

**Aus der Poliklinik der Zahnerhaltung und Parodontologie
der Klinik für Zahn - Mund und Kieferkrankheiten
der Universität München
Vorstand: Prof. Dr. med. dent. R. Hickel**

**Nahrungsverschleiß und Materialermüdung
experimenteller Füllungswerkstoffe**

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

**vorgelegt von
Alexander Grünwald
aus Bad Tölz
2001**

**Mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät
der Universität München**

Berichterstatter:	Priv. – Doz. Dr. K.-H. Kunzelmann
Mitberichterstatter:	Priv. – Doz. Dr. P. Pospiech Prof. Dr. Dr. M. Ehrenfeld
Dekan:	Prof. Dr. med. Dr. h.c. K. Peter
Tag der mündlichen Prüfung:	30.01.2001

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Einleitung und Problemstellung	1
2. Literaturübersicht	
2.1 Acta-Maschine	3
2.2 Fatigue-Tester	7
2.3 Tribologie	8
2.3.1 Definition	8
2.3.2 Zahnmedizinische Tribologie	11
2.3.3 Technische Tribologie	14
3. Material und Methode	
3.1 Material	19
3.1.1 Zusammensetzung der Probenmaterialien	19
3.1.2 Herstellung der Proben	23
3.2 Methode	35
3.2.1 Acta-Maschine	35
3.2.1.1 Das dritte Medium: Die Hirsesuspension	38
3.2.1.2 Versuchsablauf Acta-Maschine	41
3.2.1.2.1 Erstes Experiment: Evaluation der Abrasion	41
3.2.1.2.2 Zweites Experiment: Surface-Fatigue durch Slipvariation	42
3.2.2 Fatigue-Tester	43
3.2.2.1 Versuchsablauf Fatigue-Tester	45
3.2.2.1.1 Drittes Experiment: Evaluation des Surface-Fatigue	45
3.2.3 Auswertung	46

	Seite
3.2.3.1 Auswertung Acta-Maschine	46
3.2.3.1.1 Perthometer	46
3.2.3.1.2 Dentmes	48
3.2.3.1.3 Match3D / SPSS	48
3.2.3.2 Auswertung Fatigue-Tester	50
3.2.3.2.1 Perthometer	50
3.2.3.2.2 Dentmes und Match3D	50
3.2.3.3 Morphologische Verschleißanalyse	51
4. Ergebnisse	
4.1 Erstes Experiment: Evaluation der Abrasion	52
4.2 Zweites Experiment: Surface-Fatigue durch Slipvariation	58
4.3 Drittes Experiment: Evaluation des Surface-Fatigue	62
5. Diskussion	
5.1 Erstes Experiment: Evaluation der Abrasion	70
5.1.1 Bewertung der Methode	70
5.1.2 Bewertung der Ergebnisse	74
5.1.3 Diskussion des tribologischen Aspektes	75
5.2 Zweites Experiment: Surface-Fatigue durch Slipvariation	80
5.2.1 Bewertung der Methode	80
5.2.2 Bewertung der Ergebnisse	80
5.2.3 Diskussion des tribologischen Aspektes	80
5.3 Drittes Experiment: Evaluation des Surface-Fatigue	83
5.3.1 Bewertung der Methode	83
5.3.2 Bewertung der Ergebnisse	85

	Seite
5.3.3 Diskussion des tribologischen Aspektes	89
5.4 Zukünftige Experimente	91
6. Zusammenfassung	94
7. Literaturverzeichnis	96
8. Anhang	
Tabellen	108
Danksagung	111
Lebenslauf	112

1. EINLEITUNG UND PROBLEMSTELLUNG

Kunststoffe für dentale Zwecke besitzen viele günstige Eigenschaften, welchen jedoch auch Nachteile wie Randspaltbildung durch Schrumpfung und Verschleiß durch Abrieb entgegenstehen.

Neben den biologischen Eigenschaften eines Komposites stellt die Resistenz gegen die Degradation im oralen Milieu eine zentrale Anforderung dar (Roulet, 1976).

Die Obergrenze für den Abrieb von Kompositen im Seitenzahnbereich wurde mit Hilfe von In-vivo-Tests auf weniger als 50 µm pro Jahr im Übergangsbereich zwischen Füllung und Zahn festgelegt (Dental Association Council of Dental Materials, Instruments and Equipment, 1989). Die University of Florida, Department of Dental Biomaterials, fordert darüber hinaus eine 95%ige Fünfjahreshaltbarkeitsrate von Kompositfüllungen am Patienten (Anusavice, 1996). Doch erreichen aktuelle handelsübliche Materialien diese Anforderungen lediglich bei eingeschränktem Gebrauch. Dies gilt für Regionen, in denen Kaukräfte gering sind oder überhaupt nicht auftreten, wie es bei kleinen Läsionen im Seitenzahnbereich oder generell im Frontzahnbereich der Fall ist. Die Verwendung über diesen Indikationsbereich hinweg wurde lange Zeit nicht empfohlen.

Zukünftige Fortschritte in der Verbesserung der Verschleißfestigkeit sind nur durch das Verständnis der Mechanismen und der Variablen der ihr zu Grunde liegenden Vorgänge möglich (Condon, 1997). Da sie wegen ihrer Komplexität in vivo nur ungenügend erfaßt werden können, sind kontrollierbare und reproduzierbare In-vitro-Versuche erforderlich (Peutzfeldt, 1992). Zusätzlich empfiehlt sich das In-vitro-Experiment durch seine vergleichsweise

geringen Kosten und den verminderten Zeitaufwand (Anusavice, 1996). Pelka (1998) gibt die Schnellebigkeit der Produktentwicklung zu bedenken. Komposite sind nicht mehr auf dem Markt oder in ihrer Zusammensetzung wesentlich verändert, bevor klinische Ergebnisse vorliegen. Entsprechend können Aussagen über das Langzeitverhalten nur auf der Basis von In-vitro-Untersuchungen abgeschätzt werden. Übergeordnet muß bei insuffizienten Materialien eine mögliche gesundheitliche Gefährdung des Patienten ausgeschlossen werden.

Das Ziel dieser vorliegenden Untersuchung ist die Überprüfung experimenteller Komposite in Abhängigkeit ihrer inhaltlichen Zusammensetzung mit ausschließlicher Fokussierung auf ihr Verschleißverhalten. Dies geschieht mit Hilfe von drei In-vitro-Experimenten in zwei Simulationsanordnungen, die auf der Basis unterschiedlicher Verschleißmechanismen meß- und beurteilbare Ergebnisse erzeugen sollen.

2. Literaturübersicht

2.1 Acta-Maschine

„Acta“ steht für „Akademisch Centrum Tandheelkunde Amsterdam“, der Zahnklinik Amsterdam, Niederlande. Die Maschine wurde von A.J. de Gee, Leiter der Arbeitsgruppe Materialwissenschaften in der Zahnheilkunde, im Jahre 1985 entwickelt, gebaut und vertrieben.

In der Originalarbeit (De Gee, 1986) weist der Autor auf den Mangel an Übereinstimmung zwischen laborseitig evaluierten Daten und klinischen Studien hin (Dickson, 1979, DeLong, 1983, Lambrechts, 1984). Diese Tatsache nimmt er zum Anlaß, eine Anordnung zu konstruieren, welche vergleichbare Ergebnisse zu In-vivo-Studien zuläßt. Hierbei wird das Ziel verfolgt, die Variablen so kontrollierbar zu gestalten, daß ein Verschleißmuster und ein relatives Verschleißverhalten resultieren, welche mit klinischen Verhältnissen vergleichbar sind. Zur Referenz dienen De Gee die gleichen Materialien, wie sie Lambrechts (1985) und Lutz (1984) in ihren klinischen Studien verwenden. Während der Versuche bleiben die Parameter Probenherstellung, Anpreßkraft von 15 N als Ausdruck einer durchschnittlichen physiologischen Belastung (DeLong, 1983), Gesamtzyklenzahl von 85.000 und die baulichen Elemente der Acta-Maschine konstant. Um einen zur Klinik vergleichbaren Verschleiß zu finden, experimentiert der Autor mit der Zusammensetzung des dritten Mediums. Verwendet werden Hirse, PMMA-Perlen, Mischungen aus beiden oder Wasser alleine. De Gee stellt fest, daß der Verschleiß mit einer Hirse-in-Wasser-Mischung am stärksten ist und mit nur geringen Mengen Kunststoffperlen unverhältnismäßig stark abnimmt. Im Vergleich zu den

klinischen Studien wird eine nicht vollständige Übereinstimmung festgestellt. Diese wird allerdings auf die In-vivo-Versuche zurückgeführt, welche eine geringe Präzision und eine niedrige Fallzahl aufweisen. Zudem werden diese teilweise mit Kompositen durchgeführt, deren Indikation überschritten ist, indem sie nicht für den posterioren Gebrauch bestimmt sind.

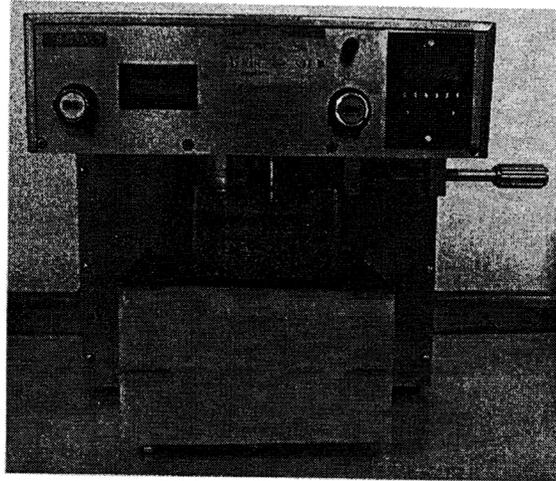


Abb. 2.1: Acta-Maschine in betriebsbereiter Anordnung

Nachdem De Gee (1986) insgesamt die Eignung der Acta-Maschine zur Simulation klinischer Verhältnisse aufzeigt, weist Pallav (1988) auf die Vorzüge dieser In-vitro-Technik hin, die es ermöglicht, den langfristig zu erwartenden Materialverschleiß von Kompositen innerhalb weniger Tage vorauszusagen. Zudem können uneinheitliche Parameter der klinischen Studie, wie die variierende Liegedauer, abweichende Herstellungsmodi sowie Defektort und -größe einer Restauration, die Ergebnisse beeinflussen. In der Arbeit werden das okklusale Verschleißverhalten von willkürlich ausgewählten Kompositen im Vergleich zu Amalgam und Rinderzahnschmelz untersucht. Bei

der Auswertung der Ergebnisse muß festgestellt werden, daß Komposite, die vom Hersteller für den posterioren Gebrauch freigegeben sind, ein bis zu dreifach schlechteres Verschleißverhalten als das zur Referenz verwendete Amalgam besitzen. Es wird darauf hingewiesen, daß die verwendeten Materialien, obwohl für diesen Indikationsbereich freigegeben, in keiner Weise zur Versorgung von Kaukraft aufnehmenden Zahnarealen geeignet sind.

In der Folgearbeit von Pallav (1989) wird eine Bis-GMA-TEGDMA-Resin Matrix mit einem Makrofüller (3 μm) und einem Mikrofüller (0,04 μm) untersucht. Der Gesamtanteil beider Füllerfraktionen beträgt konstant 68,5 Vol.%, wobei der Makrofüller schrittweise zu 3, 5, 7,5, 10, 15 und 20 Vol.% durch den Mikrofüller ersetzt wird. Die Materialien werden auf Abrasionsfestigkeit hin untersucht. Zusätzlich werden Oberflächenrauigkeit, Verwindungssteifigkeit und Härte der Materialien geprüft, ein Einfluß des Mikrofülleranteils bezüglich dieser Faktoren kann jedoch nicht demonstriert werden. Nach wie vor werden die Anpreßkraft mit 15 N und der Slip mit 30% beibehalten. Die Gesamtzyklenzahl wird auf 100.000 angehoben. Neben der Notwendigkeit, kleine Anteile Mikrofüller in der Größenordnung von 3-4 Vol.% beizumengen, um Polierfähigkeit und Verarbeitungseigenschaften zu verbessern, kann mit steigenden Mikrofülleranteilen die Abrasion erheblich vermindert werden. Bis zu einem Anteil von 15 Vol.% nimmt der Volumenverlust am stärksten ab, um zwischen 15 und 20 Vol.% konstant zu bleiben. Der Autor weist darauf hin, daß die Abrasionsmechanismen weitgehend unverstanden sind, führt jedoch die gängige Meinung über die Entstehung an. Durch die Nahrungspartikel wird die Matrix erodiert. Hieraus resultiert eine erhöhte Friktion durch die aufgerauhte Kompositoberfläche. Die durch diesen Vorgang freigelegten und hervorstehenden Füllerpartikel werden schließlich durch die einwirkenden mechanischen Kräfte aus der Matrix herausgetrennt (Jørgensen, 1980, Van Groeningen, 1985). Bei höheren

Konzentrationen nimmt der Verschleiß wieder zu, indem gesamte Mikrofüllerformationen durch das Versagen der Füller-Matrix-Verbindung aus dem Verbund herausgetrennt werden (De Gee, 1984).

Während zwischenzeitlich ausschließlich Hirsebrei als drittes Medium verwendet wird (De Gee, 1990), welcher jedoch durch seinen hohen Fettanteil (3-4%) nach 200.000 Zyklen eine als Wachs interpretierte Schicht an den Radoberflächen hervorruft und die Messergebnisse verfälscht, verwendet Pallav (1992) Reis. Sein Fettanteil beträgt lediglich 1%, sodaß die gesamte Zyklenzahl durchlaufen werden kann, ohne das dritte Medium wechseln zu müssen.

In der Arbeit von Pallav (1992) werden Composite und ein Amalgam als Referenz untersucht. Abweichend von vorangegangenen Versuchen wird der Slip variiert, um den Abstand zwischen Probenrad und Antagonistenrad auf Werte zwischen 10 und 3 μm einzustellen. Wieder bleibt die Anpreßkraft mit 15 N konstant. Pallav (1992) stellt fest, daß der Verschleiß signifikant mit der Abnahme des Abstandes um den Faktor zwei bis drei zunimmt, wobei die Verschleißart ausschließlich erosiver Natur ist. Wird der Abstand weiter, auf etwa 1 μm Abstand verringert, so beginnt sich direkter Kontakt zwischen beiden Rädern auszubilden, wodurch sich der erosive Verschleiß konsequent vermindert. Trotzdem kann mit dieser Versuchsanordnung ein Surface-Fatigue im Sinne von Bailey und Rice (1981) und McKinney und Wu (1982) nicht demonstriert werden. Hierzu müßte die Anpreßkraft auf weit über 15 N erhöht werden (De Gee, 1994).

Pelka (1994) vergleicht die Resultate aus einem Drei-Körper-Abrasionsversuch mit der Acta-Maschine mit den Ergebnissen aus einem Zwei-Körper-Experiment mit dem Kausimulator, Typ Erlangen. Als Parameter für die Acta-Maschine werden ein Slip von 30 % eingestellt und 100.000 Zyklen durchlaufen. Es kann bewiesen werden, daß beide Methoden, mit leichten

Unterschieden in der Rangfolge, zu den selben Ergebnissen führen. Bedingt durch die höhere Anzahl der einflußnehmenden Parameter, zeigen die Ergebnisse der Acta-Maschine eine höhere Standardabweichung als der Zwei-Körper-Abrasionsversuch (Pallav, 1988, 1989).

Spätere Veröffentlichungen (Bauer, 1995, Krämer, 1997) unterstreichen die Reife in der Entwicklung der Acta-Maschine. Bis auf den Slip, der nun auf 15% eingestellt ist, werden Parameter nicht mehr verändert. Der Schwerpunkt liegt nun völlig auf der Prüfung gängiger und neuartiger zahnfarbener Füllungsmaterialien, jeweils im Vergleich zu Amalgam. Zwar zeigen die Versuche, daß neuartige Materialien, z.B. Ormocere, erheblich verbesserte Verschleißverhalten zeigen (Bauer, 1995), die überwiegende Anzahl gebräuchlicher Kompomere und Glasionomere weisen allerdings signifikant höhere Abrasionsraten als das Referenzmaterial Amalgam auf (Krämer, 1997).

Bedingt durch die, trotz des simplen Aufbaus, durchdachte und plausible Konzeption, ist die Acta-Maschine ein international anerkannter Standard bei Materialprüfungen dieser Art (Bauer, 1995, Krämer, 1997). Zudem erlaubt die hohe Korrelation mit klinischen Daten innerhalb kurzer Zeit eine Vorhersage zur Drei-Körper-Verschleißfestigkeit von neuen Materialien (Finger, 1987, Peutzfeldt, 1992).

2.2 Fatigue-Tester

Der Fatigue-Tester wurde von Kunzelmann (1998) konstruiert und von der Firma Willytec, München, realisiert. Zuvor wurde der Surface-Fatigue als begleitende, untergeordnete Verschleißkomponente bei anderen Versuchsanordnungen diskutiert (Pallav, 1992), jedoch nie quantifiziert. Zwar weist De Gee (1994) darauf hin, daß mit der Acta-Maschine die Simulation dieser Verschleißform möglich ist, die Anpreßkraft müßte jedoch hierzu auf

weit über die üblichen 15 N erhöht werden. Erst mit dem Fatigue-Tester wird es möglich, diese Verschleißform isoliert zu erzeugen. Eine Literaturübersicht über den Fatigue-Tester kann wegen seines erstmaligen Einsatzes im Rahmen dieser Arbeit nicht vorgelegt werden. Funktionsweise und -prinzip werden im Kapitel Material und Methode näher erläutert.

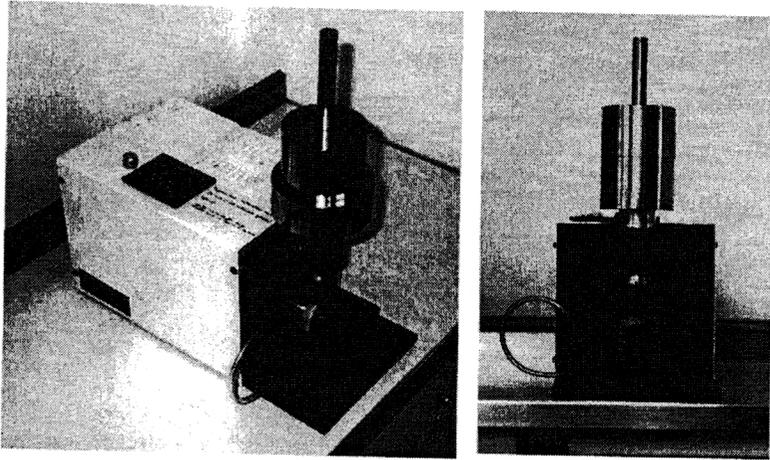


Abb. 2.2: Fatigue-Tester

2.3 Tribologie

2.3.1 Definition

Das Wort Tribologie entstammt dem griechischen (tribos) und bedeutet Reibungslehre. Die Originaldefinition lautet:

- „Tribology is the science and technology of interacting surfaces in relative motion and of related subjects and practices.“ (Jobst, 1966)

Nach DIN 50323 gilt folgende Definition:

- „Tribologie ist die Wissenschaft und Technik von aufeinander einwirkenden Oberflächen in Relativbewegung. Sie umfaßt das Gesamtgebiet von Reibung und Verschleiß, einschließlich Schmierung und schließt entsprechende Grenzflächenwechselwirkungen sowohl zwischen Festkörpern als auch zwischen Festkörpern und Flüssigkeiten oder Gasen ein.“

Der Begriff Tribologie beschreibt das interdisziplinäre Zusammenwirken von Chemie, Physik und Werkstoffwissenschaften (Zum Gahr, 1986) und gehört auf Grund der Komplexität von Reibung und Verschleiß zu den sogenannten „Chaoswissenschaften“. Dennoch sind die auftretenden Phänomene stochastischer Natur und können als dissipative, nichtlineare, dynamische Vorgänge mit zeitlich und örtlich verteilten Mikrovorgängen erfaßt werden (Czichos, 1992). (Dissipation (lat.: Zerstreung, Zerteilung) = Übergang einer umwandelbaren Energieform in Wärmeenergie.). Die Tribologie ist die zentrale Beschreibung für die Vorgänge, die im Rahmen dieser Arbeit erzeugt, gemessen und ausgewertet werden sollen. Die Erkenntnis, daß Reibung und Verschleiß von Werkstoffen nicht als Stoffeigenschaft, sondern als Systemeigenschaft der am Prozeß beteiligten stofflichen Elemente in Verbindung mit dem Beanspruchungskollektiv aufzufassen ist (Uetz, 1984), führt zu einer Aufgliederung der beteiligten Komponenten in 6 Gruppen (Czichos, 1992):

- Funktion und Nutzgrößen:

Die Funktion eines tribotechnischen Systems ist durch die technischen Nutzgrößen zu beschreiben. Für diese Arbeit relevant sind beispielsweise Bewegung und Kraft. (Auch: Drehmoment, Energie, u.s.w.)

- Struktur:

Die Struktur eines tribotechnischen Systems wird durch die grundlegenden vier Bestandteile eines Tribosystems gebildet:

Grundkörper, Gegenkörper, Zwischenstoff und Umgebungsmedium. Auch die drei Experimente dieser Arbeit entsprechen tribotechnischen Systemen, welche sich jeweils aus vier grundlegenden Strukturen zusammensetzen (Tab.2.1):

Experiment	Grundkörper	Gegenkörper	Zwischenstoff	Umgebungsmedium	Prinzip
Acta-Maschine	Probenrad	Antagonistenrad	Hirse	Wasser	3-Körper-Verschleiß
Fatigue-Tester	Probenrad	Laufrad	entfällt	Wasser	2-Körper-Verschleiß

Tab. 2.1: Die tribologischen Systeme dieser Arbeit

• Beanspruchungskollektiv:

Es entspricht den physikalisch-technischen Parametern, welche auf die Systemkomponenten wirken. Die Wichtigsten sind: Kinematik (Bewegungsart und Bewegungsablauf), Normalkraft, Geschwindigkeit, Beanspruchungsdauer.

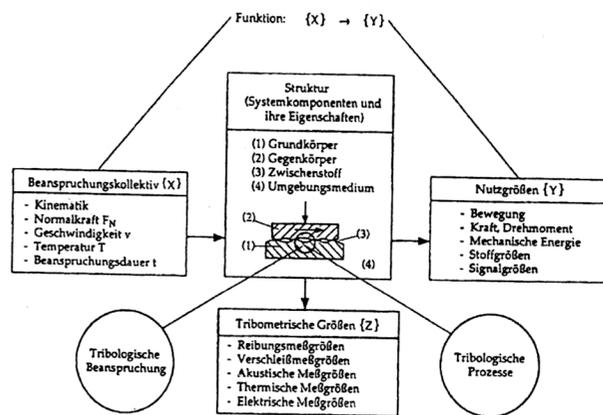


Abb. 2.3: Die Kenngrößen und Parameter eines tribotechnischen Systems (Czichos, 1992)

• Tribologische Beanspruchungen:

Sie sind gekennzeichnet durch das Einwirken des Beanspruchungskollektives auf die Systemstruktur. Die damit verbundenen „Wechselwirkungsparameter“ sind dynamische Systemparameter. Diese sind nur während des Betriebes des tribotechnischen Systems existent und können nicht aus den Einzeleigenschaften der Systemkomponenten abgeleitet werden. Wichtige Kenngrößen: Kontaktgeometrie, Flächenpressung oder Werkstoffanstrengung.

• Tribologische Prozesse:

Die Zusammenfassung der dynamischen physikalisch-chemischen Mechanismen von Reibung und Verschleiß. Sie beschreiben die Prozesse der Energie- und Materialdissipation im Tribosystem.

• Tribometrische Größen:

Sie kennzeichnen die sich durch Beanspruchung ergebenden Veränderungen der Systemstruktur, wie z.B. Stoff- und Formänderungen der Kontaktpartner. Die Verschleißmeßgröße, welche sowohl durch die Acta-Maschine als auch durch den Fatigue-Tester erzeugt wird, ist der Substanzverlust, welcher in Volumen durch ein unten beschriebenes 3 - dimensionales Verfahren gemessen wird.

2.3.2 Zahnmedizinische Tribologie

Die Bezeichnungen der tribologischen Prozesse in der Zahnmedizin beziehen sich auf Erscheinungen, wie sie sich an einem Zahn und seinem Antagonisten abspielen können (OCA = Occlusal Contact Area), oder auf Erscheinungen, die durch Demastikation im kontaktpunktfreien Bereich (CFA =

Contact Free Area) vorherrschen (Lambrechts, 1987). Diese entstehen, wenn der Bolus zerbissen und der Nahrungsbrei unter hohen Kaukräften aus den okklusalen Kontaktzonen gedrückt wird. Hierbei entstehen große Scherbelastungen auf der Okklusalfäche (De Gee, 1994). Die lokal auftretenden Kräfte sind abhängig von der Viskosität des Bolus und von der Form und Größe des intraokklusalen Raumes, wie er durch das Höcker- und Fissurenrelief vorgegeben wird. Je größer das Volumen und je geringer die Ausweichmöglichkeiten der Nahrungspartikel, desto höher sind die Drücke und Scherkräfte.

Wilder (1996) fügt noch drei weitere Regionen eines Zahnes hinzu (siehe Abb.2.4), an denen Verschleiß stattfindet: Die Region, bei der es bei funktionalen Kaubewegungen („Mahlbewegungen“) zum Kontakt zwischen den Zahnreihen kommt (FCA = Functional Contact Area), die Region der Approximalkontakte eines Zahnes (PCA = Proximal Contact Area) und letztlich alle Gebiete, welche einer Zahnbürste zugänglich sind (TBA = Toothbrush Abrasion Wear) (Bayne, 1995).

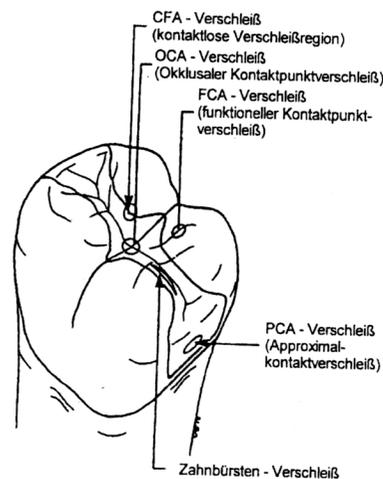


Abb. 2.4: Die verschiedenen Verschleißregionen eines Zahnes (nach Wilder, 1996)

Eine weitere Unterscheidung ergibt sich nicht durch den Ort, sondern durch die Art, durch die es zum Materialverlust kommt. Hierbei entstehende Definitionsvarianten von Zahnarzt und technischem Wissenschaftler sind durch sich unterscheidende fachliche Ursprünge der Autoren bedingt. Mair (1996) unterscheidet hierbei den Tribologen, den Kliniker und den zahnmedizinischen Materialkundler, deren Wissen bezüglich Verschleißvorgängen ähnlich ist, bei der Definition der Begriffe kommt es jedoch zu irreführenden, weil divergierenden Aussagen.

Für die zahnmedizinische Klinik gelten folgende Definitionen, sie werden nach Form und Herkunft unterschieden (Hickel, 1989):

- Abrasion

Abrieb durch Partikel aus Nahrung oder Umwelt.

- Demastikation

Abrieb durch Nahrung infolge Zerkleinerung abrasiver Nahrungsbestandteile.

- Attrition

Physiologischer Zahnhartsubstanzverlust der durch alleinigen, direkten Kontakt der Antagonisten unter physiologischen Bedingungen (Schlucken, Sprechen, kurzzeitige Kontaktreibung beim Kauen) zustande kommt, oder die Abnutzung durch alleinigen, unphysiologischen Zahnkontakt bei Parafunktionen (z. B. Bruxismus).

- Erosion

Großflächiger Substanzverlust durch Säureeinwirkung ohne Kavitation (z. B. palatinal bei Reflux oder Bulimie, labial bei beruflicher Säureexposition durch Säuredämpfe oder Pipettieren, generalisiert bei exzessivem Genuß säurehaltiger Nahrungsmittel wie

Zitrusfrüchten oder Getränken mit niedrigem pH-Wert). Diese Säuren sind keine Abbauprodukte von Bakterien. Dies gilt nur für die Zahnhartsubstanz, entspricht jedoch werkstoffkundlich der Korrosion (Mair, 1996).

• Stauchungsfraktur

Zervikal lokalisierte Substanzverluste, die auf Zerrüttung durch zyklische Überlastung bei Kaubelastung oder Parafunktionen zurückgeführt werden (engl.: abfraction).

• Abrosion

Iatrogen, beabsichtigter Substanzverlust durch abrasive Subventionen mit niedrigem pH-Wert. Ziel ist es, Verfärbungen der Zähne mechanisch zu entfernen und gleichzeitig verbliebene Verfärbungen chemisch durch Oxidation mit der zugesetzten Säure zu bleichen. Abrosion ist ein in den deutschen Sprachgebrauch übernommenes Akronym aus „abrasion“ und „erosion“.

2.3.3 Technische Tribologie

Der Tribologe erachtet die Erscheinung Verschleiß als „selten katastrophal, aber er reduziert die Betriebseffektivität“ (Zum Gahr, 1987). Der Verschleiß wird unter werkstoffkundlicher Betrachtung wie folgt definiert und unterschieden: Verschleiß kann als „ultimative Konsequenz der Interaktion zwischen Oberflächen definiert werden, welche sich in relativer Bewegung zueinander befinden und manifestiert sich in einer graduellen Materialentfernung“. Im allgemeinen kann man Verschleiß in vier Hauptgruppen unterteilen (Mair, 1996):

• Adhäsiwer Verschleiß (Adhesive wear)

Er tritt auf, wenn eine Fläche gegen eine andere gleitet. Die Effekte der Reibung rufen eine Verschweißung zwischen Agonist und Oberflächenbestandteilen des weicheren Antagonisten hervor. Hierbei kommt es zu einem Materialtransfer von einer Fläche zur anderen. Das Volumen des verschobenen Materials ist proportional der Kontaktfläche und der Gleitstrecke.

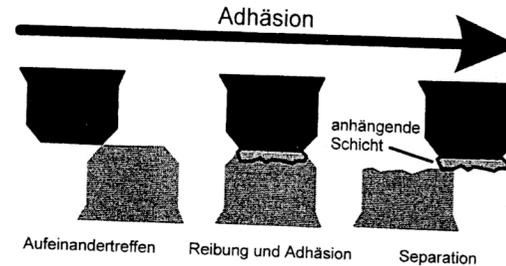


Abb. 2.5: Adhäsiwer Verschleiß

• Abrasiver Verschleiß (Abrasive wear)

Dies ist die am häufigsten auftretende Verschleißform und entsteht, wenn ein harter Gegenstand durch eine weiche Oberfläche pflügt. Dieser Gegenstand kann ein integraler Teil einer Oberfläche sein, dann spricht man von „Zwei-Körper-Abrasion“. Handelt es sich um einen harten Gegenstand, der sich lose zwischen zwei Oberflächen befindet, spricht man von „Drei-Körper-Abrasion“. Wird dieser lose Partikel von einem Gasstrahl oder von einer Flüssigkeit getragen, so spricht man von „Erosion“. Abrasiver Verschleiß ist proportional zur Härte der sich in Kontakt befindlichen Oberflächen, der Form des abrasiv wirkenden Partikels, der einwirkenden Kräfte und der Gleitstrecke.

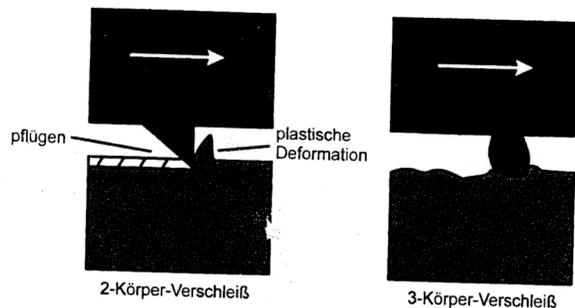


Abb. 2.6: Abrasiver Verschleiß

• Ermüdungverschleiß (Fatigue wear)

Wenn ein Gegenstand über eine Fläche geschoben wird oder idealer Weise völlig passiv derart entlang rollt, daß keine Kräfte in Bewegungsrichtung übertragen werden (siehe Fatigue-Tester), so entsteht eine Zone der Zugspannung vor der Kontaktfläche. Unter der Kontaktfläche kommt es zu einer Kompression des Materials, um anschließend hinter der Kontaktfläche wieder eine Zone der Zugspannung auszubilden, jetzt jedoch in entgegengesetzter Verlaufsrichtung (Abb.2.7a). Abbildung 2.7b zeigt die Verlaufsform der Druck- und Zugkräfte im Verlauf der fortschreitenden Bewegung. Beide Erscheinungen sind durch die plastische Deformationsfähigkeit des Materials bedingt. Je stärker die Anpreßkraft des Antagonisten (F_n) ist, desto näher rückt die Deformationsfähigkeit in Richtung der elastischen Verformung und der Ermüdungverschleiß vollzieht sich schneller.

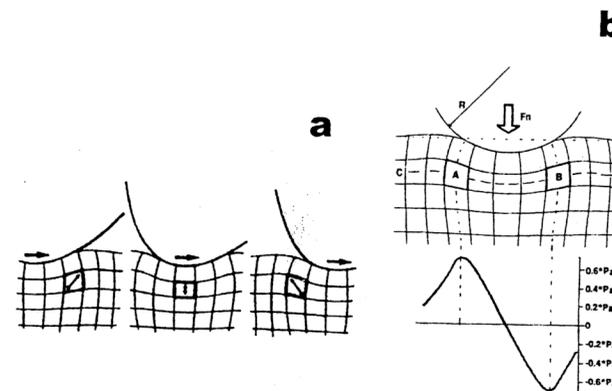


Abb. 2.7a/b: Ermüdungverschleiß – schematisierte Mikrovorgänge
nach de Gee 1994, b) nach Pallav 1993

Bruchzentren unmittelbar unter der Oberfläche sind eine Folge immer wiederkehrender zyklischer Belastung. Die Tiefe der Bruchzentren unter der Oberfläche ist abhängig von den Eigenschaften des jeweiligen Materials sowie von der auf dem Material lastenden Kraft. Abbildung 2.8 zeigt das Hertzsche Spannungsfeld eines punktförmigen Kontaktes und damit die Tiefe in die sich eine Krafteinwirkung ausbreiten kann. Bei Materialien mit einem hohen Elastizitätsmodul befindet sich das Maximum der Hertzschen Spannung in der Nähe der Oberfläche, während Materialien mit einem niedrigen Elastizitätsmodul das Maximum tiefer im Material besitzen (Kunzelmann, 1996). Die Bruchzentren können sich nach entsprechender Belastung bis an die Oberfläche ausbreiten, wobei das von den Brüchen umgebene Material verloren geht. Kommt es zu einem Materialverlust durch surface fatigue, so gibt es verschiedene Hypothesen, auf welcher Weise dieser erfolgen kann (siehe Diskussion).

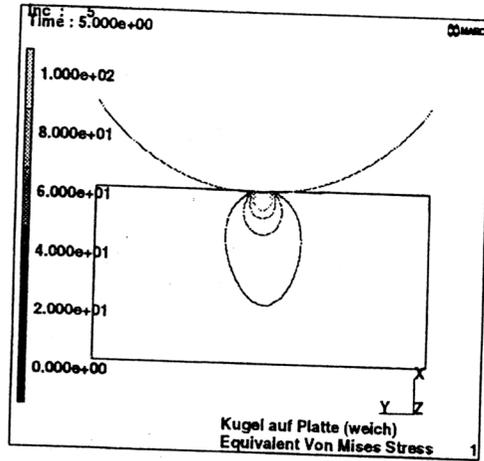


Abb. 2.8: Finite Elemente Simulation des Hertzschen Spannungsfeldes unterhalb eines punktförmigen Kontaktes (Kunzelmann, 1996).

• Korrosiver Verschleiß (Corrosive wear)

Dieser entsteht, wenn eine chemisch veränderte, oberflächliche Schicht eines Werkstoffes mechanisch entfernt wird. Es folgt eine weitere chemische Modifikation der Oberfläche, welche wiederum entfernt wird (Entspricht der Erosion nach Hickel, 1989).

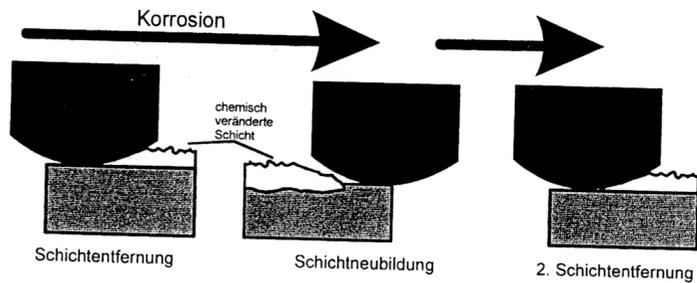


Abb. 2.9: Schema des korrosiven Verschleiß'

3. Material und Methode

3.1 Material

3.1.1 Zusammensetzung der Probematerialien

Es werden 17 Komposite, die in drei Gruppen unterteilt werden, untersucht. In den ersten beiden Gruppen wird der Fülleranteil, in der dritten Gruppe wird der Matrixanteil variiert. Gruppe 1 ist mit Füllkörpern von 1 µm, Gruppe 2 von 13,7 µm Durchmesser gefüllt. Ihr Anteil in Gew.-% nimmt von Material 1 nach Material 2 von 63% nach 52% ab. Anschließend erfolgt eine Abnahme in 10 Gew.-%-Schritten bis 22 Gew.-% bei dem jeweils fünften Material.

Die Komposite 11-17 bilden die dritte Gruppe. Der Füllergehalt bleibt mit insgesamt 81,9 Gew.-% konstant, der Anteil der Monomerfraktion (Benzylmethacrylat) wird von 0 bis 3,61 Gew.-% erhöht.

Die Inhaltsangaben in den folgenden Tabellen und Erläuterungen beziehen sich auf Angaben der Fa. Ivoclar AG.

Komposite, Fa. Vivadent				
Gruppe	Nummer	Materialnummer	Materialcode	Inhaltshinweise der Verpackung
1	1	13	RZ 7000	63% GM 27884 1,0µm sil.
	2	14	RZ 7001	52% GM 27884 1,0µm sil.
	3	15	RZ 7002	42% GM 27884 1,0µm sil.
	4	16	RZ 7003	32% GM 27884 1,0µm sil.
	5	17	RZ 7004	22% GM 27884 1,0µm sil.
	6	18	RZ 7005	63% GM 27884 13,7µm sil.
2	7	19	RZ 7006	52% GM 27884 13,7µm sil.
	8	20	RZ 7007	42% GM 27884 13,7µm sil.
	9	21	RZ 7008	32% GM 27884 13,7µm sil.
	10	22	RZ 7009	22% GM 27884 13,7µm sil.
	11	23	BB 30921	/
	12	24	BB 30922	/
	13	25	BB 30931	/
	14	26	BB 30932	/
	15	27	BB 30933	/
	16	28	BB 30941	/
	17	29	BB 30942	/

Tab. 3.1: Aufschlüsselung der Materialcodes der geprüften Komposite

Gruppe 1

Angaben in Gew.-%	Komposit13	Komposit14	Komposit15	Komposit15	Komposit17
Name	RZ 7000	RZ 7001	RZ 7002	RZ 7003	RZ 7004
Nupol	14,21	18,81	22,99	27,17	31,35
RM3	12,64	16,73	20,44	24,16	27,88
SR205	6,80	9,00	11,00	13,00	15,00
Photoinitiator	0,33	0,42	0,51	0,61	0,70
Additive	0,03	0,05	0,06	0,07	0,07
GM 27884 1 µm sil.	63,00	52,00	42,00	32,00	22,00
HDK 2000	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
Gesamt	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Tab. 3.2: Inhaltsstoffe der Komposite 1 bis 5 in Gewichtsprozent.

Gruppe 2

Angaben in Gew.-%	Komposit 18	Komposit 19	Komposit 20	Komposit 21	Komposit 22
Name	RZ 7005	RZ 7006	RZ 7007	RZ 7008	RZ 7009
Nupol	14,21	18,81	22,99	27,17	31,35
RM3	12,64	16,73	20,44	24,16	27,88
SR205	6,80	9,00	11,00	13,00	15,00
Photoinitiator	0,33	0,42	0,51	0,61	0,70
Additive	0,03	0,05	0,06	0,07	0,07
GM 27884 1 µm sil.	63,00	52,00	42,00	32,00	22,00
HDK 2000	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
Gesamt	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Tab. 3.3: Inhaltsstoffe der Komposite 6 bis 10 in Gewichtsprozent.

Gruppe 3

in Gew.-%	Komposit 23	Komposit 24	Komposit 25	Komposit 26	Komposit 27	Komposit 28	Komposit 29
Name	BB30921	BB30922	BB30931	BB30932	BB30933	BB30941	BB30942
Nupol	7,57	7,38	7,19	7,00	6,82	6,44	6,06
RM3	6,70	6,53	6,37	6,20	6,03	5,70	5,37
SR205	3,63	3,53	3,44	3,35	3,26	3,08	2,90
Bz-Methacrylat	0,00	0,46	0,90	1,36	1,80	2,71	3,61
Photo-initiator	0,14	0,14	0,14	0,13	0,13	0,12	0,11
Additive	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,06	0,06
GM 27884 1 µm sil.	51,61	51,61	51,61	51,61	51,61	51,61	51,61
Sphärosil 1,2 sil.	14,39	14,39	14,39	14,39	14,39	14,39	14,39
OX50	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
YbF ₃	14,89	14,89	14,89	14,89	14,89	14,89	14,89
Gesamt	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Tab. 3.4: Inhaltsstoffe der Komposite 10 bis 17 in Gewichtsprozent.

Zu den Inhaltsstoffen können folgende Erläuterungen gemacht werden:

- Nupol: Monomer
- RM - 3: Monomer
- SR - 205: Monomer
- Bz - Methacrylat: Benzylmethacrylat, ein Monomer, beeinflusst den Quervernetzungsgrad.

Dichte in g/cm ³	Monomer	Polymer	Differenz in %
Nupol	1,152	1,226	+ 6,03%
RM-3	1,11	1,19	+ 6,72%
SR-205	1,072	1,25	+ 14,24%
Bz-Methacrylat	1,04	-/- *	-/- *

* Dichte des Polymers nicht verfügbar

Tab. 3.5: Die Dichten der Monomere

- Photoinitiator: Kombination aus Campherchinon und N,N-2-Cyanoethyl-methylanilin.
- GM 27884 sil.: Ein silanisierter Glasfüller für den verbesserten Verbund zur organischen Matrix mit einem Durchmesser von 1 µm bei den Gruppen 1 und 3 sowie 13,7 µm bei der Gruppe 2.
- Sphärosil 1,2 sil.: silanisierter Mikrofüller.
- OX - 50: Mischoxidfüller
- YbF₃: Ytterbiumtrifluorid; Ytterbium ist ein Element mit einer hohen Atommasse und bewirkt Röntgenopazität. Fluorid wird in geringen Mengen abgegeben und lagert sich in die angrenzende Zahnhartsubstanz ein.

- HDK 2000: Handelsname einer hochdispersen Kieselsäure (amorphes Siliziumdioxid) der Fa. Wacker AG, München. HDK 2000 zählt mit einer Partikelgröße zwischen 7 und 40 nm zu den Mikrofüllern, wird durch Hydrolyse von Siliziumtetrachlorid in einer Knallgasflamme gewonnen und dient als Verdickungsmittel.

HDK 2000	2,1
GM 27884	2,734
Sphärosil	2,504
YbF ₃	8,1
OX - 50	2,1

Tab. 3.6: Dichte der Füller in g/cm³

3.1.2 Herstellung der Proben

Sowohl in der Acta-Maschine als auch im Fatigue-Tester kommen exakt die selben Probenräder zum Einsatz. Ihre Herstellung soll deshalb übergeordnet dargestellt werden.

Da die Polymerisation der Composite nach standardisierten Kriterien erfolgen sollte, mußte von einem direkten Applizieren der Proben auf das Rad und der damit nicht vermeidbaren mehrfachen Lichtexposition Abstand genommen werden.



Abb. 3.1: Musterprobenrad zur Abformung vorbereitet

So mußte eine eigene Technik zur Herstellung der Probenräder entwickelt werden: Ein leeres Probenrad wird mit Seitenscheiben versehen, die mit ihrem Durchmesser die Höhe der späteren Kompositproben definieren. Zusätzlich bilden diese Metallscheiben die laterale Begrenzung der Fächer aus. Die beiden Nachbarfächer, welche das Hauptfach begrenzen, werden mit Komposit beschickt und präzise modelliert, da die Gipsmodelle der Silikonabdrücke zur späteren Formgebung der Kompositproben dienen sollen. Das so vorbereitete Probenrad wird mit Drysep® (Steffens, D-Gräfelfing) isoliert und mit Optosil®-Comfort (Heraeus Kulzer, D-Dormagen) mehrfach abgeformt, da von einer Zerstörung nach mehrmaligem Ausgießen auszugehen ist. Diese Abformungen werden mit Silikonentspanner (Omnident, D-Rodgau) besprüht und mit Fuji Rock® White (GC International Corp., D-Hofheim/Taunus), einem Superhartgips, ausgegossen.

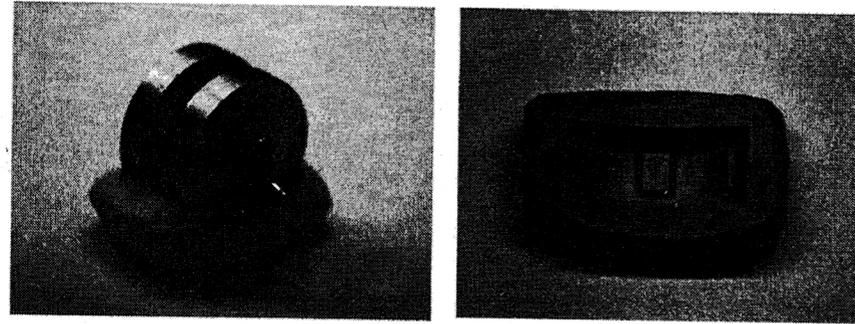


Abb. 3.2a/b: Silikonabformung mit Optosil®.

Die so gewonnenen Gipsmodelle werden auf 1 cm Höhe getrimmt, damit nur das Hauptfach sowie die beiden Nebenfächer vorhanden sind. Schließlich wird eine mittige Bohrung in den Boden des Hauptfaches gesetzt, um ein Herausdrücken der auspolymerisierten Komposite mit Hilfe eines Metallstiftes von unten zu ermöglichen. Um die Gipsmodelle hierbei nicht zu zerstören, werden sie mit einem Trennmittel (Die Lube®, Dentaurum, D-Pforzheim) gegen die eingebrachten Komposite isoliert.

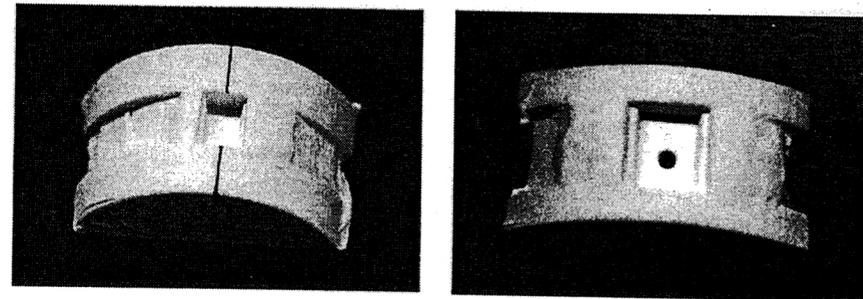


Abb. 3.3a/b: Angezeichnetes Gipsmodell und Gipsmodell auf 1cm getrimmt sowie mit Bohrung versehen.

Um eine vorzeitige Polymerisation auszuschließen, wird die Raumbeleuchtung gering gehalten. Die Komposite werden in schwarzen, lichtdichten Kunststofföpfen geliefert. Weil die Komposite mit Füllergehalten von 42% und weniger niedrigviskos sind, werden sie vor der Applikation auf einem gewachsenen Anmischblock mit einem Metallspatel ausgestrichen, um enthaltene Lufteinschlüsse weitgehend zu eliminieren.

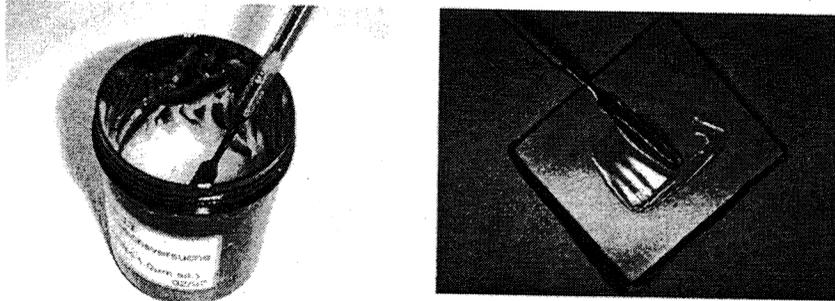


Abb. 3.4a/b: Lichtdichtes Behältnis und Ausstreichen des Komposites mit Hilfe eines Spatels.

Es wird in 2-Schicht Inkrementtechnik gearbeitet, damit die allgemein empfohlene Schichtdicke von 2 mm pro Lichthärtungsvorgang nicht überschritten wird.



Abb. 3.5: Zur Hälfte gefüllte Gipsmodelle im Lichtofen.

Um eine glatte Oberfläche zu erzielen, wurde zur Abdeckung ein Tesa®-Film (glasklar, Breite 19mm; Beiersdorf AG, D - Hamburg) verwendet. Durch seine hohe Strukturfestigkeit werden Wellen in der Oberfläche vermieden und auch hochviskose Kompositmaterialien können durch ihn mit höherem Kraftaufwand zur Seite gedrängt werden. Zudem bindet die Klebeschicht an das auspolymerisierte Komposit, so daß beim Abziehen des Tesa®-Filmes die Probelöcke haften bleiben und mit herausgezogen werden können. Eine Sauerstoffinhibitionsschicht kann durch die vollständige Abdichtung gegenüber der Raumluft nicht entstehen.

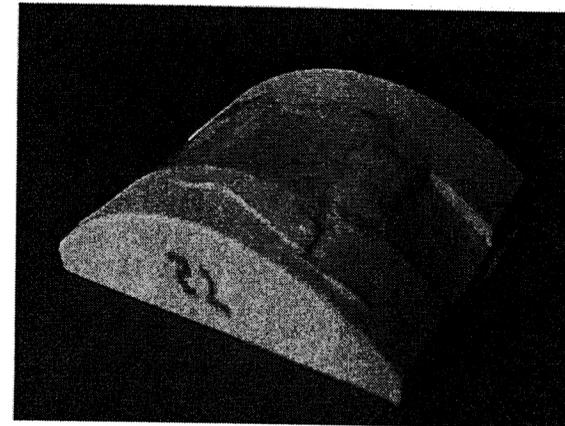


Abb. 3.6: Zweite Schicht Komposit eingefüllt und mit Tesa®-Film abgedeckt.

Die Lichthärtung der 16 Komposite für ein Rad erfolgt einzeln in ihren Gipsblöcken in exakt 1 cm Höhe über dem Boden, also mit immer gleichem Abstand zur Lichtquelle, die für diesen Abstand kalibriert wurde. Als Gerät dient hierzu der Spectramat® (Ivoclar, Schaan, Liechtenstein). Die Belichtungszeit der Komposite beträgt zwei mal 3 Minuten.

Das separate und standardisierte Herstellungsverfahren soll bei der späteren Auswertung mögliche Fehlerquellen ausschließen.



Abb. 3.7: Spectramat®, Fa. Ivoclar AG.

Nach verschiedenen Untersuchungen mit kürzeren, in der Praxis üblichen Belichtungszeiten von je 40 Sekunden stellte sich heraus, daß die Materialien noch relativ weich und ihre Farbe noch gelblich war, was auf noch nicht aufgebrauchte Photoinitiator Mengen (Campherchinon) zurückgeführt wurde. Nach Rücksprache mit der Fa. Vivadent wurde die Dauer der Lichtexposition drastisch erhöht, um eine völlige Durchhärtung der Materialien sicherzustellen. Weil die Proben mit dualhärtenden Befestigungskompositen auf das Probenrad geklebt werden und eine weitere, eventuell ungleichmäßige Lichtexposition erfolgt, muß eine abgeschlossene Polymerisationsreaktion vorausgesetzt werden. De Gee (1994) nennt diese Vorgehensweise „overcure“ (engl.: überhärten).

Nach dem Durchhärten im Lichtofen werden die Probematerialien aus der Gipsform gedrückt und die Ränder mit einem Heatless® - Stein (Mizzy Inc., USA – Cherry Hill, NJ) beschliffen, bis sie spannungsfrei auf das Aufnahme- rad passen.

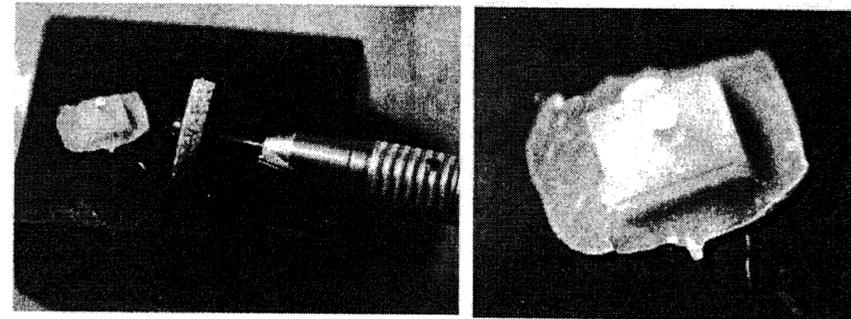


Abb. 3.8a/b: Unbeschiffene Kompositproben.

Um einen chemischen Verbund zwischen Einsetzkleber und dem Probenrad zu gewährleisten, wird die Metallfläche durch das Rocatec®-System (Espe, D-Seefeld) modifiziert. Hierzu wird zunächst die Oberfläche grob sandgestrahlt, damit oberste Schmutz - und Oxidschichten entfernt werden. Im zweiten Arbeitsschritt werden mit einem Spezi- alsandstrahlmittel Siliziumverbindungen unter hohem Druck auf die blanke Oberfläche gestrahlt, wodurch sie auf das rauhe, zerklüftete Metall „aufgeschmolzen“ werden. Die entstandene Silikatschicht wird mit Silan, welches sich in einem leicht flüchtigen Lösungsmittel befindet, benetzt. Der nun aufgebraute Adhäsivkomposit bindet chemisch an die langkettigen, hydrophoben Moleküle des Silans. Das selbe Prinzip liegt auch der Verbindung zwischen Füller und Matrix von Kompositen zu Grunde.

Die Proben werden mit Variolink® (Vivadent, Schaan, Liechtenstein) oder Twinlook® (Heraus Kulzer, D-Dormagen) in Vierergruppen aufgeklebt. Bei beiden Befestigungskunststoffen handelt es sich um dual, d.h. sowohl licht - als auch chemisch härtende Materialien. Zum Aushärten der Befestigungskleber wird das Probenrad nochmals für drei Minuten im Lichtofen exponiert. Auf

Cyanoacrylat, wie es von De Gee (1994) verwendet wird, wurde wegen der Löslichkeit dieses Materials in Wasser verzichtet

Weil die Reihenfolge der aufgeklebten Kunststoffe auf dem Probenrad variiert, wird diese genau notiert, damit sich später bei der Auswertung keine Verwechslungen ergeben können.

		Fach – Nummer															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Rad - Nummer	1	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	28	29
	2	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	28	29
	3	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	28	29
	4	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	28	29
	5	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	28	29
	6	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	28	29
	7	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	28	29
	8	25	26	27	28	25	26	27	28	25	26	27	28	25	26	27	28
	9	25	26	27	28	25	26	27	28	25	26	27	28	25	26	27	28
	10	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	28	29
	11	13	14	15	27	16	17	18	27	19	20	21	27	22	23	24	27
	12	13	14	15	27	16	17	18	27	19	20	21	27	22	23	24	27
	13	13	14	15	16	16	17	18	27	19	20	21	27	22	23	24	27
	14	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	28	29
	15	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	28	29
	16	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	28	29

Tab. 3.7: Materialbelegung der Acta-Räder, Experiment 1.

		Fach – Nummer																			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Rad - Nummer	1	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
	2	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
	3	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
	4	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22

Tab. 3.8: Materialbelegung der Acta-Räder, Experiment 2.

		Fach – Nummer															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Rad - Nummer	1	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	28	29
	2	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	28	29
	3	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	28	29
	4	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	28	29
	5	25	26	27	28	25	26	27	28	25	26	27	28	25	26	27	28
	6	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	13	14	15	16	17	18
	7	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	13	14	15	16	17	18
	8	23	24	25	26	27	28	29	23	24	27	23	24	27	23	24	27
	9	23	24	25	26	27	28	29	23	24	27	23	24	27	23	24	27
	10	23	24	25	26	27	28	29	23	24	27	23	24	27	23	24	27
	11	23	24	25	26	27	28	29	23	24	27	23	24	27	23	24	27
	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	19	20	21	22	19	20
	13	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	19	20	21	22	19	20
	14	25	26	29	26	28	29	25	28	29	25	26	29	26	28	29	25

Tab. 3.9: Materialbelegung der Fatigue-Räder, Experiment 3.

Nach der Herstellung wird das fertige Rad für 24 Stunden bei 37°C in Ringerlösung gelagert. Der Gehalt an NaCl (Kochsalz) von 0,9 g pro 100 ml in Kombination mit der eingestellten Temperatur soll dem Speichel entsprechen und somit die Verhältnisse in der Mundhöhle imitieren. Vor der artifiziell herbeigeführten Beanspruchung der Materialien sollen also möglichst

wirklichkeitsgetreue Verhältnisse geschaffen werden, um sich von der Situation in vivo nicht all zu weit zu entfernen. Zudem bewirkt die erhöhte Temperatur eine Nachpolymerisation von eventuell verbliebenem Restmonomer sowohl im Komposit als auch im Befestigungskleber im Sinne einer chemischen Härtung.

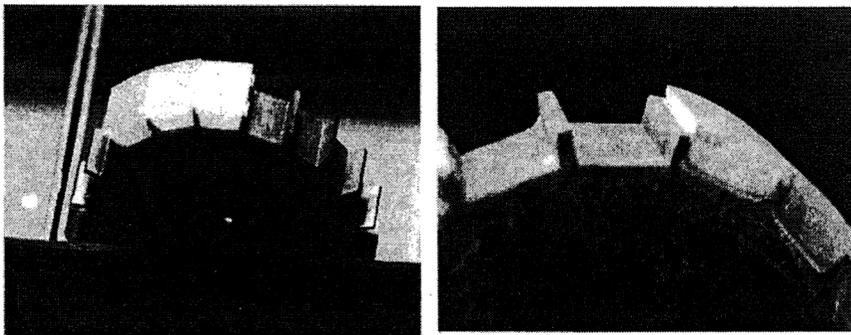


Abb. 3.9a/b: Kompositprüflinge auf das Probenrad aufgepaßt und aufgeklebt.

Vor der eigentlichen Versuchsdurchführung muß die Oberfläche des fertiggestellten Probenrades beschliffen werden. Es besitzt zwar durch den verwendeten Tesa®-Film eine relativ glatte Oberfläche, dennoch sind Niveaunterschiede, bedingt durch die verschiedenen Viskositäten der Komposite, nicht zu vermeiden. So besitzen Kunststoffe, deren Konsistenz niedrigviskos ist, nicht die nötige Strukturstärke, um den konvexen Verlauf der seitlichen Begrenzungsscheiben zu folgen. Dagegen sind hochfüllerhaltige und entsprechend hochviskose Komposite nur mit hohem Kraftaufwand an den Rändern ausstreichbar. So bleiben niedrigviskose Materialien meist unterhalb, hochviskose über den vorgegebenen Niveaus.

Die Probenräder werden in der Acta-Maschine abgeschliffen, damit nach Beendigung des Schleifvorganges der Radius an jedem Ort gleich ist und das Probenrad während des Versuchsablaufes nicht unrund läuft. Durch den

hierdurch einhergehenden dynamischen Wechsel der Andruckkraft würde der wahre Verschleiß verfälscht werden.

Für das Beschleifen werden diamantierte Schleifscheiben (Ernst Winter & Sohn GmbH & Co., D-Norderstedt), mit abnehmendem Korndurchmesser verwendet. Während des Schleifvorganges laufen Proben- und Schleifrad in einem mit Wasser gefüllten Glasbehältnis, um den anfallenden Schleifschlamm aufzunehmen.

Rad- Nummer	Bestell- Nummer	Mittlere Korngröße	Vorgang
1	1A1-20-15-2- 6/D126/K- plus/C100	126 µm	Grobes Abschleifen sichtbarer Niveaunterschiede
2	1A1-20-15-2- 6/D91/K-plus/C100	91 µm	Grobe Bearbeitung feiner Unebenheiten
3	1A1-20-15-2- 6/D64/K-plus/C100	64 µm	Glättung der durch die vorausgegangenen Korngrößen tief zerfurchten Oberfläche
4	1A1-20-15-2- 6/D25/K-plus/C100	25 µm	Politur

Tab. 3.10: Schleifräder der Fa. Winter.

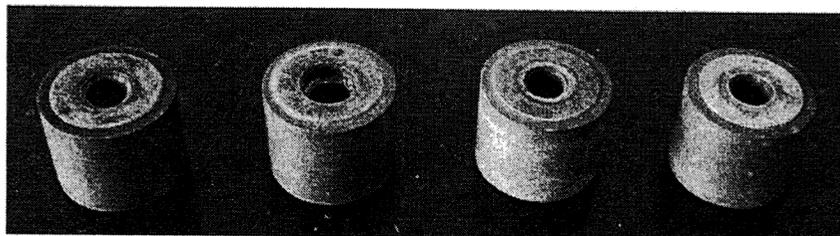


Abb. 3. 10: Die vier Schleifräder (Fa. Winter) mit absteigender Körnung.

Durch den gering eingestellten Anpreßdruck von 15 N kann es zu Interferenzerscheinungen kommen, die das System unter starker Lärmentwicklung zum Schwingen in Resonanz bringt. Dieses Phänomen kann eine oberflächliche Zerrüttung der molekularen Struktur des Probenmaterials erzeugen und schwächt dieses in seinen mechanischen Eigenschaften. Mit Hilfe der Einstellschraube muß die Anpreßkraft abgemindert werden, bis der Schleifabtrag nur noch moderat erfolgt. Dieser Arbeitsschritt kann bis zu einer Stunde dauern und ist beendet, wenn zirkulär alle Oberflächenanteile sichtbar bearbeitet wurden.

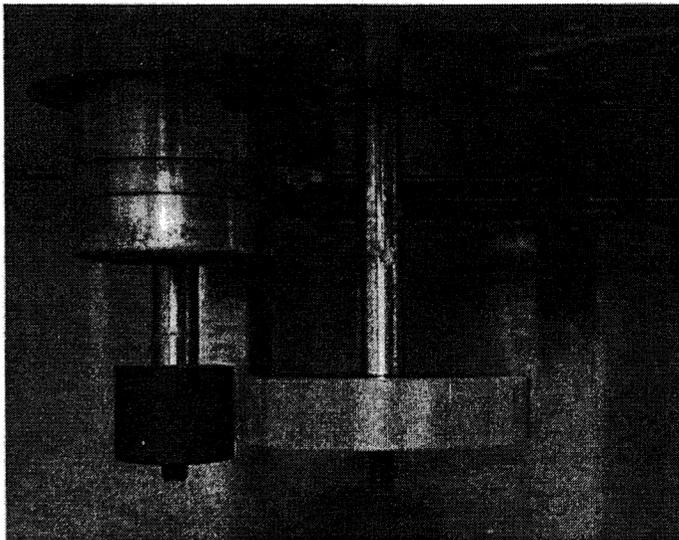


Abb. 3.11: Probenrad und Schleifrad in der Acta – Maschine (ohne Wasserbehältnis)
(oben horizontal verlaufend die Stellschraube zur Anschlagbegrenzung).

3.2 Methode

3.2.1 Acta-Maschine

Die Acta-Maschine besteht aus zwei an konterrotierenden Achsen befestigten Rädern. Das linke Rad wird als Antagonistenrad bezeichnet, hat einen Durchmesser von 20 mm, eine Breite von 6 mm und besitzt an seiner umlaufenden Seite eine wabenförmige Struktur. Sie dient der Aufnahme und dem Transport des Abrasivmediums.

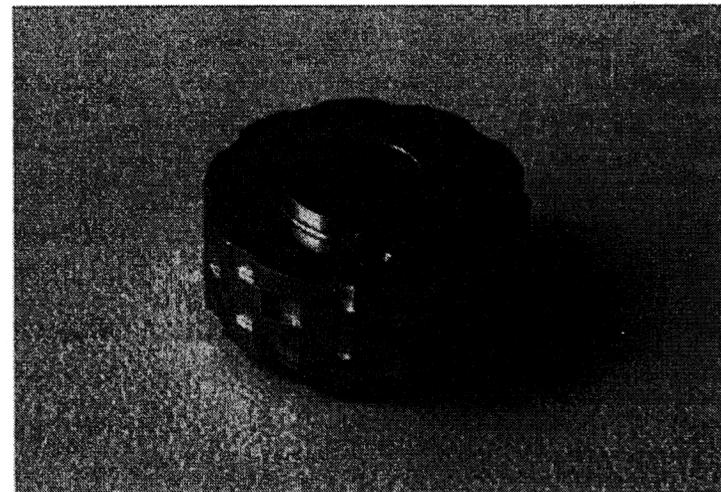


Abb. 3.12: Antagonistenrad.

Das Antagonistenrad und seine Achse sind in horizontaler Richtung beweglich gelagert. Mit Hilfe einer Spannfeder, welche sich im Gerätegehäuse befindet, wird es mit einer auf 15 N eingestellten Kraft gegen das Probenrad gedrückt. Direkter Kontakt der scharfkantigen Metallflächen wird durch diese

Anpreßkraft nicht erreicht, die Abrasion wird ausschließlich durch die grobkörnige Suspension bewirkt.

Das rechte Rad dient der Aufnahme der Kompositproben. Es besitzt, inklusive der aufgebracht Kunststoffe, einen Durchmesser von 52 mm und eine Breite von 10 mm, welche um 4 mm größer ist, als die des Antagonistenrades. Hieraus ergeben sich nach Abschluß des Abrasionsversuches zwei unbearbeitete Streifen von je 2 mm beiderseits lateral an der Probenradoberfläche, welche als Referenz zur Vermessung des Höhenverlustes bei der Auswertung dienen.

Die innerhalb der Maschine liegenden Enden der Achsen werden über Zahnriemen von elektronisch gesteuerten Elektromotoren angetrieben. Ihre Steuerung befindet sich an der Vorderseite der Maschine in Form von Drehpotentiometern, in deren Mitte sich die eingestellte Drehgeschwindigkeit von 0-999 ablesen läßt. Dieser Zahlenwert ist rein deskriptiv, besitzt also weder Einheit noch Dimension und hat auf die Drehfrequenz keinen linearen Einfluß. Zur zuverlässigen Bestimmung der Winkelgeschwindigkeit ist das Abzählen der Umdrehungen pro gemessener Zeiteinheit notwendig. Die Drehgeschwindigkeit des rechten Rades ist auf 436 eingestellt, dies entspricht einer Frequenz von 1 Hz. Sie soll die physiologische Kaufrequenz (De Gee, 1994) imitieren und ermöglicht dem Probenmaterial eine realistische Zeitspanne zur Rückstellung nach erfolgter mechanischer Disposition.

Antagonistenrad und Probenrad laufen gegensinnig, damit eine gleichsinnige Bewegung an ihrer Berührungslinie resultiert. Durch den unterschiedlichen Durchmesser der Räder sowie auf Grund verschiedener Drehfrequenzen kommt es am Ort des geringsten Abstandes zu unterschiedlichen Bahngeschwindigkeiten, deren Differenz als „Slip“ bezeichnet wird und in Prozent ausgedrückt wird.

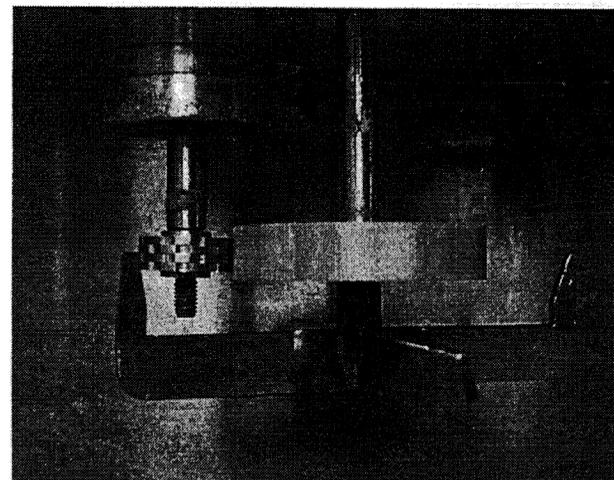


Abb. 3.13: Antagonistenrad, Probenrad und Mischflügel fertig montiert.

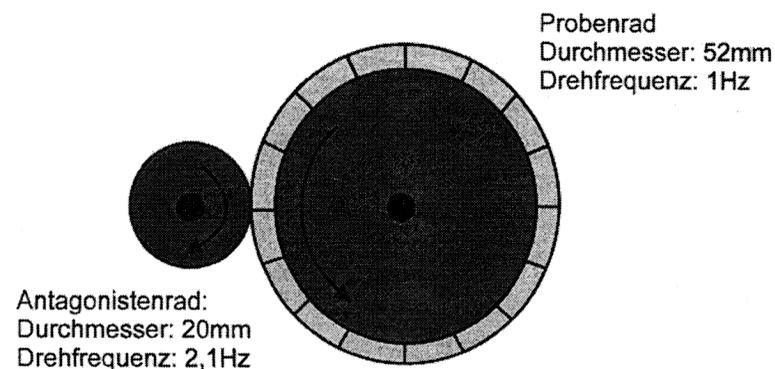


Abb.3.14: Schema von Antagonisten- und Probenrad in der Aufsicht.

Berechnung des Slip:Winkelgeschwindigkeit: $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ Bahngeschwindigkeit: $v = r \cdot \omega$

Antagonistenrad	Probenrad
Winkelgeschwindigkeit: $2 \cdot \pi \cdot 2,123 \text{ Hz} = 13,34^\circ/\text{s}$	Winkelgeschwindigkeit: $2 \cdot \pi \cdot 1 \text{ Hz} = 6,283^\circ/\text{s}$
Bahngeschwindigkeit (v_A): $1 \text{ cm} \cdot 13,34^\circ/\text{s} = 13,34 \text{ cm/s}$	Bahngeschwindigkeit (v_P): $2,6 \text{ cm} \cdot 6,283^\circ/\text{s} = 16,33 \text{ cm/s}$

$$\% \text{Slip} = \frac{v_A - v_P}{v_P} \cdot 100\% = -18,31\%$$

Das Probenrad besitzt also trotz der geringeren Drehfrequenz, bedingt durch seinen größeren Durchmesser, eine um etwa 18% größere Bahngeschwindigkeit. Das bedeutet, daß der angepreßte Hirsebrei mit einer effektiven Geschwindigkeit von 3 cm/s (entspricht 108 m/h) an den Proben reibt, um so einen Verschleiß herbeizuführen.

3.2.1.1 Das dritte Medium: Die Hirsesuspension

Bei den Experimenten 1 und 2 handelt es sich um 3-Körper-Abrasionstests. Die ersten beiden Körper werden durch Antagonisten- und Probenrad dargestellt, der dritte Körper ist das Hirsemedium, in welchem die beiden Räder laufen. Das Glasgefäß enthält 220 g (bzw. ml) destilliertes Wasser, zu welchem 150 g Hirse zugefügt werden. Da es sich um eine Feststoff in Flüssigkeit – Mischung handelt, spricht man von einer Suspension.

Hirse besitzt einen Fettgehalt von ca. 4 % (Pallav, 1993), hat in unbearbeiteter Form eine Korngröße von etwa 2 mm und besitzt einen derben und widerstandsfähigen Mantel. In dieser Konsistenz ist das Material zu grobkörnig und vermischt sich insbesondere nicht mit Wasser. Es muß modifiziert werden.

Zur Herstellung werden 150 g Hirse in drei Portionen zu je 50 g in einer elektrischen Kaffeemühle (Mellert M58, Hermann Mellert GmbH & Co. KG, D-Bretten) exakt 5 s lang gemahlen. Um das Hirsemehl trotz der gleichen Herstellungsprämissen im Verlauf der gesamten Versuchsreihe zu standardisieren, wurde zu Anfang eine Menge von ca. 8 kg Hirse gemahlen und in einem Vorratsbehältnis gemischt, damit eine gleichbleibenden Qualität des Hirsemehls gewährleistet ist.

Die getrockneten und daher harten Zellulosefasern des Hirsemantels fungieren nur anfänglich als Abrasionsmedium, bis sie von Wasser durchtränkt sind und geschmeidig werden. Der eigentliche Abrasivstoff sind Phytolithe (griechisch: "Planzensteine"). Sie werden von Pflanzen bei ihrer Austrocknung ausgefällt und enthalten Mineralreste, welche aus dem Boden stammen, in dem sie gewachsen sind (Osterkamp / Friedman, 1997). Phytolithe sind durch ihren anorganischen Charakter schwer wasserlöslich, besitzen eine scharfkantige Form und eine harte Konsistenz. Sie haben eine Mohs'-Härte von 5,5-6,5 (Kunzelmann, 1996), ihre Größe beträgt etwa 10 bis 20 µm.



Abb. 3.15a/b: Phytolithe unterschiedlicher Morphologien; REM-Aufnahme, Darstellung invers, Magnifikation nicht bekannt.

Mit Hilfe des am Probenrad montierten Mischflügels wird die Dichte der Hirsesuspension im Glas an jedem Ort gleich gehalten.

Bei der Herstellung der Suspension werden 3 ml des Cytotoxikums Natriumacid beigemischt, um bakterielle Fäulnis- und Gärungsprozesse zu hemmen. Eine „Andauung“ bzw. chemische Modifikation sowohl des Hirsemediums als auch der Composite kann somit vermieden werden.

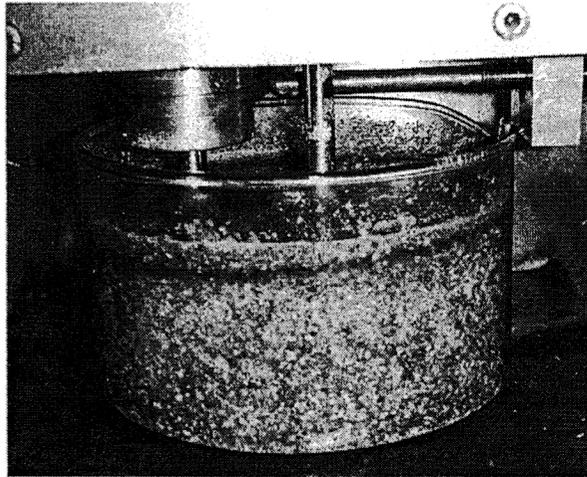


Abb. 3.16: Hirsemedium, in dem Antagonisten- und Probenrad laufen.

3.2.1.2 Versuchsablauf Acta-Maschine

3.2.1.2.1 Erstes Experiment: Evaluation der Abrasion

In der Acta-Maschine wird das Probenrad an der rechten Achse montiert, wobei es mittels eines 4-flügeligen Mischrades fixiert wird. An der linken Achse wird das Antagonistenrad montiert und mit Distanzscheiben so zentriert, daß es genau mittig zum Probenrad läuft. Nach dem Ansetzen der

Hirsesuspension wird der Versuch gestartet, wobei alle Startzeiten protokolliert werden, um Daten über Laufzeit und -dauer sowie Zyklanzahl festzuhalten.

Die Gesamtzahl der Testzyklen wird auf 200.000 pro Rad festgelegt, wobei nach jeweils 50.000 Zyklen der Hirsebrei gewechselt wird.

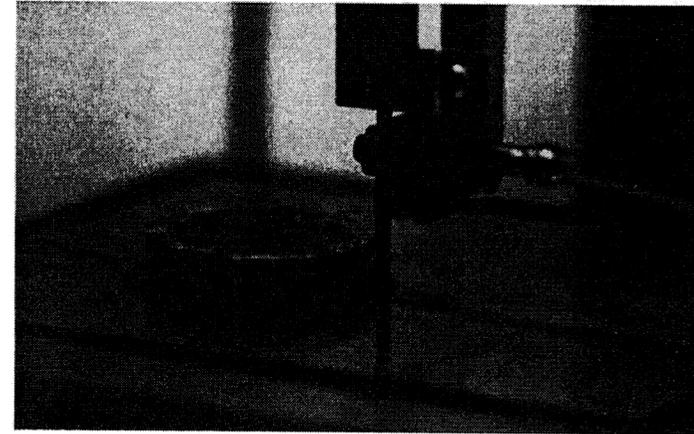


Abb. 3.17: Markierung der Probenränder zur Differenzierung im Perthometer.

Nach Beendigung des Versuches wird das Probenrad der Acta-Maschine entnommen und zur profilometrischen Vermessung vorbereitet. Hierzu werden die glattgeschliffenen Übergänge zwischen den einzelnen Probenfächern mit einer Tischbandsäge, deren Sägeband diamantiert ist und eine Abmessung von 5 mm x 0,4 mm besitzt, etwa einen halben Millimeter tief eingesägt (Minimot Micro-Bandsäge MBS 220E, Proxxon, D-Niersbach). So können die verschiedenen Proben bei der Auswertung am PC visuell voneinander unterschieden werden, weil auch die Sägelinien vom Profilometer erfaßt werden. Da aus konstruktiven Gründen des Profilometers eine Wässerung während der Vermessung nicht möglich ist, erfolgt diese unmittelbar nach Abschluß des Experimentes.

3.2.1.2.2 Zweites Experiment: Surface Fatigue durch Slipvariation

Das zweite Experiment soll Abrasionsvorgänge des ersten Experimentes genauer quantifizieren und Hinweise auf einen Surface-Fatigue in der Acta-Maschine geben.

Hierzu wird der Slip von -18% auf $+15\%$ verändert. In der Praxis bedeutet dies, daß der Betrag der Bahngeschwindigkeitsdifferenz zwischen Antagonisten- und Probenrad konstant bleibt. Jedoch läuft das Antagonistenrad nun nicht 3 cm/s langsamer, sondern um etwa den selben Betrag schneller als das Probenrad, dessen Lauffrequenz von 1 Hz beibehalten wird. Hierzu wird das Steuerpotentiometer der linken Antriebsachse auf 682 gestellt. Die neue Drehfrequenz des Antagonistenrades ist $2,99\text{ Hz}$.

Aus den Kapiteln 4.1 und 5.1 ergibt sich, daß die Abrasion der Probematerialien der dritten Gruppe, bedingt durch den konstanten Füllergehalt, nicht signifikant variiert. Entsprechend werden nur die verbleibenden 10 Probematerialien aus den Gruppen 1 und 2 geprüft. Hierzu findet eine Serie neuer Probenräder mit insgesamt 20 , nicht mehr 16 Fächern Anwendung. Alle anderen Parameter wie Probenherstellungsmodus, Abrasionsmedium und Gesamtzyklenzahl entsprechen denen des ersten Experimentes und werden nicht geändert.

3.2.2 Fatigue-Tester

Der Fatigue-Tester ist zur Aufnahmen der gleiche Probenräder, wie sie für die Acta-Maschine verwendet werden, geeignet. Das Probenrad wird nun senkrecht zum Boden auf die horizontal ausgerichtete Drehachse des Fatigue-Testers montiert. Sie wird durch einen mit einem Potentiometer stufenlos

regelbaren Elektromotor angetrieben. Wie bei der Acta-Maschine beträgt die Drehfrequenz 1 Hz , das entspricht einer Potentiometereinstellung auf dimensionslose „ $8,5$ “. Mit seinem unteren Viertel läuft das Probenrad in einer Metallwanne, gefüllt mit destilliertem Wasser. Es benetzt das Probenrad während der Drehung auf der Probenoberfläche und dient der Entfernung von Debris der verschlissenen Kompositproben während des Versuchsablaufes. So können mit hoher Wahrscheinlichkeit andere Abrasionsphänomene, außer dem Surface-Fatigue, durch ein fehlendes Abrasivmedium, ausgeschlossen werden.

Das Laufrad ist kugelgelagert und wird nicht angetrieben. Es läuft somit völlig passiv und folgt der Bewegung des angetriebenen Probenrades. Analog zur Acta-Maschine kann postuliert werden, daß der Slip $\pm 0\%$ beträgt. Das Laufrad besitzt einen Durchmesser von 20 mm und eine Breite von 9 mm . Seine Lauffläche ist auch nach lateral abgerundet gestaltet, so daß es eine torusförmige Geometrie besitzt. Es liegt dem unverschlissenen Probenrad punktförmig auf.

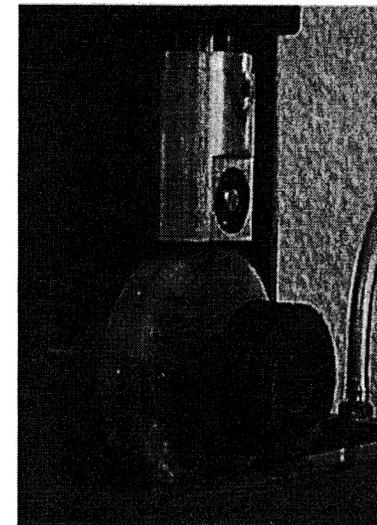


Abb. 3.18: Laufradaufnehmer und Probenrad.

Das Laufrad ist am unteren Ende einer Metallstange fixiert, welche nur einen vertikalen Freiheitsgrad besitzt. Die Metallstange besitzt eine Masse von 0,5 kg und nimmt zwei Metallgewichte à 2 kg auf, woraus eine Gesamtanpreßkraft von insgesamt 45 N resultiert.

Mit Hilfe eines Arretierungshebels kann die Stange oben gehalten werden, wenn sich kein Probenrad in der Maschine befindet.

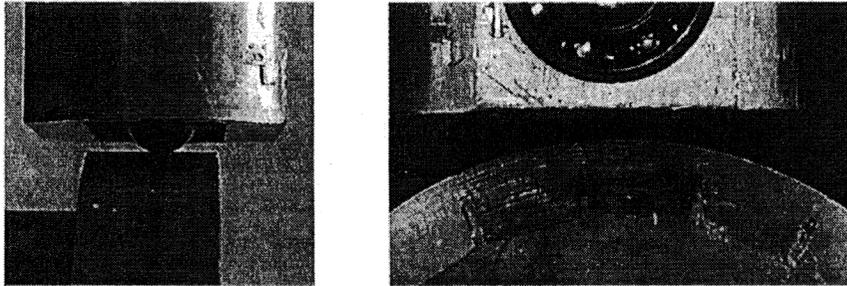


Abb. 3.19a/b: Details Laufrad auf Probenrad.

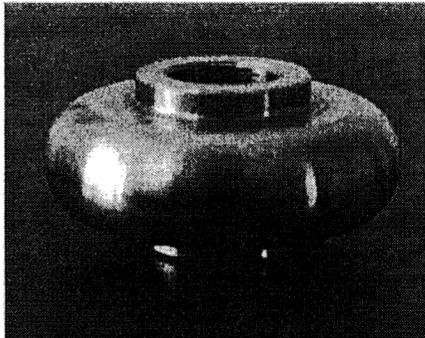


Abb. 3.20: Laufrad, torusförmig.

3.2.2.1 Versuchsablauf Fatigue-Tester

3.2.2.1.1 Drittes Experiment: Evaluation des Surface-Fatigue

Das Probenrad, welches exakt 24 Stunden im 37°C warmen Wasserbad gelegen hat, wird nun in der Acta-Maschine beschliffen. Ist dieser Vorgang beendet, wird es auf die Antriebsachse geschraubt und die Laufwanne mit destilliertem Wasser befüllt. Nach dem Lösen der Rückhaltearretierung, wird das Laufrad vorsichtig auf die Oberfläche des Probenrades abgesenkt. Der Versuch kann gestartet werden.

Empirisch hat sich in Vorversuchen gezeigt, daß der durch den Fatigue-Tester erzeugte Verschleiß im Vergleich zum Substanzverlust der Acta-Maschine um etwa die Hälfte geringer ausfällt, wenn die Anzahl der Zyklen die gleiche ist. Dann würde jedoch der Meßbereich des Vermessungsgerätes an seine untere Grenze gelangen und eine verminderte Präzision provozieren. Aus diesem Grund wurde die Gesamtlauflistung eines jeden Probenrades auf 400.000 Zyklen festgesetzt, um einen Volumenverlust in der Größenordnung der Acta-Maschine zu erzielen.

Nach ca. 4,5 Tagen ist der Versuch beendet und das Probenrad kann, nach Markierung der Probengrenzen, der Vermessungsanlage zugeführt werden.

3.2.3 Auswertung

3.2.3.1 Auswertung Acta-Maschine

3.2.3.1.1 Perthometer

Zur quantitativen Auswertung dient das Perthometer S3P mit der Abtastapparatur FRW-750 (Feinprüf Perthen GmbH, D-Göttingen).

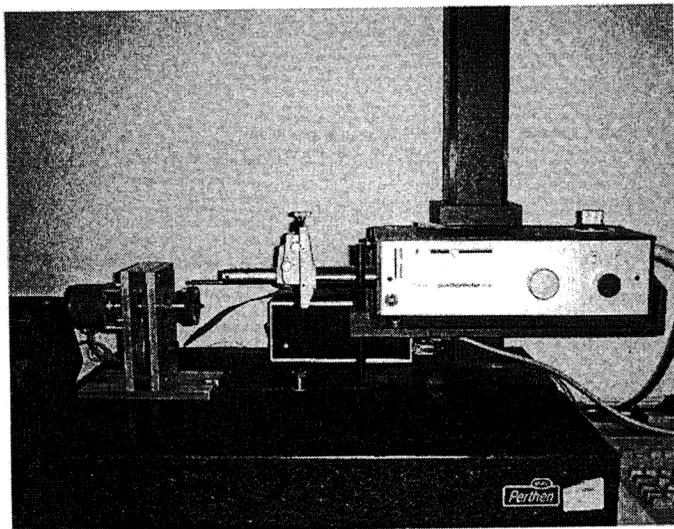


Abb. 3.21: Gesamte Vermessungsanlage Perthometer.

An der Oberfläche des Probenrades befindet sich eine makroskopisch sichtbare und gut fühlbare Abrasionsspur. Zur Vermessung wird es in eine Haltevorrichtung gespannt, welche über ein Zahnriemengetriebe mit einer Untersetzung von 8:1 von einem Schrittmotor angetrieben wird.

Die Radoberfläche wird abgetastet, indem sie durch den Kugeltaster im Verlauf einer Radumdrehung 1600 mal quer abgefahren wird. Nach jeder Messung wird das Rad um $0,225^\circ$ (entspricht $100 \mu\text{m}$) weitergestellt. Die erfaßten Oberflächendaten werden in einem V.24-Protokoll an den Steuerungs-PC gesendet, wo sie auf der Festplatte abgespeichert werden.

Bei der Abtastung handelt es sich um ein Einkufen-Tastsystem, bei dem sich die Gleitkufe an dem Werkstück abstützt und zur Referenzebene, welche den beiden unbearbeiteten, je etwa 2 mm breiten, lateralen Streifen am Probenrad entspricht, ausgerichtet bzw. gleich null gesetzt werden muß. Hierzu dient eine Rändelschraube, bei deren Verstellung der Meßschlitten zum Werkstück in der Höhe verstellt werden kann.

Der Taster selbst ist eine durch einen Metallstab verlängerte Kugel mit einem Durchmesser von 3 mm, die lediglich das Formprofil in der Größenordnung von Wellenstrukturen erfaßt, was im Rahmen dieser Arbeit ausreichend ist. Vom Hersteller wird auch eine Diamantmeßspitze angeboten, welche dazu dient, Oberflächenrauigkeiten zu messen. Aus anderen Gründen wird diese im dritten Experiment verwendet. Der Taster besitzt eine vertikale Auflösung von $< 1 \mu\text{m}$. Der Meßpunkteabstand in querverlaufender Richtung zur Probenoberfläche beträgt $25 \mu\text{m}$.

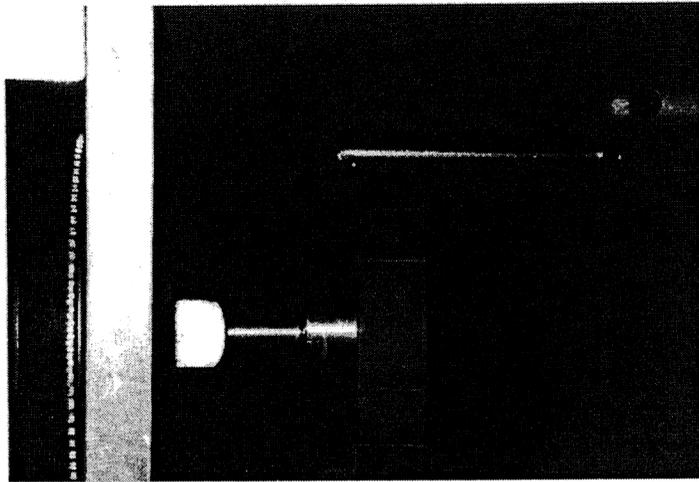


Abb. 3.22: Probenrad und Abtastkugel.

3.2.3.1.2 Dentmes® (Version 2.03)

Hierbei handelt es sich um ein 3D-Abtastprogramm für einen IBM – kompatiblen PC für Windows 3.11. Es dient der Steuerung des Perthometers und der Speicherung der empfangenen Meßdaten. Die Entwicklung erfolgte durch Stefan Kueppers (© 1993, D-Erlangen).

3.2.4.1.3 Match 3D / SPSS

Die auf der Festplatte abgelegten Daten werden auf eine Diskette kopiert, um sie auf einen anderen Rechner übertragen zu können. Hierbei handelt es sich um eine Indy®-Station (Silicon Graphics Industries, USA-Silicon Valley). Die Daten eines Rades entsprechen 1600 2-dimensionalen

Bildern (Abb.3.23), welche mit Hilfe der Routine Match 3D ausgewertet werden.

Dies geschieht, indem auf die vermessene Oberfläche eine Referenzebene gelegt wird, deren Höhe durch die beiden unbearbeiteten Seitenstreifen definiert ist. Der Rechner subtrahiert die Ebenen voneinander und bestimmt so den gesamten, durch Verschleiß verloren gegangenen, mittleren Höhenverlust. Die angebrachten Sägemarken sind auf der Oberfläche deutlich sichtbar, so daß die einzelnen Komposite unterschieden werden können.

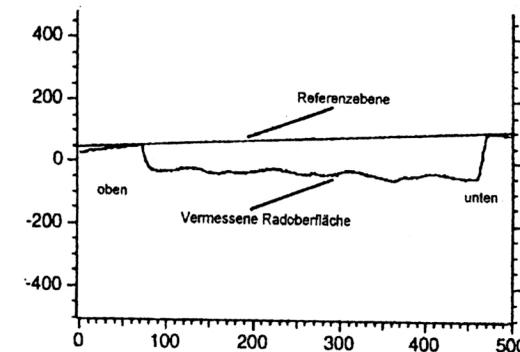


Abb. 3.23: Funktionsweise der Verschleißmessung im Schema (Erläuterung siehe Text).

Die ungleichmäßige, von oben nach unten ansteigende Abrasion ist durch das Flügelrad bedingt, welches das Probenrad von unten mit Hirsesuspension anströmen läßt.

Zur statistischen Analyse dient das Programmpaket SPSS für Windows, Version 9.0. Die Frage nach statistisch relevanten Differenzen wird mit den im Ergebnisteil angegebenen Verfahren ermittelt.

3.2.3.2 Auswertung Fatigue-Tester

3.2.3.2.1 Perthometer

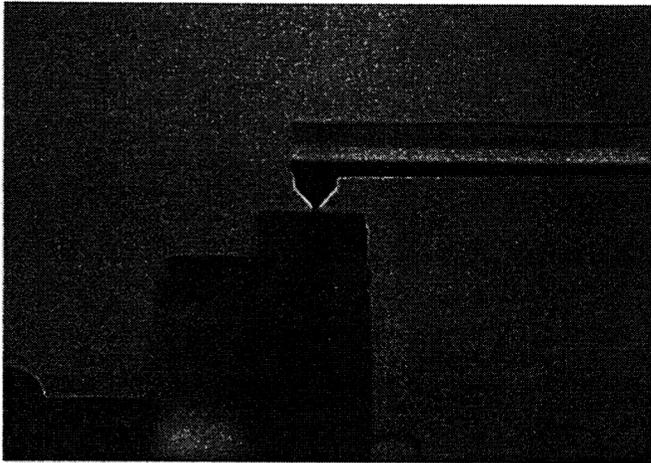


Abb. 3.24: Diamantspitze zur Vermessung eines Fatigue-Tester-Rades.

Die Meßanordnung entspricht in allen Teilen der ACTA-Maschine. Abweichend erfolgt die Abtastung im Perthometer nicht mit einer Kugel, sondern mit einer Diamantspitze. Der Grund liegt in der, durch das Antagonistenrad erzeugten Form der Kuhle, welche einen geringeren Radius als die Abtastkugel besitzt. Die Kugel könnte dem Verlauf bis in die tiefste Stelle der Abrasionsspur nicht folgen. Die Messungen des Materialverlustes würden zu gering ausfallen.

3.2.3.2.2 Dentmes und Match3D

Es ergeben sich keine Veränderungen in der Vorgehensweise.

3.2.3.3 Morphologische Verschleißanalyse

Nach Beendigung der praktischen Versuche und der profilometrischen Vermessung wird eine Auswahl von Prüfkörpern unter dem Rasterelektronenmikroskop morphologisch analysiert. Es werden Materialien gewählt, welche von der Zusammensetzung jeweils extreme Eigenschaften (max. bzw. min. Füller-/Matrixgehalt) aufweisen, um Unterschiede entsprechend deutlich erkennen zu können. Die Auswahl eines bestimmten Prüflings innerhalb einer Materialgruppe erfolgt dagegen rein zufällig. Die Aufnahmen werden mit einem Rasterelektronenmikroskop Typ JEOL, JSM-35CF (Japanese electronic optical laboratories, J-Tokio) angefertigt. Die Elektronenbeschleunigungsspannung beträgt 15 kV. Von einem Prüfkörper werden Aufnahmen in Vergrößerungsstufen mit der Reihenfolge x 200, x 10.000, x 6.000, x 3.000 und x 540 angefertigt.

Zur Anfertigung aller REM-Aufnahmen muß bemerkt werden, daß die Oberflächen der Materialien auf auffällige Strukturen hin untersucht wurden. Die Abrasionsspuren sind jedoch mikroskopisch äußerst homogen aufgebaut, so daß die abgebildeten Regionen nach dem Zufallsprinzip ausgewählt wurden.

4. Ergebnisse

In dieser Arbeit werden die Probenmaterialien ausschließlich auf den Degradationsgrad hin untersucht. Zusätzlich werden vereinzelte Proben rasterelektronenmikroskopisch ausgewertet.

4.1 Erstes Experiment: Evaluation der Abrasion

Die Ergebnisse des ersten Versuches, der Acta – Maschine mit einem Slip von -18%, werden in Tab. A (tabellarischer Anhang) in Zahlenwerten und in Abb. 4.1 in Form von Graphen dargestellt. Die obere Grenze eines Balkens symbolisiert den Mittelwert + 1 x Standardabweichung, der mittlere Kasten den Mittelwert und die untere Begrenzung den Mittelwert - 1 x Standardabweichung der Verschleißwerte eines jeden Materials.

Bei den Materialien der ersten und zweiten Gruppe, bei denen Füllgrad sowie Füllergöße variiert werden, sinkt der Verschleiß, wenn der Anteil der Füller steigt. Insgesamt ist der Verschleiß der Materialien mit einer Füllergöße von 1 µm geringer als der Verschleiß der Komposite, deren Füller eine Größe von 13,7 µm besitzt.

Die dritte Gruppe der Komposite, deren Monomeranteil Benzylmethacrylat auf 7 Materialien verteilt zwischen 0 und 3,61 Gewichtsprozent variiert, zeigt keine signifikanten Unterschiede im Verschleißverhalten.

Räder	Material-	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Gesamt	kodierung																	
16	Anzahl der Proben	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	19	19	20	19	11

Tab. 4.1: Anzahl der geprüften Proben pro Komposit.

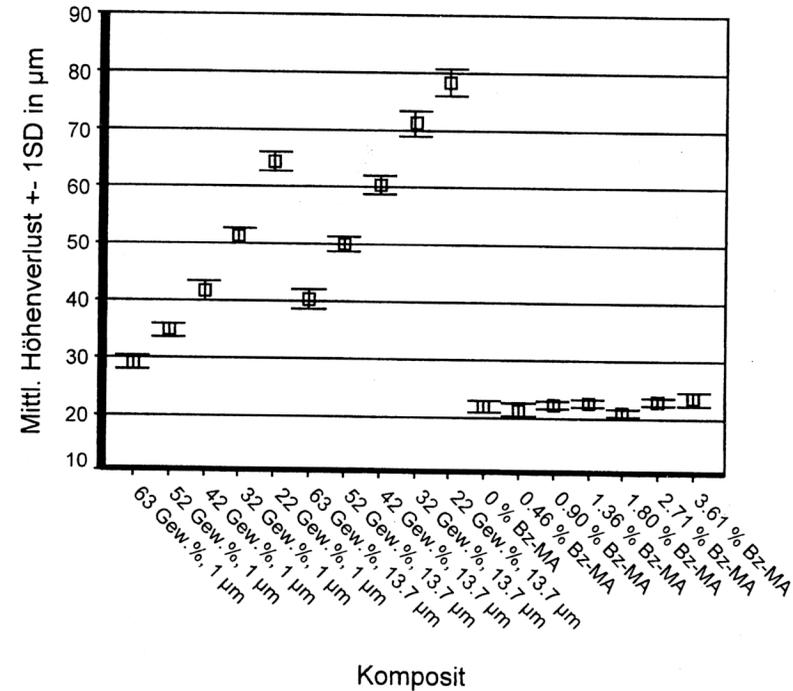


Abb. 4.1: Meßergebnisse Experiment 1.

Sowohl der Test der Homogenität der Varianzen (Levene-Statistik: p=0,000), als auch die Überprüfung der Normalverteilung nach Kolmogorov-Smirnov, modifiziert nach Lilliefors (Signifikanz p=0,000), gestatten die Überprüfung der experimentell gefundenen Werte durch einen Post-Hoc-Test nach Tukey-HSD. Abb. 4.2a) zeigt hierzu den signifikanten Anstieg der Abrasion, wenn der Anteil der Füllerfraktion abnimmt. Graphik 4.2b veranschaulicht den ebenfalls signifikant steigenden mittleren Höhenverlust, wenn dem Komposit ein Füller mit 13,7 µm statt 1 µm beigemischt ist. Da für den Vergleich der Füllergößen weniger als drei Gruppen vorhanden sind, kann ein Post-Hoc-Test nicht durchgeführt werden.

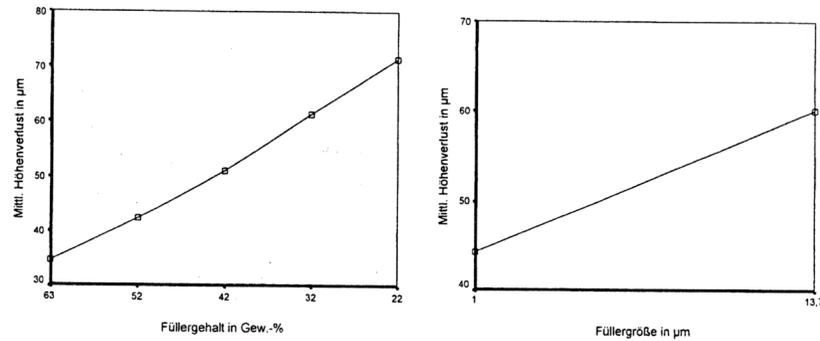


Abb. 4.2: Mittlerer Höhenverlust der Gruppen 1 und 2 kumuliert.
Abhängig von a) Füllergehalt und b) Füllergröße.

Im Gegensatz zu den Kompositen der ersten beiden Gruppen, unterscheiden sich die mittleren Höhenverluste innerhalb der dritten Gruppe in diesem Experiment nicht signifikant. Die Variation von Matrixbestandteilen (Benzylmethacrylat) bewirkt in diesem Experiment keine Veränderung im Verschleißverhalten. Für die Abrasion ist demnach der Grad der Quervernetzung der Monomerfraktion nicht maßgebend. Im Endergebnis besitzt aus der ersten und zweiten Gruppe das Komposit mit 63 Gew.-% des 1 µm großen Füllers die günstigsten, weil geringsten Abrasionswerte. Konsequenterweise schneiden die Komposite der dritten Gruppe durch ihren höchsten Füllgrad von insgesamt 81,9 Gew.-% (Siehe Tab. 3.4, Seite 21) mit den geringsten mittleren Höhenverlusten am Besten ab.

Bezüglich der morphologischen Auswertung erkennt man in Abbildung 4.3a) das durch die Anwendung Match3D berechnete Bild der Oberfläche eines Acta-Rades (Meßpunktabstand x-Achse=100 µm, y-Achse=25 µm). Im oberen Teil bis zur Markierung (Pfeil) erkennt man die geringere Rauhmigkeit des Materials mit dem 1 µm-Füller, im unteren die gröbere Oberfläche des Komposits mit dem 13,7 µm-Füller. Trotz einer Korngröße von 25 µm des letzten Grindingrades, welches in der Praxis einer Politur entspricht, ist die raue Oberfläche an den lateralen Referenzstreifen der Werkstoffe

deutlich erkennbar. Dies bedeutet für den Patienten eine vergrößerte Retentionsfläche mit verstärkter Plaqueanlagerungstendenz, sowie eine vorzeitige Verfärbung des Materials in vivo. Hiermit ist auch die so oft bemängelte „Polierunfähigkeit“ der Komposite bis zur Einführung der Hybridmaterialien erklärt. Weiterhin sind in dieser Abbildung dunkle Flecken (durch Kreise markiert) zu erkennen. Sie stellen während des Abrasionsvorganges freigelegte Luftpinschlüsse dar. Bei der Auswertung verfälschen sie das Ergebnis jedoch nicht, da sie von der Anwendung Match3D erkannt und extrapoliert werden.

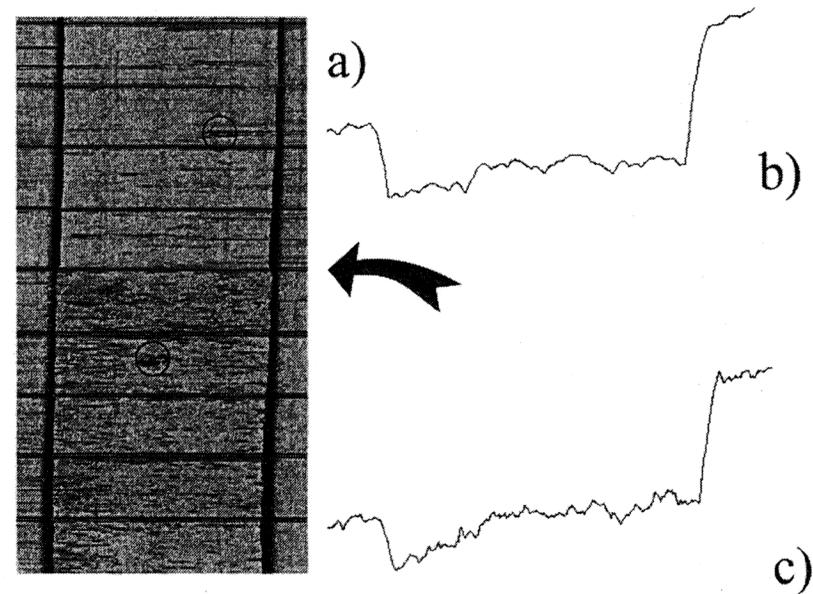


Abb. 4.3a): Das von Match3D generierte Bild und die zugehörigen Schnittbilder:
b) hoher, c) geringer Abrasionswert. (Erläuterung siehe Text)

Die Abbildungen 4.3b) und c) zeigen zwei der 1600 Schnittbilder, die von jedem Probenrad angefertigt wurden. Abb. 4.3b) zeigt ein Material mit dem 1 µm-Füller, erkennbar am vergleichsweise weniger zerklüfteten Verlauf der Schliffbasis und, bedingt durch den niedrigen Füllergehalt von 22%, einem

hohen Verschleiß (Komposit Nummer 5). Abbildung 4.3c) zeigt ein Material mit dem $13,7 \mu\text{m}$ - Füller. Die Schliffbasis besitzt eine insgesamt rauhere Oberfläche, die Abrasion ist jedoch kleiner, da es sich um das Komposit Nummer 6 mit 63% Fülleranteil handelt.

Zur weiteren morphologischen Verschleißanalyse wurden Aufnahmen mit einem Rasterelektronenmikroskop angefertigt.

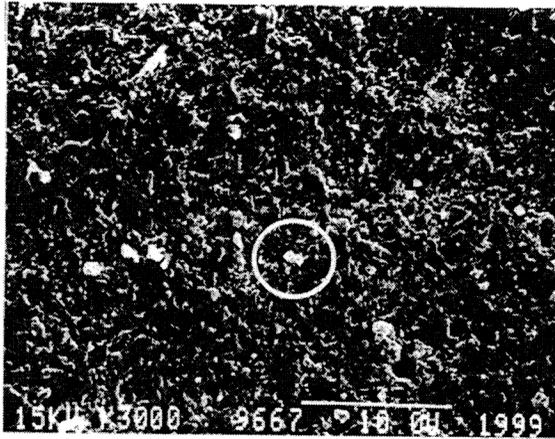


Abb. 4.4: Material 1 (63% / $1 \mu\text{m}$); Vergrößerung x 3.000.

Abb. 4.4 zeigt die rasterelektronenmikroskopische Aufnahme des Materials 1 in 3.000-facher Vergrößerung. In ihr sind die $1 \mu\text{m}$ großen Füller (Kreis) vereinzelt zu erkennen (die Längenskala entspricht $10 \mu\text{m}$). Sie sind hauptsächlich durch eine suffiziente Silanverbindung in die Matrix eingebunden. Die Matrix über ihnen erscheint entfernt bzw. zwischen den Füllerpartikeln ausgewaschen. Die Probenoberfläche wirkt gleichmäßig. Im Gegensatz hierzu ist in Abb. 4.5 (ebenfalls 3.000-fache Vergrößerung) das Material 10 abgebildet, welches zu nur 22 Gew.-% mit $13,7 \mu\text{m}$ großen Partikeln gefüllt ist und wie aus Abb. 4.1 ersichtlich, die schlechtesten abrasiven Eigenschaften besitzt. Deutlich erkennt man hier die großen Partikel, welche kaum mehr durch die Matrix eingeschleidet sind und sich kurz vor ihrem Herausbrechen befinden. Der

matrixprotektive Effekt, falls überhaupt vorhanden, versagt hier erkennbar an der zwischen den Füllerpartikeln herausgewaschenen Matrix.

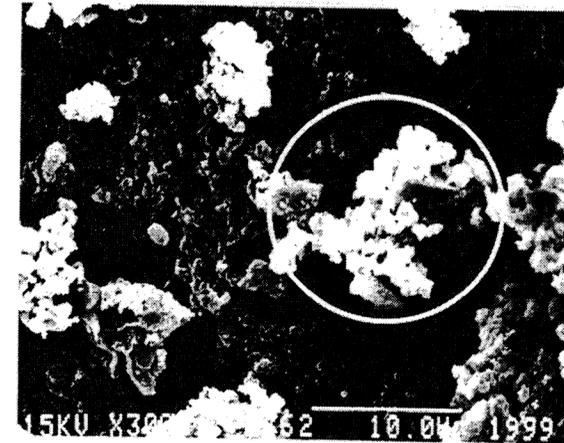


Abb. 4.5: Material 10 (22% / $13,7 \mu\text{m}$); Vergrößerung x 3.000.

Abb. 4.6 zeigt das Material 11 mit 0% Bz-Methacrylat. Die hohe Menge und die abgestimmte Mischung verschiedener Füller (siehe Tab. 3.4) bewirkt den geringsten mittleren Höhenverlust. Trotzdem sind auch hier Auswaschungen mit „Grübchenbildung“ zwischen den Füllern zu erkennen.

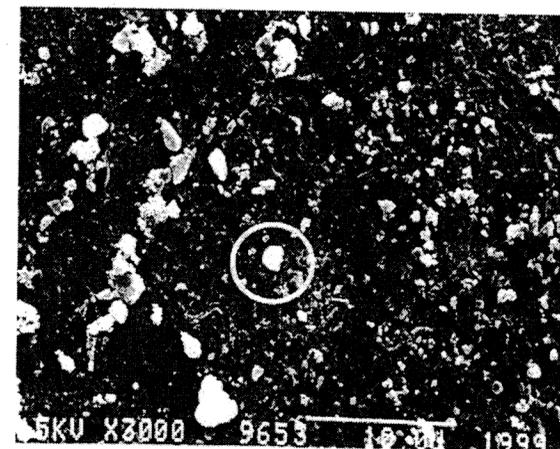


Abb. 4.6: Material 11 (0% Bz-MethA); Vergrößerung x 3.000.

4.2 Zweites Experiment: Surface-Fatigue durch Slipvariation

Im zweiten Versuch wird, im Gegensatz zum Ersten, der Slipwert der Acta-Maschine auf +15% verändert. Hier werden lediglich die Komposite der Gruppen eins und zwei geprüft, weil in der Gruppe 3, wie an den Ergebnissen des ersten Experimentes ersichtlich, der Gehalt an Benzylmethacrylat, bzw. die Veränderung des Matrixanteiles für den Verschleiß nicht einflußnehmend ist.

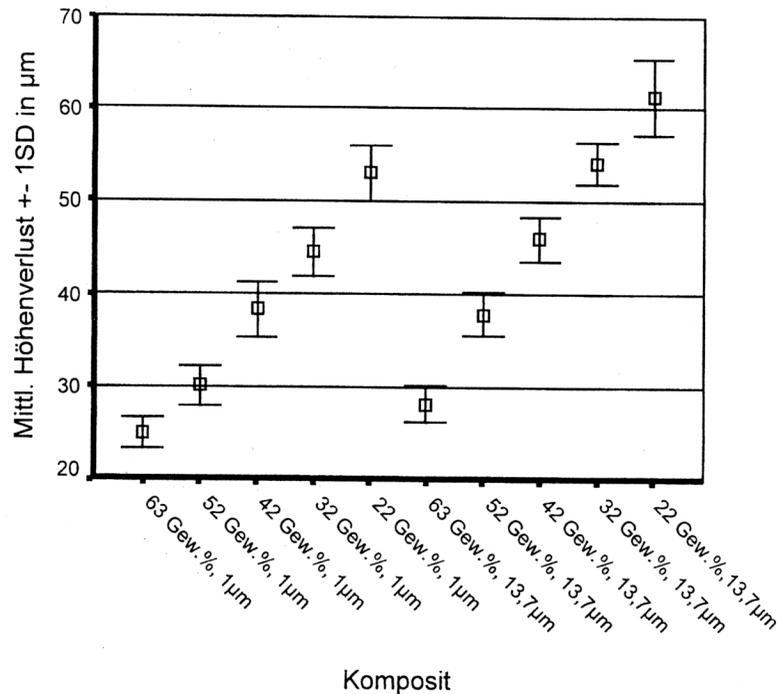


Abb. 4.7: Meßergebnisse Experiment 2.

Die relativen Verschleißwerte verhalten sich auf Grund des selben tribologischen Prinzipes analog dem vorhergehenden Versuch. Je höher der

Fülleranteil ist, desto geringer ist der mittlere Höhenverlust aller geprüften Materialien. Zudem zeigt die Gruppe der mit einer Füllergröße von 1 µm gefüllten Materialien einen geringeren Verschleiß als die Gruppe der Komposite, deren Füller eine Größe von 13,7 µm besitzen. Auch hier besitzen die Materialien die günstigsten Verschleißwerte, welche mit 63 Gew.-% den höchsten Fülleranteil haben.

Räder Gesamt	Material-kodierung	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
5	Anzahl der Proben	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10

Tab. 4.2: Anzahl der geprüften Proben pro Komposit.

Die Abbildungen 4.8 für die Komposite der ersten Gruppe und 4.9 für die zweite Gruppe stellen einen direkten Vergleich der Ergebnisse des ersten und zweiten Experimentes dar. Ein relativer Unterschied oder ein Rangwechsel im Verschleißverhalten sind nicht festzustellen. Deutlich ist dagegen der absolut erhöhte mittlere Höhenverlust im zweiten Experiment dargestellt. Hierbei fällt auf, daß der Verschleiß der ersten Gruppe (1 µm) im zweiten Experiment um etwa 6 µm, mit zunehmender Füllermenge zusätzlich mit steigender Tendenz, vergrößert ist. Im Vergleich der zweiten Gruppe liegt der Unterschied im Verschleiß etwa doppelt so hoch (mind. 12 µm), wobei der Abstand zwischen den Gruppen mit zunehmenden Füllergehalt nicht signifikant größer wird.

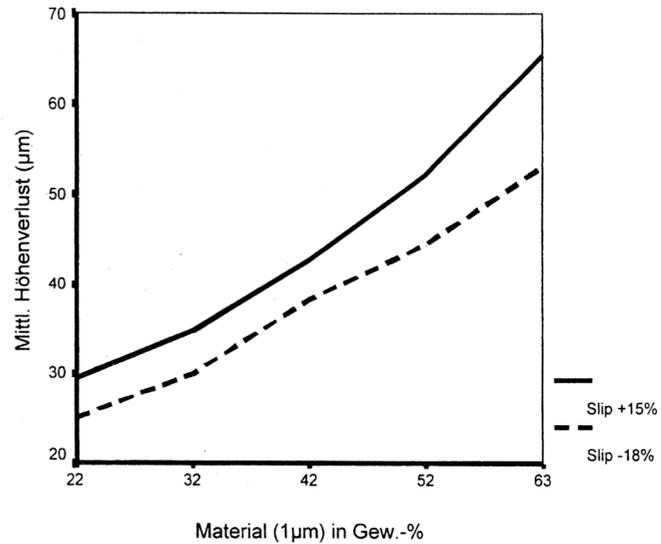


Abb. 4.8: Vergleich der Materialien der Gruppe 1.

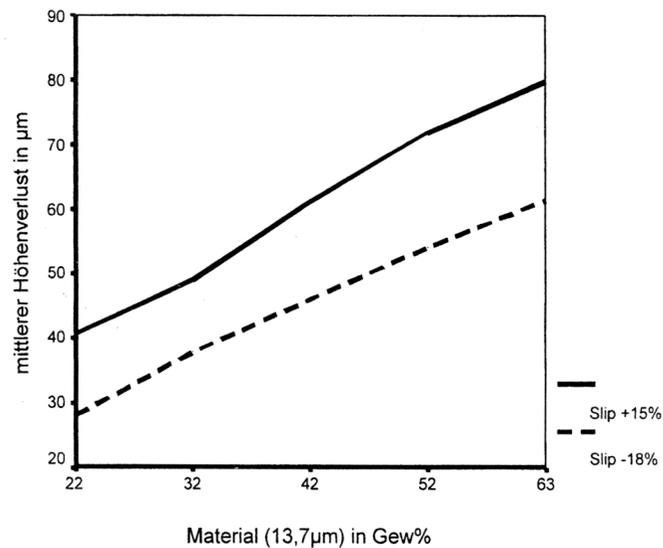


Abb. 4.9: Vergleich der Materialien der Gruppe 2.

Analog zum ersten Experiment zeigt die statistische Überprüfung der Ergebnisse mittels einer zweifaktoriellen Varianzanalyse mit angeschlossenen Post-Hoc-Test nach Tukey-HSD, daß das Verschleißverhalten bezüglich der Variation von Füllergröße und -gehalt signifikant ist. Bedingt durch das Fehlen der dritten Materialgruppe in diesen Experiment, ist die Signifikanz jedoch geringer.

Bezüglich der morphologischen Auswertung erkennt man in Abb. 4.10 ein niedrig gefülltes (22 Gew.-%) Komposit, dessen Füller eine Größe von 13,7 µm besitzt (Material 5). Zum Vergleich mit den Abb. 4.4 und 4.5 ist auch diese Aufnahme 3.000-fach vergrößert. Fülleranteile sind in diesem Ausschnitt nicht zu erkennen. Am oberen rechten Bildrand ist hingegen ein deutlicher, tiefer Krater erkennbar, der von einem frisch herausgeschlagenen Füllerkorn hinterlassen wird (Größe eines Füllerkornes siehe Abb. 4.5).

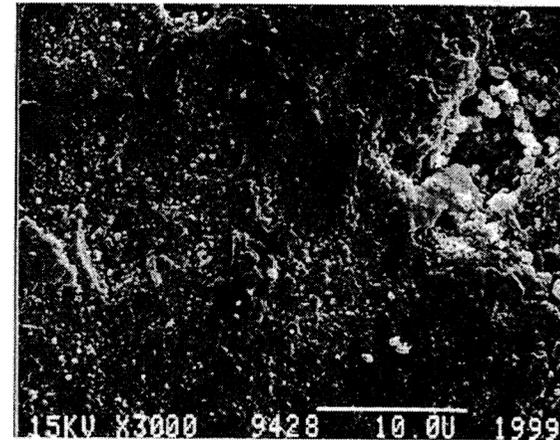


Abb. 4.10: Material 10 (22%/13,7µm); Vergrößerung x 3.000.

4.3 Drittes Experiment: Evaluation des Surface-Fatigue

Die Ergebnisse des Experimentes mit dem Fatigue-Tester (Abb. 4.11) zeigen im wesentlichen ein inverses Ergebnis im Vergleich zu den Versuchen mit der Acta-Maschine. Ohne Ausnahme besitzen Komposite dort einen geringeren mittleren Höhenverlust, wo sie in den ersten beiden Versuchen einen hohen hatten. Insgesamt kann formuliert werden, daß der mittlere Höhenverlust der Komposite geringer ausfällt, wenn der Füllergehalt sinkt. Die Materialien der dritten Gruppe besitzen, bedingt durch ihren hohen Füllergehalt von 81,9 Gew.-% die höchsten Verschleißwerte. Die Komposite der ersten beiden Gruppen zeigen im Gegensatz zu den vorangegangenen Experimenten weniger starke mittlere Höhenverluste.

Räder	Material-	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Gesamt	kodierung																	
14	Anzahl der Proben	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	16	16	15	15	15	16	12

Tab. 4.3: Anzahl der geprüften Räder und Komposite.

Die statistische Auswertung für das dritte Experiment erfolgt nach den selben Schemata der vorangegangenen Versuche. Aufgrund des hohen Füllergehaltes der Komposite der dritten Gruppe, ist der Verschleiß nun signifikant höher als der Verschleiß der Materialien der ersten beiden Gruppen. In allen drei Experimenten ist der Verschleiß vom Füllergehalt abhängig. Auch im dritten Versuch kann ein Einfluß durch die Matrixvariation in der dritten Gruppe, welche den Quervernetzungsgrad der Monomere bestimmt, nicht nachgewiesen werden. Änderungen des mittleren Höhenverlustes bei der isolierten statistischen Betrachtung der Komposite aus der dritten Gruppe, in der

der Füllergehalt konstant bleibt, der Anteil der Matrixkomponente Benzylmethacrylat jedoch schrittweise erhöht wird, (siehe Abb. 4.12) sind nicht signifikant ($p=0,341$).

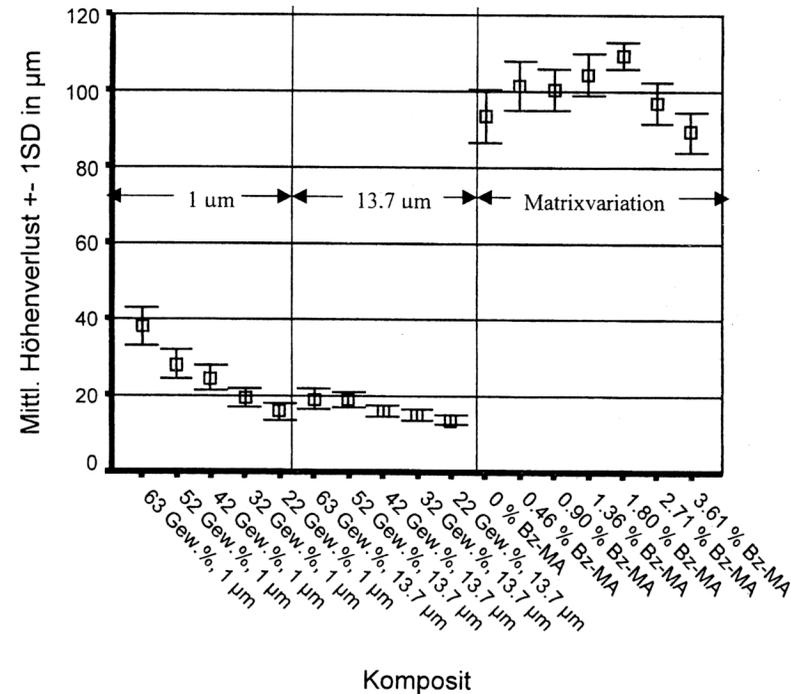


Abb. 4.11: Meßergebnisse Experiment 3.

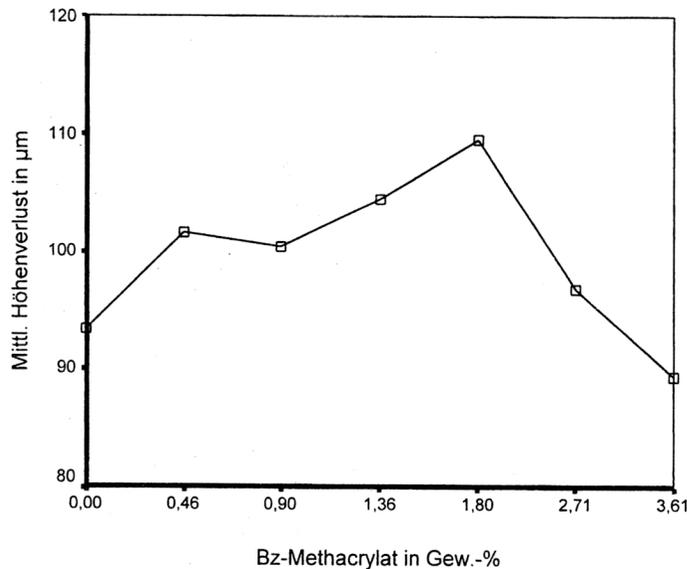


Abb. 4.12: Mittlerer Höhenverlust in Abhängigkeit der Matrixkomponente Bz-Methacrylat (in Gew.-%).

In Abbildung 4.13 erkennt man die durch die Anwendung Match3D generierte Oberfläche eines der frühen Fatigue-Räder. Im Gegensatz zur Auswertungsmethodik der Acta-Maschine mit der Abtastkugel, kann man hier durch die verwendete Diamantspitze und der damit verbundenen höheren Auflösung keine Rückschlüsse auf den Füllertyp machen. Alle Komposite erscheinen rauh.

An der Pfeilmarkierung erkennt man das Komposit Nummer 11, welches mit seinem Anteil der Füllermischung von 81,9 Gew.-% zur hochgefüllten, dritten Gruppe gehört. Das Material darüber (★) ist das Komposit Nummer 10 mit einem Fülleranteil von lediglich 22%. Da sich bei dem Fatigue-Tester der Betrag des Materialverlustes auf Grund der unterschiedlichen Verschleißprinzipien im Vergleich zur Acta-Maschine in Abhängigkeit des Fülleranteiles umkehrt, erkennt man die gering tiefe Ausprägung der

Abrasionsspur oberhalb der Markierung sowie den forcierten Verschleiß darunter. An Komposit 11 selbst ist eine interessante Beobachtung zu machen: Durch die extrem unterschiedlichen Eigenschaften im Verschleißverhalten (mittlerer Höhenverlust nach 400.000 Zyklen ca. 82% größer) kommt es, auf Grund der Konstruktion des Fatigue-Testers, zu einer Wellenbildung in der Abrasionsspur. Die Wellenausbildung ist wahrscheinlich auf Schwingungen des Laufrades zurückzuführen, die durch die sich unterscheidenden E-Module der benachbarten Komposite erzeugt werden. Komposite mit hohem Füllergehalt verschleifen im Fatigue-Tester schneller. Hierdurch ergibt sich nach einer gewissen Zeit eine Stufe in der Bahn des Laufrades. Die Masse von 45 N fällt auf das Material und überreizt seine elastische Verformbarkeit, wodurch eine plastische Verformung erzeugt wird. 7-8 Wellenlängen schwingt das System nach, bis alle vertikalen Kräfte eliminiert sind. Zum anschaulichen Vergleich mag das Überfahren eines Schlagloches mit einem Auto mit defekten Stoßdämpfern dienen. Zur Behebung des Fehlers bestehen zwei Möglichkeiten: 1) Man vermindert die Drehfrequenz des Probenrades, was jedoch nicht im Einklang mit der geforderten Spezifikation von 1 Hz steht. Zudem würde das Problem höchstens verkleinert, jedoch nie völlig ausgeschaltet werden können, da das gesamte System nach wie vor in Bewegung ist. 2) Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Materialien 1 bis 10 von den Materialien 11 bis 17 getrennt und auf jeweils verschiedenen Probenrädern untersucht. Siehe hierzu Tab. 3.9: Die Materialien der Gruppe 3 wurden ab dem 5. Rad von denen der ersten beiden Gruppen getrennt.

Bei der Auswertung ergibt sich jedoch, daß der Verschleiß der betroffenen Proben im Vergleich zu nachfolgenden Versuchsreihen nicht abweicht. Entsprechend wurden die Ergebnisse der ersten fünf Räder mit in die Auswertung eingebracht.

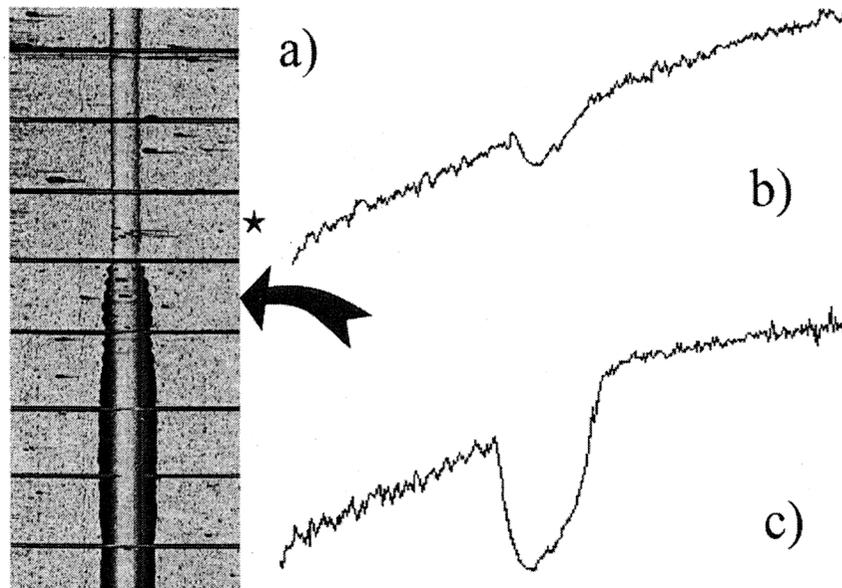


Abb. 4.13a): Abrasionsspur des Fatigue-Testers sowie Schnittbild eines
b) niedrig und c) hochgefüllten Materials (Erklärung siehe Text).

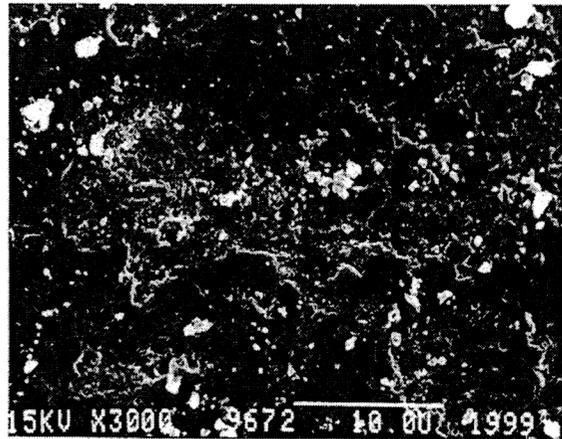


Abb. 4.14: Material 11 (0% Bz-MethA); Vergrößerung x3.000.

Bei der morphologischen Auswertung des dritten Experimentes sind, wie in Abb. 4.14 bei einer 3.000-fachen Vergrößerung ersichtlich, Mikrorisse in der Probenoberfläche sichtbar. Abb. 4.15 zeigt bei einer geringen Vergrößerung (x 200) einen relativ großen Riß. Beide Aufnahmen zeigen das Material 11, welches im Fatigue-Tester-Versuch durch hohe mittlere Höhenverluste auffällt.

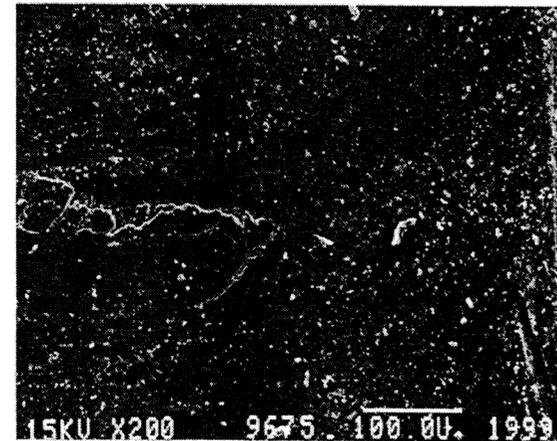
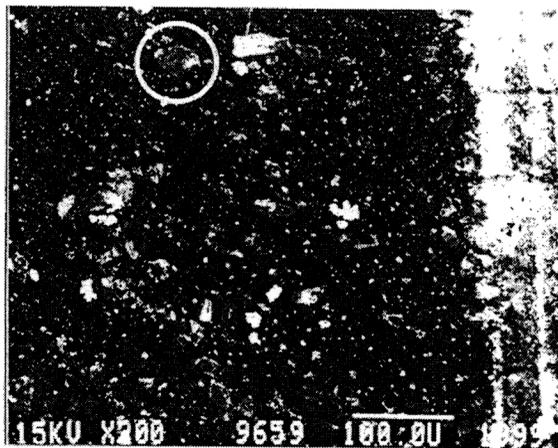


Abb. 4.15: Material 11 (0% Bz-MethA); Vergrößerung x 200.

Abb. 4.16 und 4.17 zeigen bei jeweils gleicher Vergrößerung (x 200), die Materialien 10 (gutes Verschleißverhalten) und 17 (schlechtes Verschleißverhalten). Auf beiden Aufnahmen ist die durch das Laufrad des Fatigue-Testers erzeugte Abrasionsspur, welche am rechten Bildrand von der unbearbeiteten Probenoberfläche begrenzt wird, zu erkennen. Die Besonderheit liegt in dem unterschiedlichen Abrasionsmuster der Füllerpartikel. Während in der ersten Aufnahme die Füllerkörner mit abradert, bzw. in die weichere Matrix gedrückt wurden (Kreis, Abb. 4.16), zeigt die zweite Abbildung Füllerkörner, die auf der Oberfläche zu liegen scheinen (Kreis, Abb. 4.17).

Abb. 4.16: Material 10 (22%/13,7 μ m); Vergrößerung x 200.

Die Herkunft der ebenmäßigen, senkrecht zur Laufrichtung angeordneten Linien (Pfeil, Abb. 4.17) in einem Abstand von etwa 100 μ m konnte nicht geklärt werden. Für die Entstehung der etwa im 45°-Winkel verlaufenden Narben in der Matrixoberfläche (Hilfslinien) können zwei Ursachen diskutiert werden. Beide Phänomene treten derart regelmäßig auf, daß nicht von einer zufälligen Erscheinung gesprochen werden kann (siehe Diskussion).

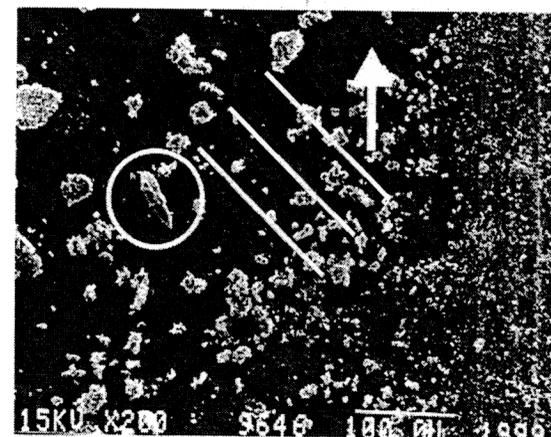


Abb. 4.17: Material 17 (3,61% Bz-MethA); Vergrößerung x 200.

5. Diskussion

5.1 Erstes Experiment: Evaluation der Abrasion

5.1.1 Bewertung der Methode

Die Acta-Maschine ist so konstruiert, daß die Parameter Slip und Medium variiert werden können. Eine Änderung des Anpreßdruckes (15 N) ist nicht vorgesehen. Für die Experimente werden Einstellung verwendet, welche in vorangegangenen wissenschaftlichen Arbeiten evaluiert wurden.

Slip

Durch die Variation des Slips kann die Mediendicke zwischen den beiden Rädern eingestellt werden. Je größer der Slip ist, desto kleiner wird auch der Abstand.

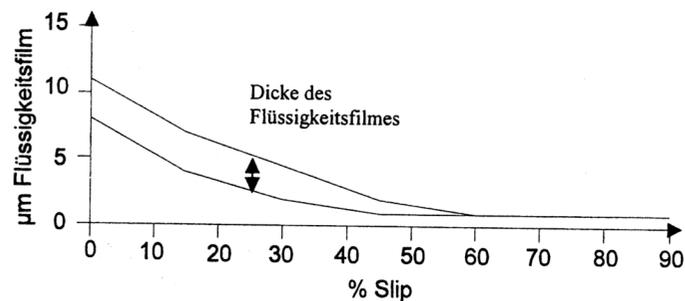


Abb. 5.1: Der Flüssigkeitsfilm zwischen Antagonisten- und Probenrad in Abhängigkeit vom Slip.

Pallav (1993) zeigt in Abb. 5.1, daß die Flüssigkeitsfilmdicke bei 0% Slip, also bei gleichen Bahngeschwindigkeiten der Räder, maximal ist. Mit steigendem Slip nimmt der Abstand der beiden Räder und die Dicke des

Flüssigkeitsfilmes ab. Entsprechend steigt der Verschleiß (Abb. 5.2). Bei etwa 45% Slip ist der Verschleiß maximal und die Räder sind nur noch durch einen minimalen Flüssigkeitsfilm getrennt. Die auftretende Verschleißart kann gerade noch als Abrasion bezeichnet werden. Überschreitet der Slip 45%, sind die Räder nicht mehr in der Lage, Nahrungspartikel zwischen sich zu schaufeln und sie werden sich berühren. Daher kann jetzt nicht mehr von Abrasion, zu welcher ein drittes, abrasives Medium erforderlich ist, gesprochen werden. Statt dessen spricht man in diesem Stadium von einem „pin-on-disc-Phänomen“ (Rice, 1984), dessen Verschleißmechanismen auf abrasiven und adhäsiven Komponenten beruhen (De Gee, 1994). Aus praktischen Gründen wurde im Versuch von Pallav der Slipwert von 90% nicht überschritten, da 100% Slip ein stehendes Antagonistenrad bedeuten würde (De Gee, 1994). Der Slip von -18% wird bei dieser Arbeit aus mehreren Gründen beibehalten:

- Die Ergebnisse sollen gut mit in vivo evaluierten Daten korrelieren (Dickson, 1979, DeLong, 1983, Lambrechts, 1984, Lutz, 1984).
- Vorausgegangene In-vitro-Untersuchungen mit der Acta-Maschine wurden mit den gleichen Slipeinstellungen vollzogen. Dies begünstigt den direkten Vergleich mit anderen Experimenten.
- Sarrett (1992) zeigt, daß starke Beanspruchungen (Slipwerte, die einem Vorbeigleiten des Nahrungsbreies von 6000 m/h entsprechen) die Ergebnisse verfälschen, indem Fülleranteile aus der Matrix herausgeschlagen werden. Die verbleibende Matrix ist der Beanspruchung nicht gewachsen und verschleißt unverhältnismäßig schneller.
- DeGee (1991) favorisiert einen Slip von etwa -15%, weil dieser die Kaubewegungen in der Mundhöhle und die damit einhergehenden Scherkräfte am natürlichsten imitiert.

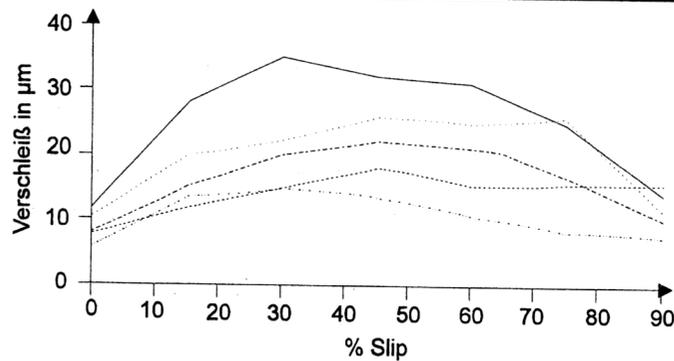


Abb. 5.2: Verschleiß verschiedener Hybridkomposite bei sich ändernden Slipwerten.

Medium

De Gee (1986, 1991) und Finger (1987) experimentierten mit der Zusammensetzung des dritten Mediums. Hierzu wurden verschiedene Stoffe (PMMA, Mohn, Hirse und Kombinationen) verwendet. Die genauen Ergebnisse können dem Kapitel 2.1 entnommen werden. Für die Experimente dieser Arbeit wird ausschließlich Hirse verwendet, hierfür sprechen die folgenden Argumente:

- Hirse ist pflanzlichen Ursprungs und entspricht somit den Bestandteilen gewöhnlicher Nahrung (analog Finger, 1987).
- Das Material wird an den Universitäten München und Nürnberg-Erlangen verwendet. Somit ist ein Vergleich der Ergebnisse möglich.
- Nachteilig an der Hirse als Abrasionsmedium wirkt sich der relativ hohe Fettgehalt von 4% aus. Dieses Fett ist anfänglich noch fest in das Hirsemehl eingebunden und wird erst durch das weitere Zerkleinern in der Acta-Maschine freigesetzt. Dieser Fettgehalt kann hinderlich sein (Pallav, 1993) und setzt sich nach dem beendeten Versuchslauf durch das Stehenbleiben des unterhalb des Probenrades montierten Mischflügels an der Oberfläche der Suspension ab. Pallav (1993) verwendet aus diesem Grund gemahlene weißen Reis mit einem Fettgehalt von 1 % und nur einen geringen Anteil

Hirse, um das Abrasionsmedium bis zum Erreichen von 200.000 Zyklen nicht wechseln zu müssen. Im Rahmen dieser Arbeit wird dem Problem begegnet, indem die Hirse alle 50.000 Zyklen neu angesetzt wird.

- Hirse gilt, bedingt durch ihren Gehalt an Phytolithen, als eine der abrasivsten Stoffe für Versuche dieser Art (Gügel, 1998).
- Die verwendete Hirse bewirkt an den Probekompositen einen abrasiven Effekt, der, in Kombination mit der durchlaufenen Anzahl der Zyklen, realistisch ist und im Meßbereich der verwendeten Abtastapparatur liegt.

Anpreßdruck

Bei der Anpreßkraft werden, wie bei der Einstellung von Slip und Drehfrequenz, möglichst realistische, physiologische Verhältnisse angestrebt. Das menschliche Kau-system ist in der Lage, Kaukräfte zu entwickeln, die in einem örtlich begrenzten Bereich bis zu 800 N betragen (Lehmann, 1993). Obere und untere Zahnreihe befinden sich im Verlauf eines Tages kumuliert nur etwa 3 Minuten in Kontakt (Lehmann, 1993). Wenn die Kiefer nicht zur Nahrungsaufnahme in Bewegung sind, befinden sie sich in der „Ruheschwebelage“, bei der die Zahnreihen physiologischer Weise ca. 1 mm klaffen, also nicht in Kontakt sind. Aus diesen Gründen ist eine Anpreßkraft von 15 N in der Acta-Maschine für den Verlauf des Experimentes als Dauerbelastung realistisch. Erfahrungen aus vorangegangenen Experimenten, die sinnvolle Meßergebnisse erzielten, bestätigen diese Einschätzung (De Gee, 1986).

Auswertung

Bei der Betrachtung eines der 2-dimensionalen Bildern, welche mit der Hilfe der Routine Match 3D ausgewertet werden (Abb. 2.23, Seite 49), ist eine vertikal zur Drehrichtung des Probenrades steigende Abrasion auffällig.

Diese Erscheinung ist durch das Flügelrad bedingt, welches das Probenrad von unten mit Hirsesuspension anströmen läßt. Krämer (1997) benutzt aus diesem Grund ein Antagonistenrad, dessen Nuten nicht geflechtartig, sondern derart diagonal verlaufen, daß sie dem Drehsinn folgend das Abrasivmedium nach unten, dem Flügelrad entgegen bewegen. Er erreicht auf diesem Wege einen zwar gleichmäßigen Abtrag, weist aber ausdrücklich darauf hin, daß zwischen den verschiedenen Radformen keine quantitativen Verschleißunterschiede auftreten.

5.1.2 Bewertung der Ergebnisse

Aus einer Zusammenfassung von Kunzelmann (1996, b) geht hervor, daß im Allgemeinen der absolute Vergleich von Ergebnisse nur bedingt möglich ist. Die Experimente werden nur selten unter einheitlichen Bedingungen durchgeführt, oder es überwiegen individuelle Aspekte durch den Versuchsleiter.

Sehr gut sind die Ergebnisse jedoch vergleichbar, wenn eine ausschließlich relative Betrachtung vorgenommen wird. Ein signifikanter Zusammenhang besteht in der Acta-Maschine mit der Größe der Füllerfraktion und mit der Größe der Füllerpartikel:

- Je höher der Fülleranteil ist, desto geringer ist die Abrasion.
- Je größer die Füllergröße ist, desto größer ist die Abrasion.

Beide Erkenntnisse entsprechen sowohl den Ergebnissen von Autoren, die mit der Acta-Maschine experimentieren (Bauer, 1995, Deigner, 1995, De Gee, 1986, 1990, 1994, Krämer, 1997, Kunzelmann, 1996 a, Pallav, 1988, 1989, 1993, Pelka, 1994), als auch den Ergebnissen von Autoren, die mit anderen 3-Medien-Versuchsanordnungen arbeiten (Suzuki, 1995, Condon, 1997). Condon (1996) untersucht kommerzielle Materialien. Auch er kann bestätigen, daß

mikrogefüllte Komposite gegenüber makrogefüllten geringere Abrasionswerte besitzen. Die Ergebnisse aller aufgeführten Untersuchungen korrelieren sehr gut mit den Ergebnissen dieser Arbeit.

In der Acta-Maschine besitzen die Materialien mit dem größten E-Modul bzw. der größten Härte die günstigsten Verschleißwerte. Braem (1989) konnte mit der Acta-Modifikation nach Finger (1987) beweisen, daß diese Faktoren zusammenhängen (Kunzelmann, 1996 a).

5.1.3 Diskussion des tribologischen Aspektes

Mit der Acta-Maschine werden CFA-Bedingungen simuliert, die nicht durch den Kontakt mit dem Antagonisten, sondern mit der Nahrung charakterisiert sind. Krämer (1997) nennt das Verfahren auf Grund des weichen Abrasivmediums und der Dauerbelastung einen sogenannten matrixorientierten Ermüdungstest. Hiermit ist gemeint, daß ein Versagen des Werkstoffes innerhalb der Matrix stattfindet. Beeinflußt werden die Materialeigenschaften allerdings, wie die Ergebnisse zeigen, durch Gehalt und Größe der Füllerfraktion.

Die Acta-Maschine kann folgende drei tribologische Phänomene erzeugen: Erosiver Verschleiß (bei Amalgamen), Abrasion sowie Surface-Fatigue (De Gee, 1994). Die Verschleißform „wear due to surface fatigue“ kann nach De Gee in der Acta-Maschine nur unter Bedingungen simuliert werden, bei denen die Andruckkraft weit über 15 N, in einer Größenordnung um 50 N, liegt. Im zweiten Experiment kann bewiesen werden, daß der Surface-Fatigue auch bei 15 N einen gewissen Anteil am Gesamtverschleiß besitzt (Kapitel 5.2).

Unter dem Begriff Abrasion werden die Mikrovorgänge „Furchung“, „Schneidung“, „Ermüdung“ und „Rißbildung“ zusammengefaßt (Zum Gahr, 1992).

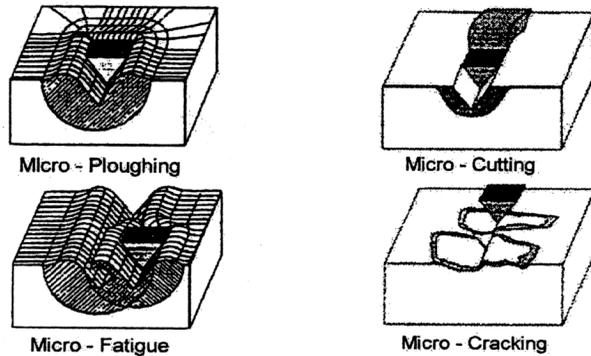


Abb. 5.3: Mikrovorgänge bei Verschleiß durch Abrasion (Zum Gahr, 1992).

Wilder (1996) stellt die vier Hypothesen, die im Material für Volumenverlust verantwortlich sein können, zusammen:

- Die Mikrofraktur-Theorie (Leinfelder, 1983, 1986, 1988):
Sie geht davon aus, daß die Füllerprikel während der Belastung in die sie umgebende schwächere Matrix gedrückt werden. Nach dieser Theorie verbinden sich die Mikrofrakturen im Verlauf der Zeit und oberflächliche Schichten des Komposits werden abgeschilfert.
- Die Hydrolyse-Theorie (Söderholm, 1981, 1983, 1984):
Sie basiert auf der Idee, daß die Silanverbindungen zwischen organischer Matrix und anorganischem Füllerteil hydrolytisch instabil sind. Das Verbindungsversagen ist für den Verlust von Füllerprikeln bei Attrition und Abrasion verantwortlich. Sarrett (1991) beweist diese Theorie, in dem Komposite für 24 Monate in Wasser eingelagert und anschließend untersucht wurden. Einerseits konnte nachgewiesen werden, daß die Materialien Wasser absorbiert hatten, andererseits wurde ein nahezu zeitlich linearer Anstieg der Siliziumkonzentration in dem Wasser festgestellt, in dem die Komposite eingelagert waren.

- Die Theorie der chemischen Zersetzung (Wu, 1981, 1984, McKinney, 1982):
Sie beruht auf der Möglichkeit, daß Anteile aus Nahrung und Speichel von der Matrix absorbiert werden und diese zersetzen.
- Die Schutzmechanismus – Theorie (Jørgensen, 1978, 1979, 1980, 1982, Bayne, 1992):
Sie postuliert, daß die schwächere Matrix aus den Füllerprikelzwischenräumen herausgewaschen wird. Mikroschutz ist dann gewährleistet, wenn die härteren Füllerprikel derart nahe aneinanderliegen, daß sie die dazwischenliegende Matrix schützen. Dieses Prinzip kommt bei mikrogefüllten Kompositen zu tragen.

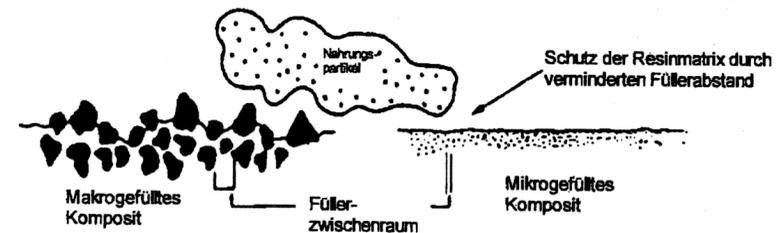


Abb. 5.4: Prinzip der Mikroschutztheorie nach Jørgensen.

Diesbezüglich anderer Meinung ist Yuasa (1990). Hier gilt: Wenn die Größe der Füllerprikel viel kleiner als die der Abrasivstoffpartikel ist (wie bei mikrogefüllten Kompositen), so wird der Verschleiß dem der Matrix gleich (also hoch) sein. Sind die Füllerprikel jedoch größer, dann tritt ein matrixprotektiver Effekt in Kraft und der Verschleiß wird sich vermindern. Wie Abb. 5.5 zeigt, wird dies erreicht, indem Abrasivstoffe von Füllerprikeln an ihren Flanken daran gehindert werden, tiefer in die Matrix einzudringen, als es ihr größter Durchmesser zuläßt. Natürlich gilt dieses nur bei hohen Füllerteilen, bei der die Partikeldichte keine großen

Matrixoberflächen zulässt. Nach Hutchings (1992) besitzt der Füller keine protektive Funktion, wenn er deutlich kleiner als das Abrasiv ist. Er wird dann zusammen mit der Matrix herausgeschlagen (Kunzelmann, 1996 a).

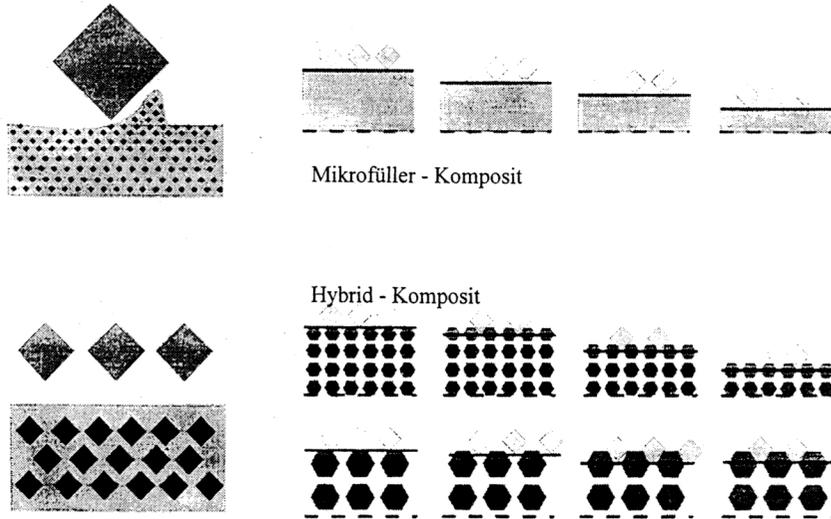


Abb. 5.5: Matrixprotektiver Effekt großer Füllervolumen (Yuasa, 1990).

- Nur aus Gründen der Vollständigkeit soll der Makroschutz (Abb. 5.6) erwähnt werden. Er ist dann gewährleistet, wenn eine Kavitätenpräparation klein dimensioniert ist. Die Folge ist verminderter oder ausbleibender Kontakt der Restauration mit Nahrung oder antagonistischen Zähnen (Bayne, 1992).

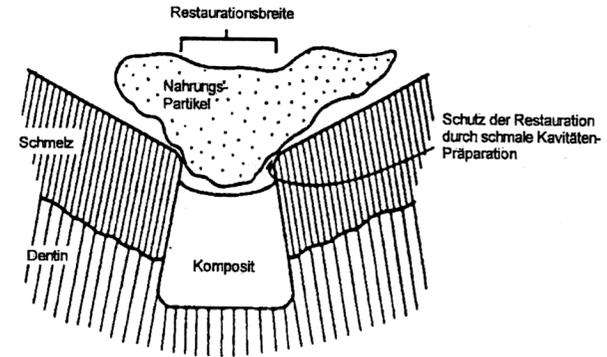


Abb. 5.6: Makroschutz durch angepasste Kavitätenpräparation nach Bayne (1992).

Der Verlust von Füllkörpern wird immer durch Risse in der Polymermatrix hervorgerufen. Diese Einsicht wird von Spanoudakis (1984 a, b) durch Untersuchungen zur Bruchmechanik von partikulären Polymerkompositen gestützt. Es konnte gezeigt werden, daß Risse durch Füllkörper (bei gutem Verbund zur Matrix) zu den Belastungspolen der Füllkörper abgelenkt werden. Plueddemann (1982) beschreibt, daß das Versagen des Materials bei partikelgefüllten Kompositen häufiger in einer Verbundschicht zwischen dem Füller und der Matrix verläuft als direkt am Interface (Kunzelmann, 1996 a).

Aus dem Verständnis dieser Mechanismen ist es Axen (1994) gelungen, anhand von rechnerischen Ableitungen den zu erwartenden Verschleiß innerhalb eines Intervalls vorzuberechnen. Die Untergrenze des Intervalls wird von der Verschleißrate gebildet, die einen anteilsgleichen Abtrag beider Phasen eines Komposites (Matrix und Füller) voraussetzt (equal wear rate modus). Der Abtrag orientiert sich am widerstandsfähigen Fülleranteil und ist somit niedrig. Wenn auf beiden Phasen der gleiche Druck lastet (equal pressure modus), kann rechnerisch die Obergrenze des Verschleißintervalls abgeschätzt werden. Hierbei wird angenommen, daß der Verschleiß des gefüllten Materiales

dem seiner puren Matrix entspricht und entsprechend forciert ist (Scheufele, 2000). Der EW-Modus korrespondiert demnach mit der besten, der EP-Modus mit der ungünstigsten Verwertung verschleißprotektiver Füllerelemente.

5.2 Zweites Experiment: Surface-Fatigue durch Slipvariation

5.2.1 Bewertung der Methode

Die Entscheidung zu diesem zweiten Experiment fiel zu einem Zeitpunkt, als die Ergebnisse des Ersten vorlagen. Die Einstellung der Winkelgeschwindigkeit des Antagonistenrades auf einen resultierenden Slip von +15% soll dazu dienen, ein bauartbedingtes Auftreten des Surface-Fatigue in der Acta-Maschine bei einem Anpreßdruck von 15 N und ohne dem direkten Kontakt der Laufräder zu erkennen. Veränderte Verschleißraten werden letztlich in der Differenz der Meßergebnisse aus dem ersten und zweiten Experiment veranschaulicht.

5.2.2 Bewertung der Ergebnisse

Relativ betrachtet sind die Resultate des ersten und zweiten Versuches identisch. Der nun veränderte Slip bewirkt bei der absoluten Betrachtung eine Erhöhung des mittleren Höhenverlustes. Die Werte liegen geringgradig über denen des ersten Versuchs. Weil das Antagonistenrad eine nun nicht mehr 18% geringere, sondern eine um 15% größere Bahngeschwindigkeit als das Probenrad besitzt, dreht es auch makroskopisch deutlich sichtbar schneller im Hirsemedium. Sowohl die Geräuschkulisse, als auch die Wellen- und Strömungsbildung im Behältnis des dritten Mediums sind gesteigert. Die Hirse verschleißt im zweiten Experiment wesentlich schneller, so daß ihre Qualität

gegen Erreichen der jeweiligen 50.000 Zyklen sehr feinkörnig wird. Wichtig ist hierbei, daß der Betrag des Bahngeschwindigkeitsunterschiedes an der Berührungsgeometrie annähernd konstant geblieben ist.

Bezüglich der morphologischen Analyse erkennt man in Abb. 4.10, im Vergleich zu Abb. 4.5 (gleiches Material, gleiche Vergrößerung) eine wesentlich glattere Oberfläche. Bedingt durch die hohe Drehfrequenz des Antagonistenrades und durch das feinkörnige Medium scheint ein „Poliereffekt“ entstanden zu sein. Die Füllerkörner werden frühzeitig aus der Matrix geschlagen.

Nach Kunzelmann (1996 a) muß die Materialermüdung in der Acta-Maschine als dominierender Verschleißmechanismus betrachtet werden. Die Ergebnisse des zweiten Experimentes sind geeignet, diese Erkenntnis zu belegen. Zusätzlich können die Ergebnisse beweisen, daß ein Einfluß der Matrix auf das Verschleißverhalten der hier geprüften Materialien viel geringer als der Einfluß von Füllerteil und Füllergöße ist.

5.2.3 Diskussion des tribologischen Aspektes

Die Ursache für den gering stärkeren Verschleiß bei einem Slip von +15% soll in Abb. 5.7 dargestellt werden. Nach Kunzelmann (1996 a) sind hierbei in der Theorie komplexe Strömungsverhältnisse und damit verbundene Druckschwankungen im Bereich der bauartbedingten Kontaktgeometrie von Antagonisten- und Probenrad verantwortlich. Zwischen den Acta-Rädern liegt immer ein keilförmiger Spalt vor, dessen distale Öffnung mindestens 7 µm beträgt. Durch den lokal auf die Matrix wirkenden Verschleiß werden Füllkörper exponiert. Durch unterschiedliche Füllergößen werden variierende Tangentialkräfte in die Oberfläche eingeleitet. Sobald im Verlauf der Versuchsdurchführung die Hirsepartikel durch die hohe Laufgeschwindigkeit

des Probenrades frühzeitiger als in Experiment 1 verschlissen sind und somit kleiner als die Spaltbreite von $7 \mu\text{m}$ werden, bewirkt die Fluidynamik des an den Kompositproben vorbeigetriebenen Mediums Hertzsche Spannungsfelder in der Tiefe der Probenoberfläche (Abb. 2.8, Seite 18). Die Hertzsche Belastung führt zu einem Spannungsmaximum in einer bestimmten Tiefe des Materials, die u.a. vom Kontaktradius und E-Modul des Prüfmaterials abhängig ist. In Abb. 5.7 werden die auf die Probenoberfläche wirkenden fluiddynamischen Kräfte im örtlichen Bezug schematisch dargestellt. Das Antagonistenrad erzeugt vor dem Ort der geringsten Distanz zwischen beiden Rädern eine „Bugwelle“. Die hier auftretenden Kräfte entsprechen einer Druckspannung in der Probenoberfläche. Im Bereich hinter dem Ort der geringsten Distanz beider Räder bildet sich ein „Kielwasser“, analog der Hydrodynamik bei Schiffen aus. In diesem Bereich wirkt auf die Probenoberfläche ein Sog, eine Zugspannung. Der Betrag der Druck- und Zugspannungen, die bei einem Slip von +15% größer sind, bewirkt bei der zyklischen Belastung in Experiment 2 den meßbar forcierten Ermüdungverschleiß, obwohl die relative Strömungsgeschwindigkeit der Hirse an der Probenoberfläche gleich geblieben ist. Das hierbei zu Grunde liegende tribologische Prinzip ist dem Wälzlagerverschleiß analog (Zum Gahr, 1987).

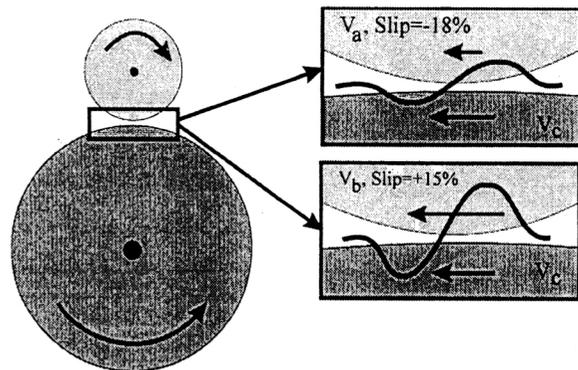


Abb. 5.7: Diagramme der auftretenden Kräfte im Schema.

5.3 Drittes Experiment: Evaluation des Surface-Fatigue

5.3.1 Bewertung der Methode

Der Fatigue-Tester ist eine völlige Neukonstruktion und Erfahrungen bezüglich der Versuchsdurchführung sind nicht vorhanden. In der Literatur gibt es keinen Hinweis auf eine analoge Versuchsanordnung.

Bei der Reinigung des mit Wasser gefüllten Beckens, in welchem das Probenrad läuft, wurde festgestellt, daß der entfernte Schlamm nicht die helle Farbe der Komposite besitzt, sondern gräulich ist. Dies ist ein Indiz dafür, daß das selbe Verschleißprinzip, der Surface-Fatigue, nicht nur auf das Probenmaterial, sondern auch auf das metallene Laufrad wirkt. Entsprechend ändert sich die Kontaktgeometrie des Fatigue-Testers im Verlauf des Versuches: Die Kontaktform reicht auf Grund der Form des Laufrades von einer Punktberührung zu Beginn des Experimentes bis zur Linienberührung nicht lange nach Versuchsbeginn (Czichos, 1992), weil die medianen, am stärksten Beanspruchten Anteile des Laufrades zunehmend abflachen. Die insgesamt auf das Probenrad wirkende Kraft bleibt mit 45 N zu jedem Zeitpunkt konstant. Der Druck (Kraft pro Fläche) nimmt im zeitlichen Verlauf jedoch ab. Zu Beginn ist der Druck und der Verschleiß durch die punktförmige Auflage maximal. Die sich ausbildende Kuhle in der Oberfläche des Probenrades bewirkt eine zusätzliche Vergrößerung der Auflagefläche und somit eine Verminderung des Druckes (Abb. 5.8). Weil eine größere Auflagefläche tendenziell den Betrag Verschleiß pro Zeiteinheit sinken läßt, werden in zukünftigen Untersuchungen die Laufräder für jeden Versuchslauf erneuert, damit Ergebnisse nicht falsch zu gering ausfallen.

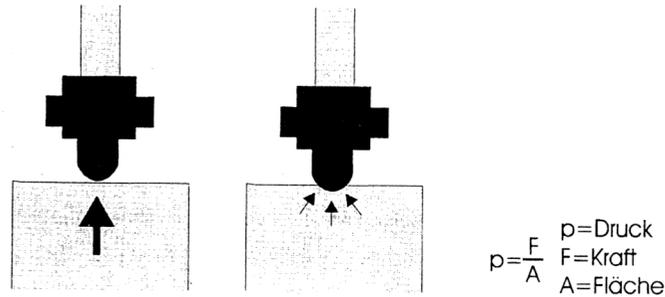


Abb. 5.8: Zunehmende Verteilung der Anpreßkraft mit steigendem Verschleiß der Probenmaterialien.

Um auszuschließen, daß verloren gegangenes Material nicht gegen Ende des Versuches selbst im Sinne eines „dritten Mediums“ abrasiv wirksam werden kann, läuft das Probenrad ständig in destilliertem Wasser und wird wirkungsvoll umspült. Verlorengegangene Partikel werden bis zum nächsten Kontakt mit dem Laufrad entfernt. Das Aufnahmevermögen der Wasserwanne ist ausreichend groß, um für die eingeschwemmten Partikel zunächst einen Verdünnungseffekt zu bewirken. Zudem wird das Behältnis ständig gereinigt und mit frischem Wasser befüllt.

Bei der morphologischen Analyse fallen in Abbildung 4.17 (Seite 69) Narben in der Matrix auf, die im Winkel von etwa 45° zur Laufrichtung verlaufen. Hierfür können zwei mögliche Ursachen diskutiert werden.

Das Material 17 besitzt hochviskose Eigenschaften, es muß während der Verarbeitung unter großem Kraftaufwand mit einem Metallspatel ausgestrichen werden. Es ist möglich, daß die Narben durch die Spatelführung entstanden sind. Sie entsprechen „Sollbruchstellen“, Stellen verminderter Abrasionsresistenz, die durch Lufteinschlüsse oder Zerreißen des innern Gefüges provoziert werden, so daß die Sprödigkeit des Materiales nach der Polymerisation zunimmt (McCabe, 1987). Sind Verarbeitungsfehler ursächlich,

so kann zumindest davon ausgegangen werden, daß diese regelmäßig auftreten, wie es aus dem gleichmäßigen Verschleißverhalten der Kompositproben ersichtlich ist.

Eine weitere Erklärung wird in Abb. 5.9 überzogen dargestellt. Konstruktionsbedingt kann die axiale Ausrichtung des Laufrades im Fatigue-Tester nur durch Parallelpeilung mit dem Auge vorgenommen werden. Eine gering divergierende Achsenausrichtung kann nicht ausgeschlossen werden. Durch die Drehung des Laufrades tritt dann im Randbereich eine Scherbelastungen auf, welche das Probenmaterial zusätzlich in zum Drehsinn senkrecht verlaufender Richtung belastet und so für die Narbenbildung verantwortlich sein kann.

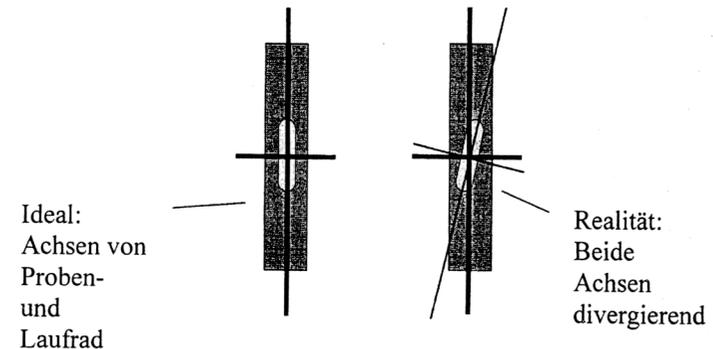


Abb. 5.9: Lauf- und Probenrad von oben: Nicht korrekte axiale Ausrichtung des Laufrades. (überzogene Darstellung)

5.3.2 Bewertung der Ergebnisse

McCabe (1996) untersucht experimentelle Komposite mit einem Füllergehalt zwischen 23,7 und 66,4 Vol.-% in einer dem Fatigue-Tester analogen Anordnung. Auch er kann nachweisen, daß die Größe der Füllerfraktion einen signifikanten Effekt auf Materialverlust durch Surface-

Fatigue hat. Zudem wird ein geringerer Verschleiß niedriggefüllter Materialien festgestellt. Wird die Verbindung zwischen Matrix und Füllerpartikeln nicht zusätzlich chemisch durch Silanisierung verstärkt, so hat das bei McCabe (1996) eine markante Reduktion des Verschleißwiderstandes zur Folge. Dies ist eine wichtige Erkenntnis bei der Frage nach der Ursache des Materialverlustes.

Auch Li (1985) untersucht experimentelle Komposite. Sie besitzen eine Korngröße von 2 μm und einen Anteil von 20 bis 53 Vol. %, bzw. eine Korngröße von 15 μm und einen Anteil von 20 bis 65 Vol. %. Beide Fraktionen werden bezüglich ihres 2-Körper- und 3-Körper-Abrasionsverhalten untersucht. Mit den Untersuchungen von Li können tendenziell die Ergebnisse dieser Arbeit bestätigt werden. Der Erkenntnis, daß mit dem Fülleranteil die Härte der Proben und damit das E-Modul steigt, folgt im Ergebnis die steigende Abrasionsresistenz im, der Acta-Maschine analogen, 3-Körper-Abrasionsversuch. Zusätzlich werden signifikant geringere Verschleißwerte durch die Komposite mit einer Füllergöße von 15 μm erzielt. Im 2-Körper-Abrasionsversuch, welcher dem Fatigue-Tester analog ist, kann wie in den Ergebnissen dieser Arbeit ein inverses Verschleißverhalten der Komposite nachgewiesen werden. Hier wirkt sich eine Erhöhung des Füllergehaltes ungünstig auf das Verschleißverhalten aus. Unterschiede, die sich durch die Größe der Füllerpartikel ergeben, sind bei Li nicht signifikant.

Auch in dieser Arbeit verhalten sich die Verschleißwerte der untersuchten Materialien im 2-Körper-Abrasionsversuch im Vergleich zum 3-Körper-Abrasionsversuch invers. Dennoch kann analog zur Acta-Maschine von einer füllorientierten Materialprüfung gesprochen werden. Auch hier ist der Einfluß der Matrix, wie an dem nicht signifikant veränderten Verschleißverhalten der Materialien der Gruppe 3 (Abb. 4.12, Seite 64) zu erkennen, viel geringer als der Einfluß der Füllerfraktion.

Der dominierende Faktor für das Verschleißverhalten der experimentellen Komposite ist durch ihren E-Modul definiert, welcher nach Peutzfeldt (1987) mit dem Fülleranteil korreliert. Im Gegensatz zum vorwiegenden Verschleißphänomen der ersten beiden Versuche, der Abrasion, bedeutet im dritten Experiment ein niedriger E-Modul wenig Fatigue und somit geringen Verschleiß. Zur Erklärung dienen drei Modelle, die sich nicht gegenseitig ausschließen:

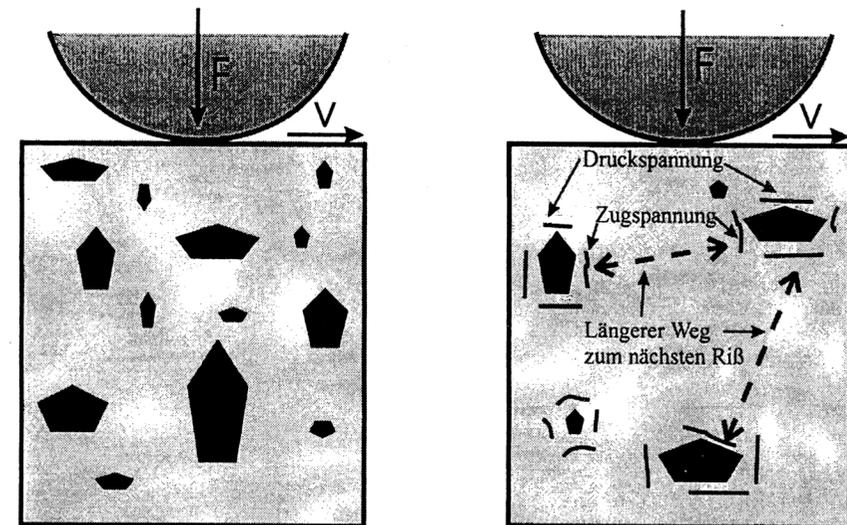


Abb. 5.10: Verminderter Verschleiß bei niedriggefüllten Kompositen, bedingt durch längere Wege der Rißausbreitung.

1. Wenige harte Füller bewirken weniger Spannungsfelder, indem der mittlere freie Matrixraum (Cross, 1983) groß ist. Der mittlere freie Matrixraum bezeichnet den Abstand zwischen zwei Füllerpartikeln und ist groß, wenn der Füllgrad gering und das Füllervolumen groß ist (Abb. 5.10). Die Matrix besitzt ein geringes Elastizitätsmodul und kann den alternierenden Druck- und

Zugspannungen gut widerstehen. Somit werden auftretenden Spannungen an den harten Bestandteil des Komposits, der Füllerfraktion, weitergegeben. Auch diese kann der Belastung widerstehen, mit zunehmender Anzahl der Belastungszyklen kommt es somit zum „cohesive fracture“, dem Versagen des Bindegliedes zwischen Polymer und Füller, der Silanverbindung (Matsumura, 1994), bzw. in einer Übergangsschicht (boundary layer) (Plueddemann, 1982). Je größer demnach die Füllerdichte ist, desto mehr potentielle Fehlerstellen werden im Material ausgebildet. Weil zusätzlich der mittlere Abstand der Fehlerstellen geringer ist, werden sie sich durch Rißbildung früher vereinigen. In der Konsequenz lockern sich Füllerkörper früher aus ihrem Verband, wodurch der forcierte Gesamtverschleiß eines hochgefüllten Materials resultiert. Der Materialverlust kann einzelne, aber auch mehrere Einheiten betreffen, wenn das Versagen einige Molekülschichten tiefer, im Inneren des Materials, stattgefunden hat. Die genaue Ereignisabfolge wird im nächsten Kapitel erörtert.

2. In der Tribologie wird zwischen einer realen und einer nominalen Kontaktfläche unterschieden (Kunzelmann, 1996 a). Je kleiner der E-Modul, desto größer ist der Unterschied zwischen der realen und der nominalen Kontaktfläche. Niedriggefüllte Komposite besitzen einen geringen E-Modul. Das hierdurch weichere Material ermöglicht ein elastisches Nachgeben des Komposites, wenn das Laufrad darüber rollt. Sinngemäß zu Abb. 5.8 ist die Kontaktfläche geringer, woraus nach der Gesetzmäßigkeit Druck gleich Kraft pro Fläche ein verminderter Verschleiß resultiert.

3. Ein weiterer Grund für den hohen mittleren Höhenverlust sind Lufteinschlüsse, die bei der Verarbeitung von hochgefüllten, „stopfbaren“ Kompositen mit einem Spatel entstanden sein können (McCabe, 1987). Hierbei stellen die Poren Konzentrationspunkte für auftretende Kraftfelder dar und bilden letztlich Sollbruchstellen im inneren Gefüge des Materiales. Hersteller dentaler Komposite erhöhen den Fülleranteil, weil hierdurch die Abrasion

vermindert wird. Als Anwender muß man allerdings auf eine korrekte Verarbeitung achten, weil ein sprödes und gleichzeitig poröses Material ein bis zu 30% reduziertes Verschleißverhalten bei Surface-Fatigue aufweist (McCabe, 1987).

5.3.3 Diskussion des tribologischen Aspektes

Der Fatigue-Tester ist ausschließlich für die Simulation der okklusalen Kontaktflächen (OCA = occlusal contact areas) konzipiert. Der Surface-Fatigue beschreibt die Art, wie die eingesetzten Kräfte „exogen“ auf den zu prüfenden Stoff einwirken. Darüber hinaus kann man, analog zur Abrasion, vier verschiedene Mikrovorgänge abgrenzen, welche die Art beschreiben, wie im Kompositmaterial selbst Materialverlust induziert wird (Kunzelmann, 1996 b):

- Surface pitting: „Grübchenbildung“ auf der Füllungsoberfläche (Abb. 5.11a). Vertikale Rißbildung ereignet sich, wenn durch die Scherbelastung die Zugbelastung des Komposites überschritten wird.
- Bulk fracture: Verlust großer Anteile von Füllungsmaterial (Abb. 5.11b). Nach Suh (1986) bilden sich parallel zur Oberfläche verlaufende Defekte durch eine erhebliche Diskrepanz zwischen den E-Moduli der Füllkörper und der Matrix, wie es für hochgefüllte Komposite zutrifft.
- Chipping: Absplittern größerer Füllungsanteile in Randbereichen der Füllung.
- Marginal ditching: Verstärkter Verschleiß der Klebefuge bei Adhäsivinlays.

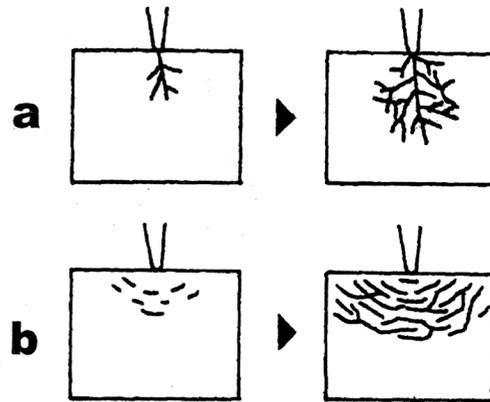


Abb. 5.11: Mögliche Verlaufsformen der Ausbreitung von Mikrorissen, induziert durch surface fatigue (Kunzelmann, 1996 b).

a) Vertikale Verästelungen in die Tiefe, führt zu „surface pitting“.

b) Horizontale Ausbreitung, führt zu „bulk fracture“.

Während c) und d) für das dritte Experiment keine Relevanz besitzen, bezeichnen die ersten beiden Phänomene die Vorgänge, welche für den Verschleiß des Probenrades während der 400.000 Zyklen verantwortlich sind.

Der oberflächliche Substanzverlust wird nach Kunzelmann (1996), mod. nach Suh (1977, 1986) wie folgt induziert: Das Material versagt in der Tiefe des Werkstoffes, woraus zunächst „Hohlräume“ entstehen. Ist das Material so weit geschwächt, erfolgt die Rißausbreitung übergangslos. Materialverlust tritt dann ein, wenn sich die Risse verbinden und die stabile Einbindung des Materials nicht mehr gewährleistet werden kann (Delamination).

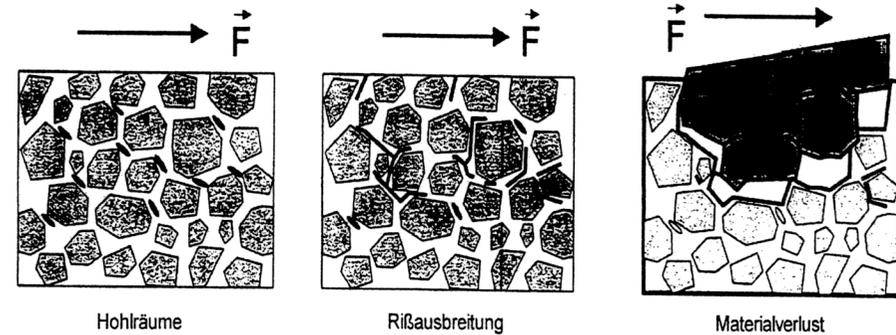


Abb. 5.12: Schematisierte Delamination von Probenmaterial in Folge von surface fatigue.
(Kunzelmann 1996 mod. nach Suh, 1986)

5.4 Zukünftige Experimente

Finger (1987) und Peutzfeldt (1992) betonen die Reife der Acta-Maschine und ihre Fähigkeit, gut mit der klinischen Situation zu korrelieren. Für die Zukunft gilt es, mehr über die Mikro Vorgänge zu erfahren, die im Material für ein Versagen verantwortlich sind. Diese Erkenntnisse können dazu dienen, bestehende Schwachpunkte von Kompositen zu eliminieren.

Hierbei gibt McCabe (1987) zu bedenken, daß die Lösung des Abrasionsproblems durch einen maximal hohen Füllgrad („stopfbare Komposite“) ein Irrweg ist. Die Materialien werden spröder und die Gefahr eines Verarbeitungsfehlers durch den unbemerkten Einschluß von Luftblasen nimmt zu. In seinen Untersuchungen kann er zwar nachweisen, daß die Sprödigkeit auf die Abrasion nicht einflußnehmend ist, bedingt durch den erhöhten E-Modul ist der Verschleiß durch Surface-Fatigue jedoch um 20-30% erhöht. Nach Kunzelmann (1996 a) liegt es für die Zukunft an der Optimierung

des E-Moduls, um die Verschleißraten kommerzieller Komposite deutlich zu vermindern.

Anusavice (1996) bemängelt den nur geringen internationalen Standardisierungsgrad bei der Durchführung von Experimenten der hier durchgeführten Art. Zwar entsprechen die ersten beiden Versuche sehr wohl zuvor in der Literatur beschriebenen, doch ob letztlich die geringsten Details bei der Durchführung übereinstimmen, läßt sich nicht sicher beurteilen. Aus diesem Grund ist ein bloßer Vergleich der Ergebnisse mit denen anderer Autoren nur vorsichtig anzustrengen, auch weil das dritte Experiment ein völlig neuartiges darstellt.

Bezüglich der Acta-Maschine stellt De Gee (1994) fest, daß die erzielten Daten mit einem durchschnittlichen Korrelationskoeffizienten von 0,90 (entspricht einer Übereinstimmungsgenauigkeit von 90%) mit den Daten, die in klinischen Versuchen gesammelt wurden, übereinstimmen. Die Ergebnisse bestätigen den experimentellen Aufbau als realistische Simulation für die Komplexität klinischer Beanspruchung.

Zusammenfassend ist zu bedenken, daß der entstandene Abtrag unabhängig von Material und Methode mit bis zu 1,4 mm mittleren Höhenverlust nicht unerheblich war. Hierzu eine spielerische Rechnung:

Angenommen, man nimmt drei mal täglich Nahrung auf und benötigt jeweils 3 Minuten für den bloßen Kauakt. Wenn die Kaufrequenz ca. 1 Hz beträgt, beißen die Kauflächen der Molaren täglich etwa 500 mal ineinander. In der Summe sind das jährlich 180.000 Kontakte der Kauflächen. Verglichen mit der Anzahl der Versuchszyklen, welche sich mit 200.000 und 400.000 in der selben Größenordnung befinden und die Realität prinzipiell wiedergeben, zeigt sich, daß dies bei kritischer Betrachtung das Ende der Lebensdauer einer kaukrafttragenden Kompositversorgung darstellen kann.

Somit stellen Komposite für viele Versorgungen (Frontzahn, Zahnhal) eine Lösung dar, welche heutzutage ohne Alternative bleibt. In Regionen, die hohen Kaukräften ausgesetzt sind, scheinen die hier geprüften Komposite noch nicht die ausreichende Festigkeit zu besitzen.

6. Zusammenfassung

Die Firma Vivadent (Schaan, Liechtenstein) stellte drei Materialgruppen zur Verfügung. Gruppe 1 besteht aus fünf Kompositen, deren Füller 1 µm groß ist und zu je 63, 52, 42, 32 und 22 Gew.-% enthalten ist. Gruppe 2 besteht aus ebenso vielen Materialien, deren Füller 13,7 µm groß und in der gleichen abnehmenden Abstufung beigemischt ist. Die Gruppe 3 besteht aus sieben Materialien, deren Füllergehalt relativ konstant ist. Hier nimmt der Gehalt an Bz-Methacrylat, einem Anteil der Monomerfraktion, der für den Quervernetzungsgrad der Monomerfraktion maßgebend ist, in den Schritten 0, 0,46, 0,9, 1,36, 1,8, 2,71 und 3,61 Gew.-% zu.

Ziel dieser Arbeit ist, die Verschleißwerte in Abhängigkeit von Materialzusammensetzung und vorwiegend Verschleißmechanismus quantitativ zu ermitteln, sowie das zugehörige Verschleißphänomen qualitativ zu erfassen und zu verifizieren.

Hierzu dienen drei In-vitro-Experimente, welche mit Hilfe von Kausimulatoren durchgeführt werden. Das Experiment 1 wird mit der Acta-Maschine durchgeführt, deren vorwiegendes Verschleißprinzip die Abrasion ist. Hierzu läuft ein Rad mit aufgeklebten Proben in einem abrasiv wirksamen Medium (Hirsebrei). Ein Antagonistenrad läuft parallel auf der Oberfläche des Probenrades, um das Medium in einer definierten Richtung und Geschwindigkeit (Slip = -18%) für 200.000 Zyklen an den Probekompositen entlangzuführen.

Experiment 2 entspricht dem Ersten, jedoch wird der Slip auf +15% geändert. Dies bedeutet, daß der Betrag der Relativgeschwindigkeiten beider Räder zueinander konstant bleibt, das Antagonistenrad dreht nun um den selben Betrag schneller als das Probenrad. Hierdurch kann nachgewiesen werden, daß

neben dem dominierenden Verschleißmechanismus in der Acta-Maschine, der Abrasion, bauartbedingt durch das Auftreten fluiddynamischer Zug- und Druckspannungen ein Surface-Fatigue auftritt, wodurch der Verschleiß um etwa 20% forciert wird.

Experiment 3 wird mit dem Fatigue-Tester durchgeführt, einer Apparatur, um ausschließlich das Verschleißphänomen Surface-Fatigue zu simulieren. Hierzu läuft eine Metallrad mit einer Kraft von 45 N passiv auf der sich drehenden Probenradoberfläche. Im Gegensatz zur Acta-Maschine besitzen beide Räder an ihrem Berührungspunkt die gleiche Geschwindigkeit. Es wird also Verschleiß nicht durch „Abrieb“, sondern durch Materialermüdung provoziert. Weil der Verschleiß etwa um die Hälfte geringer ausfällt, wird die Auswertung nach 400.000 Zyklen vorgenommen.

Bei allen drei Experimenten kann gezeigt werden, daß Fülleranteil und Füllergröße das Verschleißverhalten signifikant beeinflussen, wogegen der Einfluß der Matrix untergeordnet ist. In den Experimenten 1 und 2 sinkt die Abrasion mit steigendem Fülleranteil und sinkender Füllergröße. Die Materialien im dritten Experiment verhalten sich invers und zeigen mit den geringsten Fülleranteilen den größten Widerstand gegen den Surface-Fatigue.

Weil gleiche Materialeigenschaften bei unterschiedlichen Beanspruchungsformen gegensätzliches Verschleißaufkommen hervorrufen, bedeutet dies, daß ein dentales Komposit bestmöglich allen Beanspruchungsmechanismen widerstehen muß, nachdem diese in vivo auf der Füllungsoberfläche benachbart auftreten können: Surface fatigue in der OCA-Region (occlusal contact area) und Abrasion in der CFA-Region (contact free area).

Literaturverzeichnis

American Dental Association, Council on dental materials, Instruments and Equipment. Guidelines for submission of composite resin materials for posterior materials (1989).

Anusavice, K. J., Brennan, A. B.: Challenges to the development of esthetic alternatives to dental amalgam in an academic research center. Academy of dental materials, Transactions 9 (1996).

Axen, N., Jacobson, S.: A model for the abrasive wear resistance of multiphase materials. Wear 174, 187-199 (1994).

Bauer, C. M., Kunzelmann, K.-H., Hickel, R.: Simulierter Nahrungsabrieb von Kompositen und Ormoceren. Dtsch Zahnärztl Z 50, 635-638 (1995) 9.

Bailey, W.F., Rice, S.L.: Comparative sliding-wear behaviour of a dental amalgam and a composite restorative as a function of contact stress. J Dent Res 60, 731-732 (1981).

Bayne, S.C., Taylor D.F.: Dental materials. In: Sturdevant, C.M., Roberson, T.M., Heymann, H.O., Sturdevant, J.R., editors: The Art and Science of Operative Dentistry. 3rd ed. St. Louis: CV Mosby Co., 260 – 261 (1995).

Bayne, S.C., Taylor D.F., Heymann, H.O.: Protection hypothesis for composite wear. Dent Mater 8: 305 – 309 (1992).

Braem, M., Finger, W., Van Doren, V.E., Lambrechts, P., Vanherle, G.: Mechanical properties and filler fraction of dental composites. Dent Mater 5, 346-349 (1989).

Buonocore, M.: Adhesive sealing of pits and fissures for caries prevention, with use of ultraviolet light, J Am Dent Assoc 80, 324 – 328 (1970).

Condon, J.R., Ferracane, J.L.: Evaluation of composite wear with a new multi-mode oral wear simulator. Dent Mater 12, 218-226 (1996).

Condon, J.R., Ferracane, J.L.: In vitro wear of composite with varied cure, filler level and filler treatment. J Dent Res 76, 1405-1411 (1997).

Cross, M., Douglas, W.H., Fields, R.P.: The relationship between filler loading and particle size distribution in composite resin technology. J Dent Res 62, 850-852 (1983).

Czapp, A.E., Schnebel, E., Götz, A.: Verwendung von selbsterhärtenden Kunststoffen auf dem Dentalgebiet, DE 973 590 (1969).

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, 654-658 (1986).

De Gee, A.J., Pallav, P., Werner, A., Davidson, C.L.: Annealing as a mechanism of increasing wear resistance of composites: Dent Mater 6, 266-270 (1990).

De Gee, A.J., Pallav, P.: Occlusal wear simulation with the Acta wear machine. J Dent Suppl 1/22, S21-S27 (1994).

Deigner, M.: Das Abrasionsverhalten von Kompositinlaysystemen. Inaugural-Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (1995).

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, 32-36 (1983).

DIN 50323 : Deutsche Normen, Verschleißbegriffe , Systemanalyse von Verschleißvorgängen, Gliederung des Verschleißgebietes. Beuth, Berlin (1979).

Dickson, G.: Physical and Chemical Properties and Wear. J Dent Res 58, 1535-1543 (1979).

Espe, D-Seefeld: Hytac – Produktdossier.

Espe, D-Seefeld: Pertac II – Produktdossier.

Feilzer, A.J., De Gee, A.J., Davidson, C.L.: Setting stress in composite resin in relation to the configuration of the restoration. J Dent Res 66: 1636 – 1639 (1987).

Finger, W., Thiemann, J.: Correlation between in vitro and in vivo wear of posterior restorative materials. Dent Mater 3, 280-286 (1987).

Gügel, I.: Simulationsversuch von Microwear mit Merkmalsvergleich an frühmittelalterlichen Molaren. Institut für Anthropologie und Humangenetik, Ludwigs-Maximilians-Universität, München (1998).

Gurgan, S., Onen, A., Koprulu, H.: In vitro effects of alcohol - containing and alcohol - free mouthrinses on microhardness of some restorative materials. J Oral Rehabil 24, 244-246 (1997).

Hickel, R.: Forschungsbericht Zahnabration: Zahnabration und beruflich bedingte Einflüsse bei Steinbrucharbeitern, Schriftenreihe des Hauptverbandes der gewerblichen Berufsgenossenschaften, Sankt Augustin 1989.

Hoffmann-Axthelm, W.: Lexikon der Zahnmedizin, 6. Auflage, Quintessence-Verlag (1995).

Ivoclar-Vivadent Report, Nr. 5 : Composite - Füllungsmaterialien. Januar 1990.

Ivoclar-Vivadent Report, Nr. 7 : Der gefüllte Zahn - ein komplexes Verbundsystem. November 1992.

Ivoclar-Vivadent, Wissenschaftlicher Dienst: Tetric, Wissenschaftliche Dokumentation, Februar 1996.

Jørgensen, K.D.: Occlusal abrasion of a composite resin with ultra - fine filler - an initial study. Quint Int 6, 73 - 78 (1978).

Jørgensen, K.D., Horsted, P., Janum, O. et al.: Abrasion of Class I restorative resins. *Scand J Dent Res* 87, 140 – 145 (1979).

Jørgensen, K.D.: Restorative resins: Abrasion vs. mechanical properties. *Scand J Dent Res* 88, 557 – 568 (1980).

Jørgensen, K.D.: In vitro wear tests on macro – filled composite restorative materials. *Aust Dent J* 27, 153 – 157 (1982).

Krämer, N., Pelka, M., Kautetzky, P., Sindel, J., Petschelt, A.: Abrasionsbeständigkeit von Kompomeren und stopfbaren Glasionomermaterialien. *Dtsch Zahnärztl Z* 52/3, 186-189 (1997).

Krejci, I., Lutz, F., Oldenburg, T. R.: Perfekt und belastungsresistent adaptierte Seitenzahnkompositfüllungen – eine neue Fülltechnik. *Swiss Dent* 7, 21–29 (1986).

Krejci, I.: Zahnfarbene Restaurationen: Qualität, Potential und Indikationen. Carl Hanser Verlag (1992).

Kunzelmann, K.-H.: Verschleißanalyse und -quantifizierung von Füllungsmaterialien in vivo und in vitro. Habilitationsschrift an der Ludwig-Maximilians-Universität München (1996, a).

Kunzelmann, K.-H.: Glass-ionomer Cements, Cermet Cements, „HybS rid“-Glass-ionomers and Compomers - Laboratory trials - Wear resistance. *Academy of Dental Materials, Transactions* 9 (1996, b).

Kunzelmann, K.-H., Mehl, A., Hickel, R.: Fatigue behaviour of model composites in a new surface fatigue simulator. *J Dent Res* 77 (SI B), 914 (1998) Nr. 2262

Lambrechts, P., Vanherle, G., Vuylsteke, M., Davidson, C.L.: Quantitative Evaluation of the Wear Resistance of Posterior Dental Restorations: A New Three-dimensional Measuring Technique. *J Dent* 12, 252-267 (1984).

Lambrechts, P., Braem, M., Vanherle, G.: Accomplishments and Expectations with Posterior Materials. In : Posterior Composite Resin Dental Restorative Materials. Proc. Int. Symp., Vanherle, G., Smith, D.C., Eds., Utrecht: Szule Press (1985).

Lambrechts, P., Braem, M., Vanherle, G.: Evaluation of clinical performance for posterior composite resins and dentin adhesives. *Oper Dent* 12, 53 – 78 (1987).

Lehmann, K.M., Hellwig, E.: Einführung in die restaurative Zahnheilkunde, 7. Auflage, Urban und Schwarzenberg (1993).

Leinfelder, K.F., Sluder, T.B., Santos, J.F.F., Wall, J.T.: Five – year clinical evaluation of anterior and posterior restorations of composite resin. *Oper Dent* 12, 53 – 78 (1980).

Leinfelder, K.F., Roberson, T.M.: Clinical evaluation of posterior composite resins *Gen Dent* 31, 276 – 281 (1983).

Leinfelder, K.F.: Composites: Current status and future developments. In: International state-of-the-art conference on restorative dental materials. Bethesda: National institute of dental research.(1986).

Leinfelder, K.F.: Current developments in posterior composite resins. Adv Dent Res 2, 115 – 121 (1988).

Li, Y., Swartz, M.L., Phillips, R.W., Moore, B.K., Roberts, T.A.: Effect of Filler Content and Size on Properties of Composites. J Dent Res 64 (12), 1396-1401 (1985).

Lutz, F.: Beiträge zur Entwicklung von Seitenzahnkomposits. KAR / PAR / PZM, Zürich (1980).

Lutz, F., Phillips, R.W., Roulet, J.F., Setcos, J.C.: In vivo and in vitro Wear of Potential Posterior Composites. J Dent Res 63, 914-920 (1984).

Mair, L.H.: Subsurface compression fatigue in seven dental composites. Dent Mater 10, 111-115, (1994).

Mair, L.H., Stolarski, T.A., Vowles, R.W., Lloyd, C.H.: Wear: mechanisms, manifestations and measurement. Report of a workshop. J Dent 24, 141-148 (1996).

Matsumura, H., Leinfelder, K.F.: Three-body wear of four types of light-activated composite resin veneering materials. Quintessence Int 25, 425-430 (1994).

McCabe, J.F., Ogden, A.R.: The relationship between porosity, compressive fatigue limit and wear in composite resin restorative materials. Dent Mater 3, 9-12 (1987).

McCabe, J.F., Cleary, S.M., Abu Kasim, N.H.: Surface Fatigue of Model Composites. J Dent Res 75 (IADR Abstracts), 256 (1996).

McKinney J.E., Wu, W.: Relationship between subsurface damage and wear of dental restorative composites. J Dent Res 61, 1083-1088 (1982).

Osterkamp, W.R., Friedman, J.M.: Research considerations for Biomorphology. Proceedings of the U.S. Geological Survey (USGS) Sediment Workshop, February 4 – 7, 1997. <http://www.rvares.er.usgs.gov/osw/workshop/osterkamp.html>

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(4), 426-429 (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(3), 489-490 (1989).

Pallav, P., De Gee, A.J., Werner, A., Davidson, C.L.; Influence of shearing action of food on contact stress and subsequent wear of stress-bearing composites. J Dent Res 72(1), 56-61 (1993).

Pelka, M., Ebert, J., Schneider, H., Rücker, C., Krämer, N.: Comparison of two- and three-body wear of glass-ionomers and composites. Oral presentation CED (1994).

Pelka, M.: Haltbarkeit von Füllungen aus verschiedenen Materialien. Zahnärztl Mitteilungen 88/21, 2676-2681 (1998).

Peutzfeldt, A., Asmussen, E.: Modulus of resilience as predictor for clinical wear of restorative resins. Dent Mater 8, 146-148 (1992).

Plueddemann, E.P.: Silane coupling agents. Plenum Press, New York (1982)

Rice, S.L., Bailey, W.F., Roto, M., Wayne, S.F.: Wear behaviour of a composite restorative and various styli in sliding contact. J Dent Res 63(6), 932-935 (1984).

Rice, S.L., Bailey, W.F., Wayne, S.F., Burns, J.A.: Comparative in vitro sliding wear study of conventional, microfilled, and light-cured composite restauratives. J Dent Res 63 (9), 1173-1175 (1984).

Roulet, J.F. : Die Abrasion von Kompositen. Schweiz Monatsschr Zahnmed 68, 413-426 (1976).

Runge, F.: Bericht über das „First European Meeting on Phytolith Research“ vom 23. Bis 26. September 1996 am Centro de Ciencias Medioambientales (CSIC) in Madrid, Spanien. <http://geo.unipaderborn.de/Phytolit/Phy...0Forschung%20in%20tropisch%20Afrika.html>

Sarrett, D. C. , Söderholm, K.-J. M., Batich, C. D.: Water and abrasive effects on three - body - wear of composites. J Dent Res 70, 1074-1081 (1991).

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

Søderholm, K.J.: Degradation of glass filler in experimental composites. J Dent Res 60, 1867-1875 (1981).

Søderholm, K.J.: Leaking of fillers in dental composites. J Dent Res 62, 126-130 (1983).

Søderholm, K.J., Zigan, M., Ragan, M., Fischlschweiger, W., Bergman, M.: Hydrolytic degradation of dental composites. J Dent Res 63, 1248-1254 (1984).

Suh, N.P.: An overview of the delamination theory of wear. Wear 44, 1-15 (1977).

Suh, N.P.: Tribophysics. Prentice – Hall, New Jersey (1986).

Suzuki, S., Leinfelder, K.F., Kawai, K., Tsuchitani, Y.: Effect of particle variation on wear rates of posterior composites. Am J Dent 8, 173-178 (1995).

Uetz, H., Wiedemeyer, J.: Tribologie der Polymere: Grundlagen und Anwendungen in der Technik, Hanser, (1984).

Van Groeningen, G., Jongebloed, W., Arends, J.: Composite Resins after 1 ½ Years of in vivo Abrasion. An SEM Investigation. Quint Int 4, 253-258 (1985).

Vivadent, Wissenschaftlicher Dienst: Wissenschaftliche Dokumentation, Technisches Datenblatt „Tetric“ (1996).

Watts, D. C.: Dental restorative materials. In: Cahn, R.W., Haasen, P. and Kramer, E.J. (Eds). Materials science and technology: A comprehensive treatment. Volume 14, Dental and medical materials. Ed. Williams, D.F., Weinheim, VCH Verlagsgesellschaft mbH, pp. 209 – 208.

Watts, D. C.: The Structural Scope of Biomaterials as Amalgam Alternatives. Academy of Dental Materials, Transactions 9 (1996).

Wilder, A.D., Bayne, S.C., Heyman, H.O.: Long-term clinical performance of direct posterior composites. Academy of Dental Materials. Transactions 9, 151-169 (1996).

Wu, W., Cobb, E.N.: A silver staining technique for investigating wear of restorative dental composites. J Biomed Mater Res 15, 343-348 (1981).

Wu, W., McKinney, J.E.: Influence of chemicals on wear of dental composites. J Dent Res 61, 1180-1186 (1982).

Wu, W., Toth, E.E. Moffa J.A., Ellison, J.A. : Subsurface damage layer of in vivo worn dental composite restorations. J Dent Res 63, 675-680 (1984).

Yuasa, S.: Influences of composition on brush wear of composite resins. Influences of particle size and content of filler. Shika Zaiyo Kikai 9, 659 (1990).

Zum Gahr, K., H.: Microstructure and wear of materials. Elsevier Science Publishers B.V. (1987).

Tabellen

Acta-Maschine	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Material-Nummer	24	30	36	44	52	63	72	81	93	106	121	138	156	175	195	216	239
1	30,3	37,2	46,2	58,6	35,1	46,1	56,1	66	70	16,4	16,6	16,3	16,8	20,6	16,2	16,4	
2	30,3	36	44,4	52,6	63	41,4	53,3	72,4	81,5	93,7	22,9	23,3	22,4	22,8	21,9	23,3	21,8
3	31	37	43	52,6	64	50,9	42,3	62,1	73	83,4	23,9	24	24,4	23,8	21,3	25,8	25,6
4	32,8	36,7	43,1	53,2	67,3	40,4	50,5	63	74,7	78,1	24	25	25	26,4	21,1	24,6	25,2
5	28,2	32,9	42,4	50,4	64,2	37,9	47,2	62,9	73,3	76,4	23,9	23,5	22,5	23,2	21,8	24,3	21,8
6	30,8	36,8	44,2	54,9	70,7	37,9	50	61,7	74,3	81	24,4	24,6	23,4	23,4	22,9	27,2	25,3
7	26,6	30	37,5	47,8	61,5	35,1	47,7	60,1	65,7	75,6	18,5	19,6	20,6	19,8	21,4	20,3	19,9
8	32,8	39	50,1	59,3	73,1	48	58,2	73,8	83,6	88,8	27,5	26,5	19,1	21,1	24,8	20,7	27,2
9	31,3	34,5	41,5	51,6	61,5	38,6	47,5	60,2	67,7	69	20,5	13,8	21,9	22,4	26,5	22,5	11
10	22,2	29	36,6	47,3	56,9	31,3	43,1	55,5	62,8	73,4	16,9	14,8	20,4	20,6	17,2	20	24,7
11	22,9	29,3	26,5	40,8	51,8	32,8	49,3	50,7	60,1	65,2	17,8	18,8	20,8	21,7	18,8	22,1	27,6
12	12,2	13,3	14,5	13,9	15,1	14,4	18,5	17,1	16,5	18,1	11,6	11,4	19,7	20,4	25	22	
13	33,7	41,3	49,3	56,5	73,5	46,9	57	62,1	75,7	80,8	22,3	22,9	21,7	22,4	17,1	21,3	
14	32,8	40,8	46,8	54,9	69,6	47,2	57,5	63,7	77,4	83,8	25,5	25,9	23	22	19,7	21,3	
15													21,7	22,2	24	23,8	
16													30,4	26,3	15,6	28,7	
17													11,3	12,4	18,5	11	
18													23,7	25	24,9	22,4	
19													25,9	27	17,3	25,9	
20																	
Wochen	27,943	33,329	39,721	48,714	60,771	38,421	47,729	69,671	69,007	74,093	31,18	20,764	21,6	22,186	20,946	22,268	22,409

Tab.A: Meßergebnisse Experiment 1, Acta - Maschine mit -18% Slip.

Acta-Maschine: Slip = +15%	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Material-Nummer	30,3	29,8	18,8	17,8	25,1	23,8	26,8	30,3	34,3	42,5	37,9	47,9	51,5	60,3	33,2	42	48
1	30,3	33,8	41,1	50	55,4	57,4	34,8	33,5	38,5	51	57,6	60,9					
2	29,8	32,4	39,7	46,7	57,4	41,3	20,8	30,1	36,2	42,7	49,5	58,1					
3	18,8	19,8	25,4	33,8	41,3	20,8	22,3	26,6	32,2	48,7	49,5	58,1					
4	17,8	21,4	26,8	34	38,6	57,7	25,1	37,5	42,8	55,5	58,1	53,2					
5	25,1	30,8	37,5	45	57,7	43,1	57,8	26,9	36,1	44,9	50,7	53,2					
6	23,8	30,3	45,8	51,9	61,5	29,9	48,5	54,8	61,8	79,1	79,2	81,3					
7	26,8	34,3	42,5	51,9	60,3	33,2	42	46,3	60,7	67,2	72,2	77,2					
8	28,1	37,6	47,9	51,5	60,3	33,2	42	46,3	60,7	67,2	72,2	77,2					
Wochen	25,0128	30,85	38,278	44,6	53	28,1128	37,8028	48	51	57,6	60,9	62,9					

Tab.B: Meßergebnisse Experiment 2, Acta - Maschine mit +15% Slip.

Lebenslauf

Am 5. Januar 1972 wurde ich als Sohn des Ehepaares Dr. Edgar Grünwald, Zahnarzt in München und Silvia Grünwald, Sekretärin, geborene Wagner, in Bad Tölz geboren.

Von 1978 bis 1982 besuchte ich die Oberföhringer Grundschule, München. Von 1982 bis 1989 besuchte ich das mathematisch-naturwissenschaftliche Luitpold-Gymnasium, von dem ich auf das Gisela-Gymnasium, beide in München, wechselte. Die allgemeine Hochschulreife erlangte ich im Sommer 1992.

Von Frühjahr 1993 bis Frühjahr 1994 absolvierte ich den Zivildienst an der Poliklinik für Zahnerhaltung und Parodontologie der Klinik für Zahn-, Mund- und Kieferkrankheiten der Ludwig-Maximilians-Universität München.

Zum Sommersemester 1994 wurde ich an der Ludwig-Maximilians-Universität München im Studienfach Zahnmedizin immatrikuliert. Die naturwissenschaftliche Vorprüfung absolvierte ich im Frühjahr 1995, die zahnmedizinische Vorprüfung im Herbst 1996. Zur zahnmedizinischen Prüfung wurde ich im Sommer 1999 zugelassen, die Approbation erhielt ich am 6.8.1999. Seit dem 1.9.1999 bin ich als Ausbildungsassistent in einer freien Praxis in München als Zahnarzt tätig.