Auswertung der Antagonisten konnte nur eine geringe Korrelation zwischen dem Materialverschleiß und der Verschleißfläche der Antagonisten festgestellt werden.

Die Tatsache, daß keine völlige Übereinstimmung der Rankings gefunden wurde, liegt zu einem Teil in der Methode der Auswertung mit dem Lichtmikroskop. Für 3 von 19 Materialien war die Auswertung der Antagonisten unter dem Lichtmikroskop nicht möglich. Sinnvoll wäre auch hier eine quantitative Verschleißmessung, die bis jetzt nicht realisiert werden konnte. Der Volumenverlust, den man messen kann, ist so gering, wie die zu erwartenden Meßfehler, d. h. die Streuung liegt in der gleichen Größenordnung, wie die Meßwerte. Durch ein genaueres Meßverfahren könnte man die Streuung minimieren, und käme so zu brauchbaren Ergebnissen.

Im Rahmen der morphologischen Verschleißanalyse wurden keine Aufnahmen von den Proben vor der Verschleißsimulation angefertigt. Vermutlich hätte sich diese Bilder als aufschlußreich erweisen können, ob tatsächlich beim Ausarbeiten der Proben eine oberflächliche Schädigung des Materials stattfindet, wie von Leinfelder (1985) angenommen.

Weiterhin wurden nicht alle Proben von jedem Material morphologisch analysiert, so daß nicht gänzlich ausgeschlossen werden kann, daß andere Proben des gleichen Materials zu weiteren morphologischen Erkenntnissen geführt hätten.

Ebenfalls kritisch betrachtet werden müssen alle Korrelationskoeffizienten, die sich aus dem Vergleich des Rankings der Antagonistenfläche mit dem Ranking der von den Herstellern angegebenen maximalen Füllkörpergrößen ergeben haben. Die Herstellerangaben sollten nicht ungeprüft übernommen werden. Verlässlicher wäre die Vermessung der Füllkörper anhand von sogenannten plasmageätzten Prüfkörpern. Dabei wird die Matrix herausgelöst um die einzelnen Füllkörper sichtbar zu machen.

Bei der statistischen Auswertung wurde keine Korrelation der eigenen In-vitro-Daten mit In-vivo-Ergebnissen durchgeführt. Das ist insofern schwierig, da es wenige klinische Studien gibt, die mehrere Materialien unter gleichen Bedingungen anwenden und auswerten. Die Anzahl der In-vivo-Studien ist zu klein, um ihre Ergebnisse statistisch auswerten zu können. Es wäre allenfalls möglich, den klinischen Erfolg eines Materials grob abzuschätzen.

Auch für die vorliegende Arbeit gilt: Acht Proben von jedem Füllungsmaterial sind statistisch betrachtet wenig. Die einzelnen Meßergebnisse liegen jedoch sehr dicht beieinander. Darum führt ein bloßes Erhöhen der Fallzahl nicht zwingend zu genaueren Ergebnissen.

Der durchschnittliche Variationskoeffizient aller Materialien beträgt 16 %. Dieser niedrige Variationskoeffizient spricht für die angewandte Methode, die weiter verfeinert werden sollte.

6 Schlußfolgerung

Durch die Auswertung der Ergebnisse im zeitlichen Verlauf konnten der Verschleiß im Kausimulator in zwei Verschleißstadien eingeteilt werden: eine Running-in-Phase und ein Steady-state-Bereich. Bei einem Material wurde beschleunigter Verschleiß durch Schadensakkumulation festgestellt.

- Der Vergleich der Verschleißraten der getesteten Materialien ist nur zu einem Zeitpunkt sinnvoll, zu dem alle Materialien linear verschleifen, also während der Steady-state-Phase. Da zu keiner Zeit ein linearer Verschleiß aller Materialien vorlag, wurde auf den Vergleich der Verschleißraten verzichtet. Ein Vergleich des absoluten Verschleißes ist jedoch sinnvoll.

Die Materialgruppen sowie einzelne Materialien unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Verschleißfestigkeit und Verschleißmechanismen.

- Unter reiner okklusaler Belastung weisen Composite mit einem hohen Anteil kleiner Füllkörper und geringer durchschnittlicher Füllkörpergröße eine höhere Verschleißfestigkeit auf, als Materialien mit wenigen großen Füllkörpern.
- Durch große poröse Füllkörper kann eine ähnlich große Verschleißfestigkeit erreicht werden wie über einen hohen Anteil kleiner Füllkörper oder durch die Verwendung von Präpolymerisaten.
- Kompomere sind, unabhängig von ihrer Füllkörpergröße, für die okklusale Belastung am wenigsten geeignet.
- Bei Tetric classic weisen die zunehmende Verschleißrate und die morphologischen Ergebnisse darauf hin, daß es neben Abrasion zusätzlich zu Materialermüdung kommt.
- Aus der Untersuchung läßt sich schließen, daß das hinsichtlich der Verschleißfestigkeit im Kontakttrieb ideale Füllungsmaterial aus nur einer Phase

oder mehreren ähnlich verschleißfesten Phasen bestehen sollte. Im Idealfall bestehen Matrix und Füllkörper aus demselben Material.

Die REM-Bilder können helfen zu erklären, warum ein Material besonders hohen oder niedrigen Verschleiß zeigt.

- Innerhalb des abrasiven Verschleißes sind in der Kompositoberfläche unter den beschriebenen Versuchsbedingungen die Verschleißmechanismen Mikroermüdung und Mikrobrechen bestimmend. Besonders betroffen sind von diesen Verschleißmechanismen Hybrid- und Feinstpartikelhybridkomposite. Bei Materialien mit vielen kleinen Füllkörpern, mit großen porösen Füllkörpern oder Präpolymerisaten findet dieser Verschleiß nur in geringerem Maße statt.

Nach der Auswertung der Antagonisten unter dem Lichtmikroskop wurden diese Ergebnisse mit den Größenangaben für die Füllkörper verglichen. Es kann folgende Feststellung gemacht werden:

- Durch große Füllkörper und einen hohen Füllkörperanteil wird der Gegenkörper, unabhängig welcher Füllstoffklasse das Komposit angehört, besonders geschädigt.

Die Verschleißsimulation mit dem Kausimulator berücksichtigt nur den Zwei-Medien-Abrieb in der okklusalen Kontaktzone. Da in vivo in der kontaktfreien Zone auch ein Drei-Medien-Abrieb und Verschleiß durch tribochemische Reaktionen stattfindet, ist der durchgeführte Versuch alleine zur Vorhersage der klinischen Verschleißfestigkeit nur bedingt geeignet.

Um die Übereinstimmung mit klinischen Ergebnissen zu prüfen, ist der Vergleich der Rangfolge des Verschleißes zwar einfach, aber relativ unsicher, da gleiches Ranking unter verschiedenen Versuchsbedingungen nicht belegt, sondern nur versuchsweise begründet werden kann. Das Ranking könnte ebenso zufällig sein.

Statistische Korrelationen von In-vivo- und In-vitro-Ergebnissen sind mangels umfangreicher klinischer Studien schwierig. Besser geeignet ist der Vergleich der Verschleißmechanismen und der Morphologie der Oberflächen, da beide Vergleichsverfahren auch auf einzelne Materialien angewendet werden können.

Die vorliegende Arbeit zeigt, daß bei dem gewählten Versuchsaufbau acht Proben von jedem Material genügen, um zu signifikanten Ergebnissen zu kommen.

7 Zusammenfassung

Es wurde eine vergleichende Verschleißsimulation mit dem an der Universität München entwickelten Kausimulator „München“ durchgeführt.

Nach einem standardisierten Prüfverfahren war es möglich, eine größere Anzahl kommerziell verfügbarer Komposite zu testen. Weil der Kausimulator eine schnelle Versuchsdurchführung gewährleistet, konnten mehrere Materialien verschiedener Füllstoffklassen, die sich in ihrer Zusammensetzung erheblich unterscheiden, berücksichtigt werden. Dem Zusammenhang zwischen Verschleiß und Füllstoffsystem wurde besondere Beachtung geschenkt.

Bei den 19 getesteten Kompositen handelt es sich um zwei heterogene, Mikrofüllerkomposite, ein Hybridkomposit und neun Feinstpartikelhybridkomposite mit Ba-Al-Si-Gläsern deutlich unterschiedlicher Füllkörpergröße oder Quarzfüllkörpern, vier Kompomere deutlich unterschiedlicher Füllkörpergröße, sowie je ein Feinstpartikelhybridkomposit mit großen, porösen Füllkörpern, mit besonders hohem Mikrofülleranteil und ausschließlich organischen Füllkörpern sowie ein Feinstpartikelhybridkomposit mit hohem Matrixanteil.

Damit geringe bauliche Unterschiede der einzelnen Kammern nicht das Ergebnis der Materialien beeinflussen, wurde jedes Material in allen acht Prüfkammern getestet. Der Versuch wurde unter Verwendung von Degussit-Antagonisten nach dem Pin-on-Block-design durchgeführt.

Die Untersuchung kam zu hochsignifikanten Unterschieden im Abrasionsverhalten der getesteten Materialien. Die Ergebnisse zeigten, daß unter den getesteten Bedingungen Mikrofüllerkomposite und Feinstpartikelhybridkomposite aus rein

organischen Präpolymerisaten im Vergleich zu konventionellen Hybrid- und Feinstpartikelhybridkompositen die höchste Verschleißfestigkeit haben. Als ähnlich verschleißfest erwies sich ein Feinstpartikelhybridkomposit mit großen porösen Füllkörpern. Kompomere zeigten die geringste Verschleißfestigkeit.

Durch rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen konnte deutlich gemacht werden, daß die Verschleißmechanismen Mikroermüdung und Mikrobrechen an der Kompositoberfläche bestimmend sind.

Um festzustellen, ob Komposite eine unterschiedliche Abrasivität gegenüber den Antagonisten aufweisen, wurden alle Antagonisten unter dem Lichtmikroskop betrachtet. Durch große, harte Füllkörper, unabhängig welcher Füllstoffklasse das Komposit angehört, wird der Gegenkörper besonders geschädigt.

Es konnte gezeigt werden, daß ein Füllungsmaterial mit uniformer Struktur besonders verschleißresistent ist. Die Füllkörpern können nicht herausbrechen und die Abrasion bleibt gering. Zusätzlich schon die feine Oberfläche den Antagonisten. Eine uniforme Struktur, also geringe Abstände zwischen Matrix und Füllkörper, wird nicht nur durch möglichst kleine Füllkörper erreicht, wie dies bei Kompositen mit Präpolymerisaten der Fall ist. Ebenso gut eignen sich große poröse Füllkörper, die sich gegenüber der Matrix wie Schwämme verhalten, und rein organische Füllkörper.

8 Literaturverzeichnis

Axén, N., Jacobson, S.: A model for the abrasive wear resistance of multiphase materials. *Wear* 174, 187 (1994).

Bailey, W.F., Rice, S.L.: Comparative sliding-wear behavior of a dental amalgam and a composite restorative as a function of contact stress. *J Dent Res* 60, 731 (1981 a).

Bailey, W.F., Rice, S.L. Albert, R.L., Temin, S.C.: Influence of contact stress, sliding velocity and surface roughness on the sliding wear of a composite restorative. *J Dent Res* 60, 914 (1981 b).

Bayne, S.C., Taylor, D.F., Heymann, H.O.: Protection hypothesis for composite wear. *Dent Mater* 8, 305(1992).

Boddicker, V.S.: Abrasion tests for artificial teeth. *J Am Dent Assoc* 35, 793 (1947).

Braem, M., Finger, W., Van Doren, V.E., Lambrechts, P., Vanherle, G.: Mechanical properties and filler fraction of dental composites. *Dent Mater* 5, 346 (1989).

Coffey, J.S., Goodkind, R.J., DeLong, R., Douglas, W.H.: In vitro study of wear characteristics of natural and artificial teeth. *J Prosthet Dent* 54, 273 (1985).

Cornell, J.A., Jordan, J.S., Ellis, S., Rose, E.E.: A method of comparing the wear resistance of various materials used for artificial teeth. *J Am Dent Assoc* 54, 608 (1957).

Czichos, H. Habig, K.-H.: Tribologie-Handbuch, Reibung und Verschleiß. Vieweg, Braunschweig/Wiesbaden 1992.

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 (1986).

De Gee, A.J., Pallav, P.: Occlusal wear simulation with the ACTA wear machine. *J Dent* 22, Suppl 1, 21 (1994).

DeLong, R., Douglas, W.H.: Development of an artificial oral environment for the testing of dental restoratives: bi-axial force and movement control. *J Dent Res* 62, 32 (1983).

De Long, R., Sakaguchi, R.L., Douglas, W.H., Pintado, M.R.: The wear of dental amalgam in an artificial mouth: a clinical correlation. *Dent Mater* 1, 238 (1985).

Dickson, G.: Physical and chemical properties and wear. *J Dent Res* 58, 1535 (1979).

DIN 50320 Verschleiß: Begriffe, Systemanalyse von Verschleißvorgängen, Gliederung des Verschleißgebietes. Beuth, Berlin (1979).

DIN 53 754 Bestimmung des Abriebs nach dem Reibradverfahren. Beuth, Berlin (1977).

Dorsch, P.: Composite Füllungsmaterialien. Report aus Forschung und Entwicklung. Ivoclar-Vivadent, Schaan/Liechtenstein (1990).

Douglas, W.H., Sakaguchi, R.L., DeLong, R.: Frictional effects between natural teeth in an artificial mouth. *Dent Mater* 1, 115 (1985).

Draughn, R.A., Harrison, A.: Relationship between abrasive wear and microstructure of composite resin. *J Prosthet Dent* 40, 220 (1978).

Eichner, K.: Zahnärztliche Werkstoffe und ihre Verarbeitung. Hüthig, Heidelberg 1985.

Finger, W., Thiemann, J.: Correlation between in vitro and in vivo wear of posterior restorative materials. *Dent-Mater* 3, 280 (1987).

Friedrich, K.: Friction and wear of polymer composites. Elsevier, Amsterdam 1986.

Harrison, A., Lewis, T.T.: The development of an abrasion testing machine for dental materials. *J Biomed Mater Res* 9, 341 (1975).

Harrison, A., Draughn, R.A.: Abrasive wear, tensile strength, and hardness of dental composite resins - Is there a relationship? *J Prosthet Dent* 36, 395 (1976).

Harrison, A.: Effect of packing pressure on abrasion resistance of dental amalgams. *J Dent Res* 56, 613 (1977).

Harrison, A., Moores, G.E.: Influence of abrasive particle size and contact stress on wear rate of dental restorative materials. *Dent Mater* 1, 14 (1985).

Hellwig, E.: Einführung in die Zahnerhaltung. Urban & Schwarzenberg, München 1995.

Hickel, R.: Moderne Füllungswerkstoffe. *Dtsch Zahnärztl Z* 52, 572 (1997).

Holzner-Hartmannsgruber, F.: Entwicklung einer computergesteuerten Pin-on-disk-Maschine zur Zwei-Medien-Abriebsimulation dentaler Werkstoffe. Dissertation, Ludwig-Maximilians-Universität, München 1997.

Hutchings, I.M.: Tribology: Friction and wear of engineering materials. Hodder & Sloughton, Cambridge 1992.

Jagger, D.C., Harrison, A.: An in vitro investigation into the wear effects of unglazed, glazed and polished porcelain on human enamel. *J Prosthet Dent* 72, 320 (1994).

Kawai, K., Leinfelder, K.F.: Effect of surface penetrating sealants on the wear of composite resins. *J Dent Res* 71, SI, 635, Abst. 957 (1992).

Krejci, I., Reich, T., Albertoni, M., Lutz, F.: In-vitro-Testverfahren zur Evaluation dentaler Restaurationssysteme. 1. Computergesteuerter Kausimulator. *Schweiz Monatsschr Zahnmed* 100, 953 (1990 a).

Krejci, I., Albertoni, M., Lutz, F.: In-vitro-Testverfahren zur Evaluation dentaler Restaurationssysteme. 2. Zahnbürsten/Zahnpastenabrasion und chemische Degradation. *Schweiz Monatsschr Zahnmed* 100, 1164 (1990 b).

Krejci, I., Lutz, F.: In-vitro-Testverfahren zur Evaluation dentaler Restaurationssysteme. 3. Korrelation mit In-vivo-Resultaten. *Schweiz Monatsschr Zahnmed* 100, 1445 (1990 c).

Krejci, I., Heinzmann, H.L., Lutz, F.: Verschleiss von Schmelz, Amalgam und ihrer Schmelzantagonisten im computergesteuerten Kausimulator. Schweiz Monatsschr Zahnmed 100, 1285 (1990 d).

Krejci, I.: Zahnfarbene Restaurationen - Qualität, Potential und Indikationen. Hanser, München 1992 a.

Krejci, I., Lutz, F., Zedler, C.: Effect of contact area size on enamel and composite wear. J Dent Res 71, 1413 (1992 b).

Kunzelmann K.-H.: Verschleißanalyse und -quantifizierung von Füllungsmaterialien in vivo und in vitro. Shaker, Aachen 1998.

Leinfelder, K.F.: Evaluation of clinical wear of posterior composite resins. In: Vanherle G., Smith D.C. (Hrsg.): Posterior composite resin dental restorative materials. 3M Company, St. Paul, 501 (1985).

Leinfelder, K.F., Wilder, A.D., Teixeira, L.C.: Wear rates of posterior composite resins. J Am Dent Assoc 112, 829 (1986).

Leinfelder, K.F., Beaudreau, R.W., Mazer, R.B.: An in vitro device for predicting clinical wear. Quintessence Int 20, 755 (1989).

Lutz, F., Phillips, R.W., Roulet, J.F., Imfeld, T.H.: Kompositis - Klassifikation und Wertung. Schweiz Monatsschr Zahnmed 93, 914 (1983).

Lutz, F., Phillip, R.W., Roulet, J.F., Sectos, J.C.: In vivo and in vitro wear of Potential Posterior Composites. J Dent Res 63, 914 (1984).

Lutz, F., Krejci, I., Barbakow, F.: Chewing pressure vs. wear of composite and opposing enamel cusp. J Dent Res 71, 1525 (1992).

Mair, L.H., Stolarski, T.A., Vowles, R.W., Loyds, C.H.: Wear: mechanisms, manifestations and measurement. Report of a workshop. J Dent 24, 141 (1996).

Matsumura, H., Leinfelder, K.F.: Three-body wear of four types of light-activated composite resin veneering materials. Quintessence Int 25, 425 (1994).

Mc Kinney, J.E., Wu, W.: Relationship between subsurface damage and wear of dental restorative composites. J Dent Res 61, 1083 (1982).

Pallav, P., Davidson, C.L., De Gee, A.J.: Wear rates of composites, an amalgam, and enamel under stress-bearing conditions. J Prosthet Dent 59, 426 (1988).

Pallav, P., De Gee, A.J., Davidson, C.L., Erickson, R.L., Glasspoole, E.A.: The influence of admixing microfiller to small-particle composite resin on wear, tensile strength, hardness, and surface roughness. J Dent Res 68, 489 (1989).

Pelka, M., Ebert, J., Schneider, H., Krämer, N., Petschelt, A.: Comparison of two- and three-body wear glass-ionomers and composites. Eur J Oral Sci 104, 132 (1996).

Pelka, M., Frankenberger, R., Sindlinger, A., Petschelt, A.: Verschleißsimulation natürlicher Zahnhartsubstanzen im abrasiven Kontakt. Dtsch Zahnärztl Z 53, 61 (1998).

Phillips, R.W., Avery, D.R., Mehra, R., Swartz, M.L.: Observations on a composite resin for class II restorations: three year report. J Prosthet Dent 26, 68 (1971).

Pintado, M.R.: Characterization of two small-particle composite resins. *Quintessence Int* 21, 843 (1990).

Powell, J.M., Philips, R.W., Norman, R.D.: In vitro wear response of composite resin, amalgam, and enamel. *J Dent Res* 54, 1183 (1975).

Powers, J.M., Craig, R.G.: Wear of fluorapatit single crystals: I. A method for quantitative evaluation of wear. *J Dent Res* 51, 168 (1972 a).

Powers, J.M., Craig, R.G.: Wear of fluorapatit single crystals: II. Frictional behavior. *J Dent Res* 51, 605 (1972 b).

Powers J.M., Craig, R.G.: Wear of fluorapatit single crystals: III Classification of surface failure. *J Dent* 51, 661 (1972 c)

Powers J.M., Craig, R.G.: Wear of fluorapatit single crystals: IV. Influence of sliding direction on frictional behavior and surface failure. *J Dent Res* 51, 1019 (1973 a).

Powers J.M., Craig, R.G.: Wear of fluorapatit single crystals: V. Influence of environment on frictional behavior and surface failure. *J Dent Res* 1026 (1973 b).

Powers, J.M., Ludema, K.C., Craig, R.G.: Wear of fluorapatite single crystal: VI. Influence of multiple-pass sliding on surface failure. *J Dent Res* 52, 1032 (1973 c).

Powers, J.M., Allen, L.J., Craig, R.G.: Two-body abrasion of commercial and experimental restorative and coating resins and an amalgam. *J Am Dent Assoc* 89, 1118 (1974).

Powers, J.M., Roberts, J.C., Craig, R.G.: Surface failure of commercial and experimental restorative Resins. *J Dent Res* 55, 432 (1976).

Rice, S.L., Bailey, W.F., Pacelli, P.F., Balneck, W.R.: Influence of enamel stylus stiffness on the sliding-wear behavior of a composite restorative. *J Dent Res* 61, 493 (1982).

Rice, S.L., Bailey, W.F., Roto, M.: Wear behavior of a composite restorative and various styli in sliding contact. *J Dent Res* 63, 932 (1984 a).

Rice, S.L., Bailey, W.F., Wayne, S.F., Burns, J.A.: Comparative in vitro sliding-wear study of conventional, microfilled, and lightcured composite restoratives. *J Dent Res* 63, 1173 (1984 b).

Rootare, H.M., Powers, J.M., R.G.: Wear of Composites by Abrasive of Varying Hardness. *J Dent Res* 58, 1097 (1979).

Roulet, J.F.: Die Abrasion von Komposits. *Schweiz Monatsschr Zahnmed* 86, 413 (1976).

Roulet, J.F. Mettler, P., Friedrich, U.: Studie über die Abrasion von Komposits im Seitenzahnbereich - Resultate nach 3 Jahren. *Dtsch Zahnärztl Z* 35, 493 (1980).

Roulet, J.F.: Degradation of dental polymers. Karger, München 1987.

Sakaguchi, R.L., Douglas, W.H., DeLong R., Pintado, M.R.: The wear of a posterior composite in an artificial mouth: a clinical correlation. *Dent Mater* 2, 235 (1986).

Scheufele, P.P.: Einfluß experimenteller Parametervariationen am Kausimulator auf das In-vitro-Verschleißverhalten dentaler Komposite. Dissertation, Ludwig-Maximilians-Universität, München 2000.

Shinkai, K., Suzuki, S., Leinfelder, K.F., Katho, Y.: Effect of surface-penetrating sealant on wear resistance of luting agents. *Quintessence Int* 25,767 (1994 a).

Shinkai, K., Suzuki, S., Leinfelder, K.F., Katho, Y.: How heat treatment and thermal cycling affect wear of composite resin inlays. *J Am Dent Assoc* 125, 1467 (1994 b).

Sindel, J.: Simulation des Verschleißverhaltens von Kompositen. *Zahnärztl Mitt* 5, 514 (1998).

Singer, A.: Drei-Medien-Abrieb von Kompositen in einer 2-Achsen-Zahnbürstmaschine. Dissertation, Ludwig-Maximilians-Universität, München 1996.

Slack, J.C.: Preliminary method of testing abrasion hardness. *J Am Dent Assoc* 39, 47 (1949), zitiert nach: *Cornell, J.A., Jordan, J.S., Ellis, S., Rose, E.E.*: A method of comparing the wear resistance of various materials used for artificial teeth. *J Am Dent Assoc* 54, 608 (1957).

Suh, N.P.: Tribophysics. Prentice-Hall, New Jersey 1986.

Sulong, M.Z., Aziz, R.A.: Wear of materials used in dentistry: A review of the literature. *J Prosthet Dent* 63, 342 (1990).

Suzuki, S., Leinfelder, K.F.: Wear of enamel cusps opposed by posterior composite resin. *Quintessence Int* 24, 885 (1993).

Suzuki, S., Leinfelder, K.F.: An in vitro evaluation of a copolymerization type of microfilled composite resins. *Quintessence Int* 1, 59 (1994).

Suzuki, S., Leinfelder, K.F., Shinkai, K.: Wear resistance of resin cements. *Am J Dent* 8, 83 (1995 a).

Suzuki, S., Leinfelder, K.F., Kawai, K., Tsuchitani, Y.: Effect of particle variation on wear rates of posterior composites. *Am J Dent* 8, 173 (1995 b).

Tillitson, E.W., Craig, R.G., Peyton, F.A.: Friction and wear of restorative dental materials. *J Dent Res* 50, 149 (1971).

Wassel, R.W., McCabe J.F., Walls A.W.G.: A Two-body Frictional Wear Test. *J Dent Res* 73, 1546 (1994).

Williams, A.K.: A Clinical Comparison of Posterior Restorations of Adaptic, Addent 12 and Silver Amalgam. MSD thesis, Emory University School of Dentistry, 1970.

Wu, W., Toth, E.E., Moffa, J.F., Ellison, J.A.: Subsurface damage layer of in vivo worn dental composite restorations. *J Dent Res* 63, 675 (1984).

Zum Gahr, K.-H.: Microstructure and wear of materials. Elsevier, Amsterdam 1987.

Kodierung

Um eine systematische Auswertung aller Messungen zu gewährleisten, wurden alle Volumenverluste nach einem einheitlichen Schema kodiert. Der Kode besteht aus acht Ziffern. Die Läufe wurden in alphabetischer Reihenfolge mit zwei Buchstaben gekennzeichnet. Die erste Zahl benennt die Probenkammer, die folgenden vier stehen für die Anzahl der Zyklen (x 10). Die letzte dient lediglich als Kontrollzahl, falls eine Auswertung wiederholt wird.

Kodierung	Volumenverlust	Material
en106001	-12006000	Solitaire
en110001	-19191000	Solitaire
en130001	-44962000	Solitaire
en150001	-68403000	Solitaire
en206001	-16683000	Charisma
en210001	-21778000	Charisma
en230001	-69750000	Charisma
en250001	-130530000	Charisma
en306001	-10756000	Solitaire
en310001	-18419000	Solitaire
en330001	-45652000	Solitaire
en350001	-76919000	Solitaire
en406001	-14084000	Charisma
en410001	-19441000	Charisma
en430001	-71983000	Charisma
en450001	-135210000	Charisma
en506001	-10883000	Solitaire
en510001	-18509000	Solitaire
en530001	-50229000	Solitaire
en550001	-78612000	Solitaire
en606001	-21483000	Charisma
en610001	-33154000	Charisma
en630001	-85617000	Charisma
en650001	-147210000	Charisma
en706001	-13202000	Solitaire
en710001	-19679000	Solitaire
en730001	-44461000	Solitaire
en750001	-79020000	Solitaire
en806001	-25028000	Charisma
en810001	-38248000	Charisma
en830001	-108690000	Charisma
en850001	-178600000	Charisma
eo106001	-18608000	Charisma
eo110001	-30029000	Charisma
eo130001	-93842000	Charisma
eo150001	-163830000	Charisma
eo206001	-14513000	Solitaire
eo210001	-20748000	Solitaire
eo230001	-57319000	Solitaire

eo250001	-88940000	Solitaire
eo306001	-14447000	Charisma
eo310001	-27241000	Charisma
eo330001	-78163000	Charisma
eo350001	-134720000	Charisma
eo406001	-11674000	Solitaire
eo410001	-19691000	Solitaire
eo430001	-56253000	Solitaire
eo450001	-95101000	Solitaire
eo506001	-19722000	Charisma
eo510001	-33509000	Charisma
eo530001	-96194000	Charisma
eo550001	-160440000	Charisma
eo606001	-12661000	Solitaire
eo610001	-18261000	Solitaire
eo630001	-52410000	Solitaire
eo650001	-87484000	Solitaire
eo706001	-20770000	Charisma
eo710001	-30608000	Charisma
eo730001	-94787000	Charisma
eo750001	-164330000	Charisma
eo806001	-12826000	Solitaire
eo810001	-21366000	Solitaire
eo830001	-52786000	Solitaire
eo850001	-87781000	Solitaire
fa106001	-14961000	Durafill VS
fa110001	-20233000	Durafill VS
fa130001	-36971000	Durafill VS
fa150001	-52391000	Durafill VS
fa206001	-161060000	Estilux-Hybrid
fa210001	-210860000	Estilux-Hybrid
fa230001	-418120000	Estilux-Hybrid
fa250001	-572190000	Estilux-Hybrid
fa306001	-27743000	TPH-Spectrum
fa310001	-42617000	TPH-Spectrum
fa330001	-133940000	TPH-Spectrum
fa350001	-217540000	TPH-Spectrum
fa406001	-92120000	Pertac II
fa410001	-137540000	Pertac II
fa430001	-256020000	Pertac II
fa450001	-280910000	Pertac II
fa506001	-22675000	Heliomolar RO
fa510001	-10647000	Heliomolar RO
fa530001	-43154000	Heliomolar RO
fa550001	-76640000	Heliomolar RO
fa606001	-53000000	Z100
fa610001	-53280000	Z100
fa630001	-158340000	Z100
fa650001	-238620000	Z100
fa706001	-16653000	Tetric
fa710001	-32034000	Tetric
fa730001	-143010000	Tetric
fa750001	-264650000	Tetric
fa806001	-20144000	Degufill Ultra

fa810001	-32335000	Degufill Ultra
fa830001	-92854000	Degufill Ultra
fa850001	-152980000	Degufill Ultra
fb106001	-224000000	Estilux-Hybrid
fb110001	-291010000	Estilux-Hybrid
fb130001	-561330000	Estilux-Hybrid
fb150001	-759020000	Estilux-Hybrid
fb206001	-36957000	TPH-Spectrum
fb210001	-52653000	TPH-Spectrum
fb230001	-143520000	TPH-Spectrum
fb250001	-234840000	TPH-Spectrum
fb306001	-107280000	Pertac II
fb310001	-154870000	Pertac II
fb330001	-382860000	Pertac II
fb350001	-414130000	Pertac II
fb406001	-1057200	Heliomolar RO
fb410001	-9751000	Heliomolar RO
fb430001	-38178000	Heliomolar RO
fb450001	-72799000	Heliomolar RO
fb506001	-38715000	Z100
fb510001	-55337000	Z100
fb530001	-172980000	Z100
fb550001	-281170000	Z100
fb606001	-28330000	Tetric
fb610001	-46326000	Tetric
fb630001	-172550000	Tetric
fb650001	-296830000	Tetric
fb706001	-15269000	Degufill Ultra
fb710001	-23544000	Degufill Ultra
fb730001	-78522000	Degufill Ultra
fb750001	-137170000	Degufill Ultra
fb806001	-7502100	Durafill VS
fb810001	-12079000	Durafill VS
fb830001	-27160000	Durafill VS
fb850001	-48229000	Durafill VS
fc106001	-35177000	TPH-Spectrum
fc110001	-63554000	TPH-Spectrum
fc130001	-168700000	TPH-Spectrum
fc150001	-268970000	TPH-Spectrum
fc206001	-87464000	Pertac II
fc210001	-135420000	Pertac II
fc230001	-280900000	Pertac II
fc250001	-381820000	Pertac II
fc306001	-512830	Heliomolar RO
fc310001	-6267600	Heliomolar RO
fc330001	-36626000	Heliomolar RO
fc350001	-73383000	Heliomolar RO
fc406001	-39326000	Z100
fc410001	-56147000	Z100
fc430001	-147520000	Z100
fc450001	-218170000	Z100
fc506001	-16000000	Tetric
fc510001	-38165000	Tetric

fc530001	-162580000	Tetric
fc550001	-275350000	Tetric
fc606001	-18015000	Degufill Ultra
fc610001	-25695000	Degufill Ultra
fc630001	-90416000	Degufill Ultra
fc650001	-156810000	Degufill Ultra
fc706001	-1928900	Durafill VS
fc710001	-3904200	Durafill VS
fc730001	-24506000	Durafill VS
fc750001	-40216000	Durafill VS
fc806001	-188830000	Estilux-Hybrid
fc810001	-226540000	Estilux-Hybrid
fc830001	-381420000	Estilux-Hybrid
fc850001	-493790000	Estilux-Hybrid
fd106001	-35751	Pertac II
fd110001	-131710000	Pertac II
fd130001	-361950000	Pertac II
fd150001	-399210000	Pertac II
fd206001	-4380100	Heliomolar RO
fd210001	-11391000	Heliomolar RO
fd230001	-37263000	Heliomolar RO
fd250001	-75537000	Heliomolar RO
fd306001	-28053000	Z100
fd310001	-50171000	Z100
fd330001	-157990000	Z100
fd350001	-245180000	Z100
fd406001	-17128000	Tetric
fd410001	-33317000	Tetric
fd430001	-163090000	Tetric
fd450001	-306700000	Tetric
fd506001	-21837000	Degufill Ultra
fd510001	-36256000	Degufill Ultra
fd530001	-105670000	Degufill Ultra
fd550001	-173710000	Degufill Ultra
fd606001	-11473000	Durafill VS
fd610001	-20828000	Durafill VS
fd630001	-35274000	Durafill VS
fd650001	-46256000	Durafill VS
fd706001	-270590000	Estilux-Hybrid
fd710001	-344000000	Estilux-Hybrid
fd730001	-596440000	Estilux-Hybrid
fd750001	-778680000	Estilux-Hybrid
fd806001	-23294000	TPH-Spectrum
fd810001	-38781000	TPH-Spectrum
fd830001	-105570000	TPH-Spectrum
fd850001	-202130000	TPH-Spectrum
fe106001	-9958400	Heliomolar RO
fe110001	-24455000	Heliomolar RO
fe130001	-60174000	Heliomolar RO
fe150001	-96952000	Heliomolar RO
fe206001	-32465000	Z100
fe210001	-52851000	Z100
fe230001	-168280000	Z100

fe250001	-260760000	Z100
fe306001	-17629000	Tetric
fe310001	-34704000	Tetric
fe330001	-171820000	Tetric
fe350001	-320150000	Tetric
fe406001	-19529000	Degufill Ultra
fe410001	-36899000	Degufill Ultra
fe430001	-99052000	Degufill Ultra
fe450001	-158320000	Degufill Ultra
fe506001	-9305100	Durafill VS
fe510001	-16591000	Durafill VS
fe530001	-32209000	Durafill VS
fe550001	-55858000	Durafill VS
fe606001	-207860000	Estilux-Hybrid
fe610001	-260500000	Estilux-Hybrid
fe630001	-435900000	Estilux-Hybrid
fe650001	-583760000	Estilux-Hybrid
fe706001	-24103000	TPH-Spectrum
fe710001	-46839000	TPH-Spectrum
fe730001	-140500000	TPH-Spectrum
fe750001	-244860000	TPH-Spectrum
fe806001	-139760000	Pertac II
fe810001	-206580000	Pertac II
fe830001	-326520000	Pertac II
fe850001	-382880000	Pertac II
ff106001	-29445000	Z100
ff110001	-55174000	Z100
ff130001	-164440000	Z100
ff150001	-238370000	Z100
ff206001	-24184000	Tetric
ff210001	-41794000	Tetric
ff230001	-168050000	Tetric
ff250001	-301830000	Tetric
ff306001	-16220000	Degufill Ultra
ff310001	-25637000	Degufill Ultra
ff330001	-90517000	Degufill Ultra
ff350001	-155680000	Degufill Ultra
ff406001	-7252400	Durafill VS
ff410001	-9547100	Durafill VS
ff430001	-26266000	Durafill VS
ff450001	-39815000	Durafill VS
ff506001	-184990000	Estilux-Hybrid
ff510001	-227560000	Estilux-Hybrid
ff530001	-438510000	Estilux-Hybrid
ff550001	-553580000	Estilux-Hybrid
ff606001	-25602000	TPH-Spectrum
ff610001	-35207000	TPH-Spectrum
ff630001	-116040000	TPH-Spectrum
ff650001	-194880000	TPH-Spectrum
ff706001	-96056000	Pertac II
ff710001	-143730000	Pertac II
ff730001	-297030000	Pertac II
ff750001	-308600000	Pertac II

ff806001	-559520	Heliomolar RO
ff810001	-6223700	Heliomolar RO
ff830001	-32726000	Heliomolar RO
ff850001	-62130000	Heliomolar RO
fg106001	-20412000	Tetric
fg110001	-40399000	Tetric
fg130001	-157900000	Tetric
fg150001	-291700000	Tetric
fg206001	-14999000	Degufill Ultra
fg210001	-25270000	Degufill Ultra
fg230001	-77267000	Degufill Ultra
fg250001	-135990000	Degufill Ultra
fg306001	-718830	Durafill VS
fg310001	-5352100	Durafill VS
fg330001	-19936000	Durafill VS
fg350001	-39431000	Durafill VS
fg406001	-203530000	Estilux-Hybrid
fg410001	-258960000	Estilux-Hybrid
fg430001	-459390000	Estilux-Hybrid
fg450001	-596000000	Estilux-Hybrid
fg506001	-39293000	TPH-Spectrum
fg510001	-57475000	TPH-Spectrum
fg530001	-166500000	TPH-Spectrum
fg550001	-246000000	TPH-Spectrum
fg606001	-95601000	Pertac II
fg610001	-137470000	Pertac II
fg630001	-284150000	Pertac II
fg650001	-315130000	Pertac II
fg706001	-3887900	Heliomolar RO
fg710001	-13365000	Heliomolar RO
fg750001	-87506000	Heliomolar RO
fg806001	-32169000	Z100
fg810001	-55686000	Z100
fg830001	-154670000	Z100
fg850001	-212570000	Z100
fh106001	-20530000	Degufill Ultra
fh110001	-33428000	Degufill Ultra
fh130001	-109290000	Degufill Ultra
fh150001	-183470000	Degufill Ultra
fh206001	-724160	Durafill VS
fh210001	-3065500	Durafill VS
fh230001	-21437000	Durafill VS
fh250001	-38425000	Durafill VS
fh306001	-208990000	Estilux-Hybrid
fh310001	-261700000	Estilux-Hybrid
fh330001	-507660000	Estilux-Hybrid
fh350001	-708090000	Estilux-Hybrid
fh406001	-29744000	TPH-Spectrum
fh410001	-45645000	TPH-Spectrum
fh430001	-132450000	TPH-Spectrum
fh450001	-212860000	TPH-Spectrum
fh506001	-90146000	Pertac II
fh510001	-134080000	Pertac II

fh530001	-268620000	Pertac II
fh550001	-326150000	Pertac II
fh606001	-125980	Heliomolar RO
fh610001	-4061900	Heliomolar RO
fh630001	-31878000	Heliomolar RO
fh650001	-63495000	Heliomolar RO
fh706001	-30332000	Z100
fh710001	-57217000	Z100
fh730001	-166870000	Z100
fh750001	-244250000	Z100
fh806001	-15650000	Tetric
fh810001	-33281000	Tetric
fh830001	-143240000	Tetric
fh850001	-273140000	Tetric
fi106001	-26423000	Metafil CX
fi110001	-39001000	Metafil CX
fi130001	-64899000	Metafil CX
fi150001	-86970000	Metafil CX
fi206001	-17093000	Metafil CX
fi210001	-27810000	Metafil CX
fi230001	-53159000	Metafil CX
fi250001	-70269000	Metafil CX
fi306001	-11644000	Metafil CX
fi310001	-18950000	Metafil CX
fi330001	-42737000	Metafil CX
fi350001	-60701000	Metafil CX
fi506001	-13628000	Metafil CX
fi510001	-22832000	Metafil CX
fi530001	-52193000	Metafil CX
fi550001	-77124000	Metafil CX
fi606001	-13476000	Metafil CX
fi610001	-22319000	Metafil CX
fi630001	-55560000	Metafil CX
fi650001	-81374000	Metafil CX
fi706001	-14298000	Metafil CX
fi710001	-23904000	Metafil CX
fi730001	-51126000	Metafil CX
fi750001	-71167000	Metafil CX
fi806001	-13096000	Metafil CX
fi810001	-23240000	Metafil CX
fi830001	-49378000	Metafil CX
fi850001	-73067000	Metafil CX
fi106001	-11668000	Arabesk
fi110001	-19914000	Arabesk
fi130001	-69705000	Arabesk
fi150001	-74865000	Arabesk
fi206001	-14934000	Artglass
fi210001	-23487000	Artglass
fi230001	-60067000	Artglass
fi250001	-65572000	Artglass
fi306001	-16260000	Charisma F
fi310001	-25361000	Charisma F
fi330001	-68227000	Charisma F

fi406001	-12901000	Pertac Hybrid
fi410001	-27301000	Pertac Hybrid
fi430001	-110340000	Pertac Hybrid
fi450001	-116270000	Pertac Hybrid
fi506001	-172690000	Compoglass
fi510001	-260160000	Compoglass
fi530001	-718450000	Compoglass
fi550001	-780540000	Compoglass
fi706001	-72641000	Dytract AP
fi710001	-114380000	Dytract AP
fi730001	-697720000	Dytract AP
fi750001	-722760000	Dytract AP
fi806001	-368420000	Hytac
fi810001	-538610000	Hytac
fi830001	-1287300000	Hytac
fi850001	-1391300000	Hytac
fk106001	-21607000	Artglass
fk110001	-27255000	Artglass
fk130001	-77621000	Artglass
fk150001	-126470000	Artglass
fk206001	-12900000	Charisma F
fk210001	-20535000	Charisma F
fk230001	-82755000	Charisma F
fk250001	-144000000	Charisma F
fk306001	-6070300	Pertac Hybrid
fk310001	-14691000	Pertac Hybrid
fk330001	-69726000	Pertac Hybrid
fk350001	-133170000	Pertac Hybrid
fk506001	-70144000	Compoglass F
fk510001	-134480000	Compoglass F
fk530001	-554050000	Compoglass F
fk550001	-1034100000	Compoglass F
fk606001	-89042000	Dytract AP
fk610001	-145330000	Dytract AP
fk630001	-563750000	Dytract AP
fk650001	-971160000	Dytract AP
fk706001	-399610000	Hytac
fk710001	-604630000	Hytac
fk730001	-1560000000	Hytac
fk750001	-2073800000	Hytac
fk806001	-14174000	Arabesk
fk810001	-23637000	Arabesk
fk830001	-86170000	Arabesk
fk850001	-150310000	Arabesk
fi106001	-13035000	Charisma F
fi110001	-23193000	Charisma F
fi130001	-79324000	Charisma F
fi150001	-140330000	Charisma F
fi206001	-13358000	Pertac Hybrid
fi210001	-20417000	Pertac Hybrid
fi230001	-79056000	Pertac Hybrid
fi250001	-151750000	Pertac Hybrid
fi406001	-89661000	Compoglass F

fi410001	-155350000	Compoglass F
fi430001	-568800000	Compoglass F
fi450001	-1066100000	Compoglass F
fi506001	-128350000	Dytract AP
fi510001	-208130000	Dytract AP
fi530001	-638030000	Dytract AP
fi550001	-1078400000	Dytract AP
fi606001	-480180000	Hytac
fi610001	-780350000	Hytac
fi630001	-2828200000	Hytac
fi650001	-5615000000	Hytac
fi706001	-16141000	Arabesk
fi710001	-26757000	Arabesk
fi730001	-85853000	Arabesk
fi750001	-145690000	Arabesk
fi806001	-25575000	Artglass
fi810001	-36527000	Artglass
fi830001	-97690000	Artglass
fi850001	-152870000	Artglass
fm106001	-15438000	Pertac Hybrid
fm110001	-21342000	Pertac Hybrid
fm130001	-80113000	Pertac Hybrid
fm150001	-133930000	Pertac Hybrid
fm306001	-82198000	Compoglass F
fm310001	-149430000	Compoglass F
fm330001	-565370000	Compoglass F
fm350001	-1053700000	Compoglass F
fm406001	-84075000	Dytract AP
fm410001	-153230000	Dytract AP
fm430001	-557840000	Dytract AP
fm450001	-988720000	Dytract AP
fm506001	-482490000	Hytac
fm510001	-806610000	Hytac
fm530001	-1668000000	Hytac
fm550001	-2165900000	Hytac
fm606001	-18587000	Arabesk
fm610001	-25427000	Arabesk
fm630001	-79927000	Arabesk
fm650001	-143130000	Arabesk
fm706001	-23895000	Artglass
fm710001	-33604000	Artglass
fm730001	-103900000	Artglass
fm750001	-168250000	Artglass
fm806001	-18337000	Charisma F
fm810001	-29100000	Charisma F
fm830001	-89693000	Charisma F
fm850001	-157450000	Charisma F
fi106001	-161020000	Compoglass
fi110001	-265950000	Compoglass
fi130001	-853950000	Compoglass
fi150001	-1650300000	Compoglass
fi206001	-114240000	Compoglass F
fi210001	-201710000	Compoglass F

fn230001	-685930000	Compoglass F
fn250001	-1233600000	Compoglass F
fn406001	-14773000	Hytac
fn410001	-902790000	Hytac
fn430001	-2265300000	Hytac
fn450001	-4632500000	Hytac
fn506001	-24048000	Arabesk
fn510001	-31146000	Arabesk
fn530001	-99028000	Arabesk
fn550001	-171460000	Arabesk
fn606001	-16790000	Artglass
fn610001	-43553000	Artglass
fn630001	-92539000	Artglass
fn650001	-150410000	Artglass
fn806001	-10475000	Pertac Hybrid
fn810001	-19634000	Pertac Hybrid
fn830001	-87036000	Pertac Hybrid
fn850001	-143140000	Pertac Hybrid
fo106001	-96946000	Compoglass F
fo110001	-164470000	Compoglass F
fo130001	-571500000	Compoglass F
fo150001	-1043200000	Compoglass F
fo206001	-113490000	Dytract AP
fo210001	-184670000	Dytract AP
fo230001	-455770000	Dytract AP
fo250001	-763880000	Dytract AP
fo306001	-469920000	Hytac
fo310001	-708410000	Hytac
fo330001	-2580100000	Hytac
fo350001	-3948500000	Hytac
fo406001	-14737000	Arabesk
fo410001	-27282000	Arabesk
fo430001	-83166000	Arabesk
fo450001	-144910000	Arabesk
fo506001	-23981000	Artglass
fo510001	-34472000	Artglass
fo530001	-98825000	Artglass
fo550001	-159430000	Artglass
fo606001	-16749000	Charisma F
fo610001	-25762000	Charisma F
fo630001	-77918000	Charisma F
fo650001	-130320000	Charisma F
fo706001	-69442000	Pertac Hybrid
fo710001	-74557000	Pertac Hybrid
fo730001	-121190000	Pertac Hybrid
fo750001	-193170000	Pertac Hybrid
fo806001	-224340000	Compoglass
fo810001	-353600000	Compoglass
fo830001	-1271500000	Compoglass
fo850001	-2185400000	Compoglass
fp106001	-132970000	Dytract AP
fp110001	-217690000	Dytract AP
fp130001	-625100000	Dytract AP

fp150001	-1024800000	Dyract AP
fp306001	-18965000	Arabesk
fp310001	-28204000	Arabesk
fp330001	-68475000	Arabesk
fp350001	-122160000	Arabesk
fp406001	-35216000	Artglass
fp410001	-45824000	Artglass
fp430001	-108660000	Artglass
fp450001	-157620000	Artglass
fp506001	-19082000	Charisma F
fp510001	-31583000	Charisma F
fp530001	-101970000	Charisma F
fp550001	-168160000	Charisma F
fp606001	-13387000	Pertac Hybrid
fp610001	-26287000	Pertac Hybrid
fp630001	-77592000	Pertac Hybrid
fp650001	-140870000	Pertac Hybrid
fp706001	-219920000	Compoglass
fp710001	-342560000	Compoglass
fp730001	-1180800000	Compoglass
fp750001	-2215900000	Compoglass
fp806001	-93586000	Compoglass F
fp810001	-158170000	Compoglass F
fp830001	-566860000	Compoglass F
fp850001	-1030900000	Compoglass F
fq106001	-493340000	Hytac
fq110001	-816910000	Hytac
fq130001	-1930600000	Hytac
fq150001	-2512800000	Hytac
fq206001	-17630000	Arabesk
fq210001	-27222000	Arabesk
fq230001	-97080000	Arabesk
fq250001	-166960000	Arabesk
fq306001	-24562000	Artglass
fq310001	-36051000	Artglass
fq330001	-89230000	Artglass
fq350001	-158950000	Artglass
fq406001	-15654000	Charisma F
fq410001	-23724000	Charisma F
fq430001	-86801000	Charisma F
fq450001	-148700000	Charisma F
fq506001	-45184000	Pertac Hybrid
fq510001	-58216000	Pertac Hybrid
fq530001	-116130000	Pertac Hybrid
fq550001	-173890000	Pertac Hybrid
fq606001	-227970000	Compoglass
fq610001	-382590000	Compoglass
fq630001	-1261800000	Compoglass
fq650001	-2295700000	Compoglass
fq706001	-93232000	Compoglass F
fq710001	-151010000	Compoglass F
fq730001	-583440000	Compoglass F
fq750001	-1092900000	Compoglass F

fq806001	-118980000	Dyract AP
fq810001	-193030000	Dyract AP
fq830001	-565180000	Dyract AP
fq850001	-960730000	Dyract AP

10 Danksagung

Ich danke allen, die mir beim Erstellen dieser Arbeit geholfen haben, auch denen, die ich hier nicht einzeln erwähnen kann.

Besonders danke ich Herrn PD Dr. Karl-Heinz Kunzelmann für die Überlassung des Dissertationsthemas und seine Unterstützung bei der Bearbeitung.

Ebenso gilt mein Dank Herrn Prof. Dr. Reinhard Hickel, Direktor der Poliklinik für Zahnerhaltung und Parodontologie, der mir ermöglichte, diese Studie in seiner Abteilung durchzuführen.

Ich danke allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Poliklinik, die mir bei meiner Arbeit geholfen haben.

Meinen Eltern danke ich, daß sie mir dieses Studium ermöglicht haben.

Meinem Partner, Dipl.-Journ. (Univ.) Frank Ecker, danke ich für seine Rücksichtnahme, ohne die diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

11 Lebenslauf

Name: Catharina Zantner

Geburtstag: 12.11.1971

Geburtsort: Nürnberg

Eltern: Hans-Dieter Zantner,
Carmen Maria Zantner

Geschwister: Carolin Agnes Zantner

Schulbildung: 1978 - 1986
Staatlich anerkannte einheitliche Volks- und Höhere
Schule, Freie Rudolf-Steiner Schule, Nürnberg

1986 - 1991
Staatlich anerkannte einheitliche Volks- und Höhere
Schule, Freie Rudolf-Steiner Schule, München

Schulabschluß: Abitur

Studium: 1993-1999
Studium der Zahnheilkunde an der Universität Hamburg

13.07.1999
Zahnärztliche Approbation

Doktorarbeit: seit 22.05.1997

Praktische Tätigkeit: 2000
Assistentin in freier Praxis

seit 30.04.2001
Wissenschaftliche Mitarbeiterin der Abteilung
für Zahnerhaltung und Parodontologie
an der Zahnklinik der Freien Universität Berlin