

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

**ENTWICKLUNG EINER COMPUTERGESTEUERTEN  
PIN-ON-DISK-MASCHINE  
ZUR ZWEI-MEDIEN-ABRIEBSIMULATION  
DENTALER WERKSTOFFE**

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

vorgelegt von  
Franziska Holzner-Hartmannsgruber  
aus  
München  
1997

Mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät  
der Universität München

Berichterstatter:

**Prof. Dr. Reinhard Hickel**

---

Mitberichterstatter:

**Prof. Dr. G. Beier**

**Priv. Doz. Dr. L. Kremers**

---

Mitbetreuung durch den  
promovierten Mitarbeiter:

**Dr. Karl-Heinz Kunzelmann**

---

Dekan:

**Prof. Dr. med. Dr. h. c. K. Peter**

---

Tag der mündlichen Prüfung:

**28. Oktober 1997**

---

## Inhaltsverzeichnis

	Seite
<b><u>1 Einleitung und Problemstellung</u></b>	1
<b><u>2 Literaturübersicht</u></b>	3
2.1 Verschleißmechanismen - Definitionen und Grundbegriffe	3
2.2 Grundlagen aus der klassischen Physik	6
2.3 Aussagen über In-vitro-Tests aus der Tribologie	8
2.4 Übersicht über Verschleißtests in der Zahnmedizin	12
2.5 Pin-on-disk-Simulation in der Zahnmedizin	14
<b><u>3 Material und Methode</u></b>	25
3.1 Systematische Entwicklung der Pin-on-disk-Maschine	25
3.1.1 Grundlegendes Funktionsprinzip	25
3.1.2 Aufbau der Münchner Pin-on-disk-Maschine	26
3.1.3 Technische Einzelheiten	27
3.2 Prüfkörper	34
3.2.1 Verwendete Probenmaterialien	34
3.2.2 Einteilung der Komposite	34
3.2.3 Probenherstellung	38
3.2.4 Material des Antagonistenpins	41
3.2.5 Planschleifen des Pins	43
3.3 Technische Problemlösungen bei der Entwicklung der Pin-on-disk-Maschine	45
3.3.1 Ankopplung an die Quickttestmaschine	45
3.3.2 Planparallelität der Probenfläche zur Pinoberfläche	46
3.3.3 Schwingungen durch Reibung	47
3.3.4 Drehung des Pins in seiner Zentrumsachse	47
3.3.5 Schwankungen der Reibkraft innerhalb einer Umdrehung	48
3.3.6 Getrennte Messung des Abriebs von Probe und Pin	49

3.4 Festlegung und Eingrenzung der Parameter	50	4.3.2 Materialverschleiß bei Variation der Pindurchmesser	84
3.4.1 Anpassung der Parameter an physiologische Bedingungen	51	4.3.3 Volumenverluste von Pin und Disk im Vergleich	86
3.4.2 Zusammenfassung physiologischer Parametervorgaben	54	4.3.4 Zeitlicher Verlauf der Verschleißraten	87
3.5 Vorversuche an der Pin-on-disk-Maschine	54	4.3.5 Materialverschleiß bei unterschiedlichen Aushärtzeiten	88
3.5.1 Parameter Temperatur	55	4.3.6 Materialverschleiß bei unterschiedlicher Antagonistenform	89
3.5.2 Parameter Zwischenmedium	56	4.3.7 Tabellarische Gesamtübersicht aller ermittelter Werte	90
3.5.3 Parameter Gleitgeschwindigkeit	57		
3.5.4 Reproduzierbarkeit von Messungen	58	<b><u>5 Diskussion</u></b>	91
3.5.5 „Running-in“ unterschiedlicher Werkstoffe	59	5.1 Ranking der Abriebfestigkeit der getesteten Materialien	91
3.5.6 Parameter Rauigkeit	60	5.2 Abrasivität der Materialien auf den Antagonisten	92
3.5.7 Parameter Normalkraft	61	5.3 Zeitlicher Verlauf der Verschleißkurven	94
3.6 Vorversuche zur Bestimmung von Reibkoeffizienten	62	5.4 Zeitlicher Verlauf der Reibkraftkurven - Reibkoeffizient	96
<b><u>4 Ergebnisse</u></b>	64	5.5 Einfluß der Flächenpressung/ des Pindurchmessers	99
4.1 Haftreibung	64	5.6 Potentiale der Münchner Pin-on-disk-Maschine	102
4.1.1 Schlußfolgerungen im Hinblick auf Pin-on-disk-Versuche	67	5.7 Optionen für zukünftige Pin-on-disk-Untersuchungen	103
4.2 Praktische Versuche an der Pin-on-disk-Maschine	68		
4.2.1 Einleitung	68	<b><u>6 Zusammenfassung</u></b>	105
4.2.2 Variation der Pindurchmesser	69	<b><u>7 Literaturverzeichnis</u></b>	107
4.2.2.1 Estilux HS Hybrid	70	<b><u>8 Anhang</u></b> Bedienungsanleitung der Pin-on-disk-Maschine	115
4.2.2.2 Heliomolar RO	71	<b><u>9 Danksagung</u></b>	119
4.2.2.3 Tetric	72	<b><u>10 Lebenslauf</u></b>	120
4.2.2.4 Dyract	73		
4.2.3 Verschleiß-Zeit Diagramme unterschiedlicher Werkstoffe	74		
4.2.4 Reibkraft-Zeit-Diagramme unterschiedlicher Werkstoffe	75		
4.2.6 Variation der Antagonistenform	76		
4.2.5 Variation der Aushärtedauer	80		
4.3 Auswertung der Meßergebnisse	82		
4.3.1 Differenzierte Darstellung des Abriebs von Probe und Pin	83		

## 1 Einleitung und Problemstellung

Die seit einigen Jahren fortwährende Diskussion über die gesundheitsschädigende Wirkung des Füllwerkstoffes Amalgam sowie die Forderung der Patienten nach ästhetisch ansprechendem Zahnersatzmaterial haben in den vergangenen Jahren dazu geführt, daß der Markt von der Dentalindustrie mit neuen Füllwerkstoffen nahezu überschwemmt wurde.

Eine wichtige Aufgabe der unabhängigen Forschungsinstitutionen, wie etwa Universitäten, ist es nun, schnellstmöglich und fachgerecht die Qualität der angebotenen Materialien zu überprüfen und miteinander zu vergleichen, um in Zukunft die bestmögliche Versorgung der Patienten garantieren zu können.

LUTZ (1983) und ROULET (1987) formulierten die wichtigsten Anforderungen, die ein Werkstoff erfüllen muß, um als zufriedenstellender Amalgamersatz zum Einsatz zu gelangen. Dabei scheint unter anderem vor allem die Forderung nach adäquater Verschleißfestigkeit ein wichtiges Kriterium für die Dauerhaftigkeit bzw. klinische Tauglichkeit eines zahnärztlichen Werkstoffs darzustellen.

Vielfältige Materialtestverfahren *in vitro* und *in vivo* wurden bereits entwickelt, um die verschiedenen Materialien und deren Eigenschaften gesondert zu testen. Nach wie vor existiert jedoch kein Abriebsimulationsverfahren, das die klinische Situation perfekt wiedergibt. Darin sieht ROULET (1987) auch den Grund, warum es beinahe so viele Testapparaturen wie Forscher gibt, die das Verschleißphänomen zu verstehen versuchen. Dennoch sieht er in den *In-vitro*-Verschleißtests eine der größten Herausforderungen der dentalen Materialforschung.

Ein Forschungsschwerpunkt an der Poliklinik für Zahnerhaltung und Parodontologie in München ist die Simulation von Reibungs- und Verschleißvorgängen zur Evaluation dentaler Füllungsmaterialien. Zu diesem Zweck wurden bereits mehrere *In-vitro*-Simulationsvorrichtungen entwickelt und angeschafft.

In Anlehnung an Zürich (KREJCI 1990) und Minnesota (DOUGLAS 1983 und DE LONG 1983) wurde ein computergesteuerter Kausimulator konstruiert mit dem Ziel, die physiologische Kaubelastung zu simulieren sowie dadurch verursachte Verschleißmechanismen zu untersuchen. Materialverschleiß im okklusalen Füllungsbe- reich durch Nahrungsbestandteile wird durch eine in Anlehnung an DE GEE (1986) entwickelte Acta-Maschine simuliert und quantifiziert. Eine computergesteuerte 2-Achsen-Zahnbürstmaschine wurde an der Poliklinik für Zahnerhaltung und Parodontologie in München entwickelt (SINGER 1996). Durch Zahnbürste und Zahnpa- sta verursachter Materialabrieb unterschiedlicher Füllungsmaterialien an Klasse-V- Kavitäten sollte damit näher beleuchtet und ausgewertet werden.

Materialverschleiß unter klinischen Bedingungen ist ein äußerst komplexer Prozeß, der in seiner Gesamtheit nach wie vor kaum nachzuvollziehen ist. Schon BAILEY ET AL. (1982) betonten daher eingehend, daß die Nachbildung eines physiologischen Kauprozesses erst dann sinnvoll sein kann, wenn die zahlreichen einstellbaren Pa- rameter hinsichtlich ihrer Bedeutung für den Materialverschleiß untersucht und ver- standen worden sind.

Deshalb sollte im Rahmen der vorliegenden Dissertation die Simulation des Materi- alverschleißes sowie deren Interpretation um eine weitere Komponente ergänzt wer- den. Die Aufgabenstellung bezieht sich im Wesentlichen auf die Analyse der mögli- chen Zusammenhänge zwischen Reibung, Reibkräften und Materialverschleiß.

Um Messungen dieser Größen durchführen zu können, wurde an der Poliklinik für Zahnerhaltung und Parodontologie der LMU München eine sogenannte Pin-on-Disk- Maschine entwickelt. Es handelt sich dabei um ein vorwiegend in der feinmechani- schen Industrie zur Materialprüfung eingesetztes Verfahren, bei dem während eines Testlaufs kontinuierlich die Höhe der entstandenen Reibkraft aufgezeichnet werden kann. Dieses Verfahren wurde für den Einsatz an Zahnersatzmaterialien spezifiziert und zugleich mit einer Online-Höhenmessung ausgestattet, die zu jedem Zeitpunkt den aufgetretenen Verschleiß aufzuzeichnen in der Lage ist.

Eine weitere Aufgabenstellung vorliegender Arbeit soll darin bestehen, auf die Fra- gestellung Bezug zu nehmen, inwieweit Versuchsparameter, die am Verschleißpro- zess beteiligt sind, von klinischer Relevanz sind.

Ein fundierteres Verständnis der komplexen Verschleißphänomene dentaler Werk- stoffe soll somit erlangt werden und bei der Interpretation bereits erhaltener For- schungsergebnisse behilflich sein.

## **2 Literaturübersicht**

### **2.1 Verschleißmechanismen dentaler Werkstoffe**

#### **Definitionen und Grundbegriffe**

Die physiologische Kaubewegung kann, stark vereinfacht, als Gleitvorgang be- schrieben werden. Sie bedingt auf Dauer den Verschleiß des Zahnersatzmaterials oder des Zahnes selbst.

Das Verschleißverhalten und damit auch die Verweildauer dentaler Restaura- tionsmaterialien steht daher schon seit geraumer Zeit im Mittelpunkt der dentalen Materi- alforschung (RICE ET AL. 1982).

Der Grund dafür, daß sich einige der bisher entwickelten In-vitro-Verschleißtests nur unzureichend oder gar nicht zur Vorhersage für die klinische In-vivo-Tauglichkeit dentaler Werkstoffe eignen (DICKSON 1975), liegt zum einen in der biologischen Variationsbreite des physiologischen Verschleißvorgangs an sich, aber auch daran, daß das komplexe Phänomen „Verschleiß“ und die dabei ablaufenden Mechanismen nur schwer zu begreifen und differenzieren sind (RICE 1982).

Will man also das Phänomen Verschleiß verstehen, muß man sich zunächst mit den einzelnen Mechanismen, die Materialverschleiß bedingen können, vertraut machen sowie die Oberflächenstrukturen, die diesem Vorgang unterworfen sind, genauer untersuchen (ROULET 1984).

Gemäß DIN 50320 (Deutsches Institut für Normung) wird der Begriff „Verschleiß“ folgendermaßen definiert:

„Verschleiß ist der fortschreitende Materialverlust aus der Oberfläche eines festen Körpers, hervorgerufen durch mechanische Ursachen, das heißt Relativbewegung eines festen, flüssigen oder gasförmigen Körpers gegen einen Gegenkörper“.

Sämtliche Elemente, die am Verschleiß beteiligt sind, nennt man die Elemente des Tribosystems. Die Grundstruktur aller tribotechnischen Systeme besteht demnach aus folgenden 4 Systemelementen:

1. Der Körper
2. Der Gegenkörper
3. Das Zwischenmedium
4. Das umgebende Medium

Verschleiß läßt sich gemäß DIN 50320 in vier unterschiedliche Mechanismen einteilen. Darunter versteht man die bei einem Verschleißvorgang infolge der kräftemäßigen bzw. energetischen und stofflichen Wechselwirkungen zwischen den Kontaktpartnern ablaufenden physikalischen und chemischen Prozesse (CZICHOS 1992).

Die vier Verschleißmechanismen unterscheiden sich außerdem in der Morphologie sowohl der Beanspruchungspartner, als auch der beim Verschleißvorgang entstehenden Verschleißpartikel voneinander.

**Adhäsiver Verschleiß** entsteht infolge der Ausbildung und Trennung von Grenzflächen-Haftverbindungen zweier aneinander gleitender Körper und daraus resultierendem Materialübertrag.

**Abrasiver Verschleiß** beschreibt definitionsgemäß den Materialabtrag durch ritzende Beanspruchung. Er tritt vor allem dann auf, wenn der Gegenkörper beträchtlich härter und rauher ist als der tribologisch beanspruchte Grundkörper.

(ZUM GAHR 1987, CZICHOS 1986, ROULET 1986). In diesem Fall spricht man von **2-Medien-Abrasion**. Wenn aber harte Partikel (z. B. aus der Nahrung oder Zahnpasta-Schleifpartikel) in einen tribologisch beanspruchten Werkstoff (Zahn oder Füllungsmaterial) eingedrückt werden, so spricht man von **3-Medien-Abrasion**.

Abrasiver Verschleiß zeichnet sich vor allem durch dabei entstehende Verschleißpartikel aus. Ihm wird in der zahnmedizinischen Forschung eine zentrale Bedeutung zugeschrieben.

**Materialermüdung („Fatigue“)** deutet auf einen Verschleißprozeß hin, der insbesondere infolge konstanter oder wiederholter mechanischer Beanspruchungen zu erwarten ist. Dabei kommt es zur Ausbildung von Mikrorissen unterhalb der Oberfläche, die sich infolge weiterer Beanspruchung allmählich miteinander verbinden, bis sie plötzlich insgesamt ausbrechen.

Hierbei auftretende Verschleißpartikel sind, im Gegensatz zu den eher kleinen Abrasionsverschleißpartikeln, relativ groß und von schollen- bzw. lamellenartigem Aussehen. Dies entspricht dem Begriff „Delamination Wear“ (SUH, 1986).

Auch der Verschleißkomponente „Materialermüdung“ wird in der Zahnmedizin große Bedeutung beigemessen. Wiederholte mechanische Belastung infolge Kaubelastung, Nahrungszerkleinerung oder Zähnebürsten seien hier als Beispiel genannt (WU 1982, REID 1990, ROULET 1984).

**Tribochemische Reaktion** nennt man den Verschleißvorgang, bei dem Körper und Gegenkörper mit Bestandteilen des Zwischenstoffs oder Umgebungsmediums chemisch reagieren. Infolge der Relativbewegung werden ständig neue Reaktionsprodukte gebildet, die beim Erreichen einer kritischen Dicke zum spröden Ausbrechen neigen und damit zum Entstehen von Verschleißpartikeln führen.

Bei der Beurteilung eines Verschleißvorganges können die aufgeführten Mechanismen meist nicht streng voneinander getrennt werden. Alle grundlegenden Verschleißmechanismen können bei einer Gleitbewegung beteiligt sein. Sie können sich zeitlich und örtlich überlagern, aber auch einander ablösen (SULONG 1990, ROULET 1987). Auf das Wirken der einzelnen Verschleißmechanismen beim Gleitverschleiß kann aus der Erscheinungsform der Verschleißflächen (Grundkörper/ Ge-

genkörper) sowie aus der Art und Form der dabei entstandenen Verschleißpartikel geschlossen werden.

## 2.2. Grundlagen aus der Physik

### Definition Reibung:

Unter Reibung versteht man im weitesten Sinne eine Kraft, die zwei einander berührende Körper am Reibvorgang zu hindern versucht.

In der Physik versteht man unter der Reibkraft  $F(R)$  diejenige Kraft, die benötigt wird, um einen Körper, der auf fester Unterlage ruht, gleichmäßig bewegen zu können (Gleitreibung). Die Höhe der Reibkraft hängt von dem Gewicht  $F(N)$ , also der Normalkraft ab, mit dem dieser Körper senkrecht gegen die Unterlage gedrückt wird. Aus dieser Definition leiten sich die physikalischen Reibungsgesetze ab:

$$F(R) = F(N) \times \mu$$

1. Reibungsgesetz: Die Reibkraft verhält sich proportional zur Normalkraft.
2. Reibungsgesetz: Die Reibkraft ist unabhängig von der scheinbaren Kontaktfläche.

$\mu$ , der sogen. **Reibkoeffizient**, ist ein Proportionalitätsfaktor, bzw. ein numerischer, materialspezifischer Wert, der das Ausmaß der Reibkraft beschreibt und von der Art und Oberflächenbeschaffenheit des jeweiligen Materials abhängt.

In der Physik unterscheidet man zwischen folgenden Reibungsarten:

- **Gleitreibung** : Sie wirkt bei einer Bewegung des Körpers relativ zu einem anderen ( meist Unterlage o.ä. ).

- **Haftreibung** : Sie wirkt bei ruhendem Körper und ist dem Betrag nach gleich der entgegengerichteten äußeren Zugkraft . Die Haftreibungskraft ist stets größer als die Gleitreibungskraft.

- **Rollreibung**: Sie tritt auf, wenn der Körper auf der Unterlage rollt. Sie ist wesentlich kleiner als die Gleitreibung.

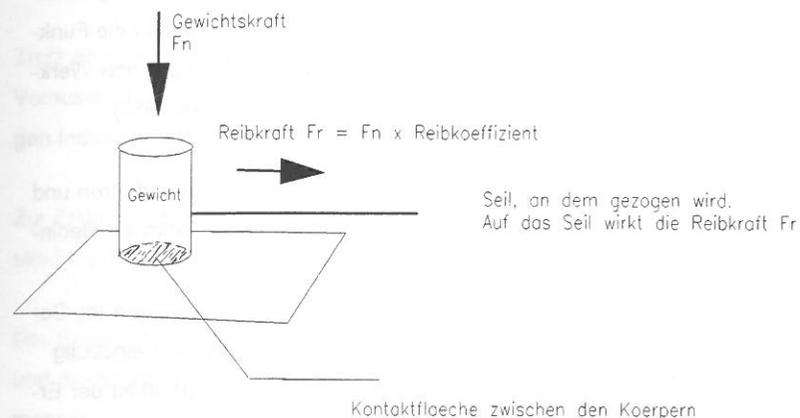


Abb. 1. Definition der Reibkraft

Abbildung (1) verdeutlicht nochmals den Begriff "Reibkraft":

Ein fester Körper drückt mit seinem Gewicht  $F(N)$  gegen einen festen Untergrund. Bewegt man diesen Körper gleichmäßig mithilfe eines Seils gegen diese Unterlage, so wirkt auf dieses Seil die Gleitreibungskraft  $F(R)$ , die man benötigt, um diesen Körper gleichmäßig fortbewegen zu können.

Auch in diesem Fall muß im Hinblick auf die Versuche darauf hingewiesen werden, daß Abgrenzungen zwischen den einzelnen Arten verschwimmen können. Wenn sich z.B. losgelöste bzw. losgebrochene Partikel zwischen Pin und Disk befinden, können - unter Umständen - sogar Rollreibungen auftreten.

## 2.3 Aussagen über In-vitro-Verschleißtests aus der tribologischen Literatur

In Industrie und Forschung werden bei der Bearbeitung von Verschleißproblemen unterschiedliche tribologische Prüfungen durchgeführt, die von Untersuchungen unter realen Bedingungen bis hin zu Modellprüfungen mit einfachsten Probekörpern reichen. Infolge der Komplexität tribologischer Vorgänge sind auch die Ziele solcher Prüfungen außerordentlich vielfältig. Hauptaufgaben der industriellen tribologischen Prüftechnik bestehen in der Bestimmung verschleißbedingter Einflüsse auf die Funktion von Maschinen, aber auch in der Vorauswahl und Qualitätskontrolle von Werkstoffen und Schmierstoffen für praktische Anwendungsfälle (CZICHOS 1986).

Die Tribophysik kennt eine nahezu unüberschaubare Vielfalt von Meßverfahren und Prüfvorrichtungen zur Simulation von Gleitverschleiß bei unterschiedlichen Bedingungen.

Insbesondere für die Dentalforschung haben In-vitro-Verschleißmessungen im Gegensatz zu In-vivo-Studien den großen Vorteil, daß Testparameter vorher eindeutig festgelegt werden können und somit die Möglichkeit der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse besteht.

Auch die Tatsache, durch Erhöhung wichtiger Testparameter (wie beispielsweise Anpreßdruck oder Relativgeschwindigkeit) die Testzeit und damit die Kosten auf ein sinnvolles Maß reduzieren zu können, darf nicht unerwähnt bleiben (ZUM GAHR 1987).

Über die bestehende Problematik der Übertragbarkeit tribologischer In-vitro-Studien auf praktische Anwendungen sind sich wohl alle Tribophysiker einig. Gründe hierfür liegen in der Schwierigkeit, In-vivo-Verschleiß genau zu quantifizieren, sowie in der Tatsache, daß ein Verschleißvorgang über eine Fülle von Parametern definiert wird, wie zum Beispiel Last, Geschwindigkeit, Temperatur, Beanspruchungsdauer sowie Art, Aussehen und individuelle Eigenschaften des jeweiligen Tribosystems.

Darüberhinaus gibt es in der Tribologie - im Gegensatz zu anderen mechanischen Testverfahren - nach wie vor keine ausreichend standardisierten Vorrichtungen für Verschleißtests, so daß Testergebnisse unterschiedlicher Forschungsgruppen,

selbst wenn ähnliche Versuchstechniken angewandt wurden, allenfalls in qualitativer Hinsicht verglichen werden können (ZUM GAHR 1987).

Probleme dieser Art werden außerdem dadurch erschwert, daß beim Gleitvorgang bestimmter Materialpaarungen mehrere Verschleißmechanismen gleichzeitig oder aber zeitlich aufeinander folgend wirken können.

Nach wie vor mangelt es also bei der Übertragung tribologischer Daten in die Praxis sowie bei der Interpretation tribologischer Meßergebnisse an ausreichend fundiertem Wissen über die grundsätzlichen Verschleißmechanismen (ZUM GAHR 1987).

Trotz aller genannten Nachteile sind tribologische Modellversuche vor allem bei der Vorauswahl neuer Materialien bzw. Werkstoffe vor deren Vermarktung in der heutigen Industrie nicht mehr wegzudenken.

Zur Erklärung des Begriffes „Tribometrie“ sei ein kurzer Blick auf die Geschichte dieses Forschungsgebietes geworfen:

Der Begriff „Tribometer“ erscheint laut HUTCHINGS (1992) erstmals im Jahre 1774 und diente als Bezeichnung für ein Instrument, mit dem es möglich war, Reibung zu messen.

HUTCHINGS (1992) unterscheidet prinzipiell zwischen 2 Typen tribologischer Gleitverschleiß-Meßverfahren:

- Solche, bei denen die aneinander reibenden Flächen symmetrisch zueinander angeordnet sind (handelt es sich um identische Werkstoffe, so werden diese auch um denselben Betrag abgerieben ( Bsp.: Ring auf Ring ).
- Anordnungen, bei denen Körper und Gegenkörper asymmetrisch zueinander angeordnet sind. (hierbei werden Körper und Gegenkörper, selbst wenn sie aus demselben Material bestehen, unterschiedlich stark abgerieben). Beispiele hierzu liefern die Pin-on-Disk- oder die Pin-on-Block-Varianten, die sogar schon dem amerikanischen nationalen Standard angehören (ASTM G 99).

Anordnungen dieser Art haben, laut HUTCHINGS (1992), den großen Vorteil, daß Parameter vom Prüfer beliebig variiert werden können.

Doch auch er weist ausdrücklich auf die Problematik der Übertragbarkeit auf die praktische Anwendung hin.

ZUM GAHR (1987) differenziert „Tribometer“ danach, ob sie einem sogen. geschlossenen oder offenen System angehören.

- **geschlossenes System:** Es soll das Verschleißverhalten beider Komponenten, also des Körpers und des Gegenkörpers untersucht werden
- **offenes System.** Es soll nur das tribologische Verhalten des festen Körpers untersucht werden.

Das „Pin-on-Disk-Tribometer“ , ebenso wie die „Pin-on-Block-Anordnung“ gehören dem geschlossenen Tribosystem an, während tribologische Sandstrahltests oder Meßverfahren, bei denen die Reibung eines Materialpins auf Schleifpapier getestet werden, zur Klasse der „offenen“ Tribometer gehören.

Obwohl im praktischen Anwendungsfall oft nicht dieselben Verschleißmechanismen vorherrschen wie im Modellversuch, dienen In-vitro-Verschleißtests in der werkstoffkundlichen Materialforschung insbesondere dazu, Verschleißdaten bestimmter Werkstoffe innerhalb kürzester Zeit zu liefern (FRIEDRICHS 1986). Das Pin-on-disk-Tribometer sieht er als ideale Testvariante zur tribologischen Vorauswahl von Materialien.

In der Tribophysik wird bei der konventionellen Pin-on-disk-Versuchsanordnung ein stationärer Probenpin meist gegen eine horizontale, sich drehende Stahlscheibe gedrückt.

Laut SUH (1986) trägt bei experimentellen Verschleißtests vor allem die Erfassung der zeitlichen Veränderung des Reibkoeffizienten sowie der Verschleißraten be-

stimmter Materialpaarungen zum Verständnis von Verschleißmechanismen bei. Die Verschleißrate kann entweder über den Gewichtsverlust der Probe und des Antagonisten, oder aber profilometrisch erfasst werden, während die beim Verschleißvorgang entstehende Reibkraft über geeignete Transducer gemessen werden kann. Als Beispiel solcher tribologischer Anordnungen nennt auch SUH (1986) die Pin-on-disk-Variante und empfiehlt, sich stets für die einfachste Version zu entscheiden. SUH (1986) betont ausdrücklich, daß der Reibkoeffizient, im Gegensatz zum Verständnis der klassischen Physik, nicht als rein materialspezifischer Wert verstanden werden darf, da er, selbst bei gleicher Materialpaarung, je nach Testanordnung und Testbedingungen variieren kann.

Die beim Gleitvorgang entstehende Reibkraft bzw. den Reibkoeffizienten versteht er als Ergebnis des Zusammenspiels folgender dreier Komponenten:

- Die **Deformationskomponente** (die Reibkraft, die durch Deformation der Rauheitsspitzen von Körper und Gegenkörper entsteht)
- Die **„Eingrab“- Komponente** (die Reibkraft, die infolge Eingrabens von entstandenen Abriebpartikeln in den Körper oder/und Gegenkörper entsteht) und
- Die **Adhäsionskomponente** (gilt vor allem für Metalle)

Es ist äußerst schwierig, den relativen Anteil dieser Komponenten beim Gleitvorgang zu bestimmen.

CZICHOS (1986) definiert die tribologische Prüftechnik anhand von Modellversuchen folgendermaßen:

„Modellversuche stellen eine grundlagenorientierte Untersuchung von Reibungs- und Verschleißprozessen mit speziellen Probekörpern unter beliebigen, aber definierten Beanspruchungen dar.“

Des weiteren geht er auf eine Reihe wichtiger Punkte ein, die bei der Durchführung jeder tribologischen Laborprüfung berücksichtigt werden sollten und weist darauf hin, bei der Darstellung der Ergebnisse tribologischer Prüfungen grundsätzlich alle relevanten meß- und prüftechnischen Parameter anzugeben.

Laut CZICHOS besteht die einfachste Durchführung einer tribologischen Prüfung darin, bei Konstanz sämtlicher Parameter lediglich Reibung und Verschleiß als Funktion der Beanspruchungsdauer zu messen und charakteristische Reibungs-Zeit oder/und Verschleiß-Zeit-Diagramme zu erstellen.

## 2.4. Übersicht über bisher in der Zahnmedizin gängige

### Verschleißtests

Das Verschleißverhalten dentaler Restaurationswerkstoffe steht schon seit geraumer Zeit im Zentrum des Interesses in der zahnmedizinischen Materialforschung.

LUTZ ET AL. (1984) gliedert die Zahnoberfläche, die den Verschleißvorgängen unterworfen ist, in zwei Teilbereiche: Er differenziert zwischen „OCA“ = occlusal contact area und „CFA“ = contact-free area.

Die Verschleißmechanismen in der okklusalen Kontaktzone werden hauptsächlich durch mechanische Kaubelastung und durch Nahrungszerkleinerung verursacht, während Verschleiß in der kontaktfreien Zone als Folge von Dreikörperabrasion durch Nahrungszerkleinerung dargestellt werden kann.

Diese Erkenntnis führte zu der Entwicklung unterschiedlicher In-vitro-Testverfahren, die okklusale Belastungen simulieren sollten.

Man kann diese in zwei wesentliche Hauptgruppen einteilen:

- Testvorrichtungen, die **Verschleiß** durch „**Zwei-Medien-Abrasion**“ simulieren, z. B.:
  - „Contact-and-sliding-wear“- Maschinen (DOUGLAS UND DE LONG 1983, KREJCI 1990, KUNZELMANN 1994) oder
  - „Pin-on-disk“-Maschinen (RICE 1982, MC KINNEY 1982, SOLTESZ 1979)
- Vorrichtungen, die **Verschleiß** durch „**Drei-Körper-Abrasion**“ simulieren,

z. B.

- Zahnbürstmaschinen (SOLTESZ 1980, SINGER 1995) und sogen.
- „Contact-free-Wear-Maschinen“ (DE GEE ET AL. 1986)

Abgesehen von der Pin-on-disk-Verschleißsimulation, deren Entwicklung zentrales Thema dieser Dissertation darstellt, soll auf die weiteren, hier erwähnten In-vitro-Tests nur kurz eingegangen werden.

**Zahnbürstsimulationen** gehören zu den ältesten Simulationsvorrichtungen (MILLER 1907) und waren ursprünglich auf die Bestimmung des Zahnbürstenabriebs von Schmelz und Dentin begrenzt. (KREJCI 1992, SINGER 1995). Beispielsweise die Anwendung von Kompositen in okklusal belasteten Bereichen (Klasse I- und II-Kavitäten) führte dazu, Zahnbürstensimulationen auch an unterschiedlichen Füllungsmaterialien vorzunehmen. Dennoch können Simulationen dieser Art lediglich zur Vorhersage des Materialverschleißes mittels Mundhygienemaßnahmen herangezogen werden, für die Simulation einer Kaubelastung sind sie jedoch ungeeignet.

Die „**Contact-Free-Wear-Maschinen**“ wie z. B. die ACTA-Maschine bestehen meist aus zwei Rädern (die Lauffläche des einen Rades trägt eine Reihe von Probenmaterialien), die mit definiertem Anpreßdruck und geringfügig unterschiedlicher Frequenz (slip) aneinander rotieren und durch Zerdrücken eines vorab bestimmten Zwischenmediums (Wasser, Hirse, etc.) die Materialproben zerquetschen.

Dieses Verfahren ist vor allem zur Simulation des Materialverschleißes durch Nahrungsbestandteile hervorragend geeignet.

„**Contact and Sliding-Wear-Maschinen**“ sind meist so aufgebaut, daß ein Antagonist (Schmelz, Aluminiumoxid) mit definierter Kraft auf eine Materialprobe oder einen mit bestimmtem Füllungsmaterial versehenen Prüfkörper aufstößt (sogen. „Impact“). Sowohl die Kraft beim Aufsetzen als auch deren Häufigkeit können variiert werden. Eine nachfolgende Translationsbewegung kann entweder über das Elastizitätsmodul eines eingebauten Gummipuffers, das in einem bestimmten Winkel zu den Proben angebracht ist, erzeugt werden, wie beim Kausimulator von KREJCI ET AL. (1990) oder aber über eine eingebaute Servohydraulik wie beim „artificial mouth“ von

DOUGLAS ET DE LONG (1983). Der Münchner Kausimulator (KUNZELMANN ET AL. 1993) kann beide Arten simulieren.

Pin-on-Disk-Simulationsvorrichtungen seien im Folgenden näher erläutert:

## **2.5 Pin-on-disk-Simulationsvorrichtungen in der Zahnmedizin**

Seit über zwei Jahrzehnten werden in der Zahnmedizin immer wieder sogenannte Pin-on-Disk-Tribometer unterschiedlichster Bauart zur Bestimmung des 2-Medien-Abriebverhaltens von Füllungsmaterialien verwendet.

Hauptziel der Messungen besteht nach wie vor darin, ablaufende Verschleißmechanismen zu untersuchen oder gar klinische Verschleiß-Vorhersagen über noch nicht im Handel befindliche, zahnärztliche Werkstoffe treffen zu können.

Die einfachste Variante einer Pin-on-Disk-Simulation läßt einen Probenpin mit definierter Kraft gegen eine Siliziumcarbidscheibe bestimmter Rauigkeit schleifen. Ergebnisse von POWERS ET AL. (1974), der dieses Testverfahren anwendete, zeigten jedoch keinerlei Unterschiede in der Verschleißfestigkeit von Amalgam und konventionellen Kompositen.

Aufgrund fehlender Übereinstimmung mit klinischen Beobachtungen trat diese Variante daher wieder in den Hintergrund.

Die bisherigen in der Zahnmedizin geläufigen Pin-on-disk-Maschinen sind in ihrem Grundprinzip weitestgehend ähnlich aufgebaut.

In aller Regel drückt ein Pin mit definierter Kraft gleichmäßig gegen eine mit Probenmaterial versehene, sich drehende Scheibe.

Der Pin wird als abradierende Komponente, die Probenscheibe als diejenige Komponente, die abradiert wird und deren Verschleißrate interessiert, bezeichnet. Die Rotation der Scheibe erfolgt stets in eine Richtung. Die meisten Versuchsanordnungen gestatteten es, Parameter wie Testlaufdauer (Anzahl der Zyklen), Anpreßdruck (definierte Gewichte), Relativgeschwindigkeit (Umdrehungszahl der Probenscheibe) oder Temperatur variabel zu gestalten.

Bei der Ergebnisauswertung kamen verschiedenste Methoden zur Anwendung. Es wurden Pin-on-disk-Maschinen konzipiert, bei denen die Tiefe der Abriebspur regelmäßig mittels eines linearen Wegaufnehmers (LVDT = linear variable differential transducer) abgemessen werden konnte (BAILEY 1981, RICE 1981). Ein weiterer Verbesserungsschritt bestand darin, daß die Testvorrichtung automatisch zu regelmäßigen Zeitintervallen stoppte und die Spurentiefe aufgezeichnet wurde (MC KINNEY 1982). In aller Regel folgte eine Umrechnung in „Verschleißraten“, indem die zu bestimmten Intervallen gemessenen Spurentiefen in Bezug zur Zeit gesetzt wurden. (WILLIAM 1981, RICE 1982 und 1981, BAILEY 1981, MC KINNEY 1982, 1986, 1987 und 1988). Die Schwierigkeit solcher Messungen liegt in dem entstehenden unregelmäßigen Profil der Reibflächen. Eine präzise Reposition von Probe und Pin ist problematisch (Abb. 1a).

Bei SWARTZ (1985) und SOLTESZ (1979) diente der „Volumenverlust“, berechenbar aus der Tiefe und Breite der Spur, als Maß für die Verschleißfestigkeit.

Meist wurden rasterelektronenmikroskopische Analysen zur morphologischen Auswertung der Ergebnisse herangezogen (MC KINNEY 1987 und 1988, RICE 1984, MÜLLER 1985, BAILEY 1981).

MC KINNEY und WU nutzten 1982 die sogen. „Mikrodefektanalyse“ zur Bestimmung des Schadensausmaßes unterhalb der Materialoberfläche nach Ermüdungsver-schleiß. Durch Einlegen der Probe in eine Silbernitratlösung konnte die Schadensakkumulation sichtbar gemacht werden.

Die meisten Pin-on-disk-Maschinen basierten auf einer von POWELL (1972) konzipierten Anordnung. Powell begründete die Wahl von natürlichem Schmelz als Antagonisten damit, daß in einer klinischen Studie überwiegend Schmelz als Antagonist zu Füllungen beobachtet wurde (PHILLIPS ET AL. 1971). Zunächst wählte er eine sogen. Pin-on-Block-Variante, mit der sowohl Gleitbewegungen, als auch Impulsbelastungen simuliert werden konnten. Nachdem sich in Vorversuchen jedoch herausstellte, daß durch die Impulsbelastung (21 Mpa, 250000 Zyklen) für Amalgam oder Komposite kein Substanzverlust festzustellen war, änderte er 1975 seinen Weg in Richtung oszillierende Pin-on-block-Apparatur.

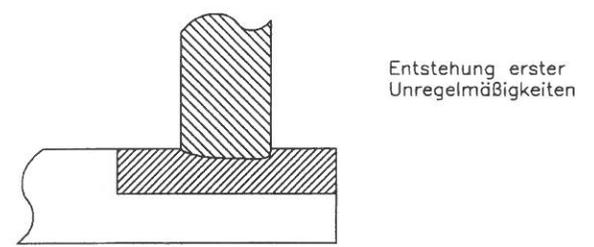
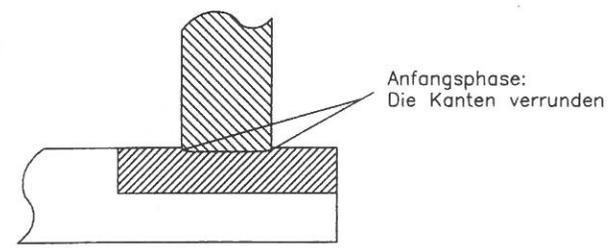
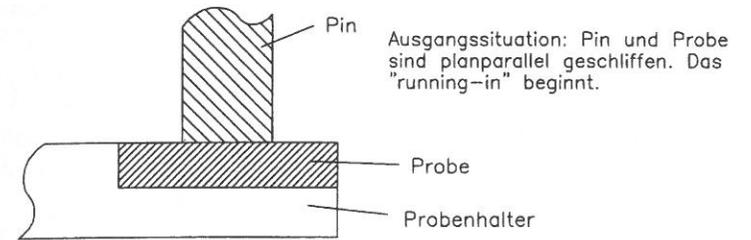


Abb. 1a Entstehung eines Abriebprofils beim Pin-on-disk-Versuch

FEINPRUEF PERTHEN  
GMBH  
D-3400 GOETTINGEN  
PERTHOMETER S3P

OBJ.: Dat 004  
NR.: Dyract 720  
NAME:  
DAT.: 03.04.96

MESSUNG 3  
T8 FRW-750 750 CAL  
LT 5.600 MM  
LM 4.000 MM  
UB 2500 YM

LC GS 0.800 MM  
RA 7.3 YM  
RZ 50.7 YM  
RMAX 130.5 YM

D PROFIL POS  
UER 100.0 YM  
HOR 500.0 YM

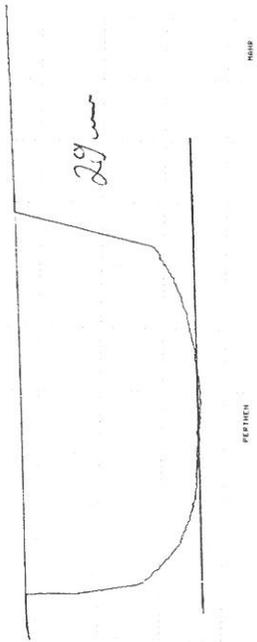


Abb. 1b Abriebsprofil eines 3mm-Pins (links) im Vergleich zu einer Kugel (rechts).

15 b

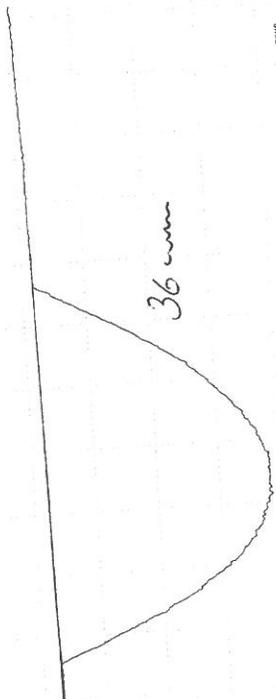
FEINPRUEF PERTHEN  
GMBH  
D-3400 GOETTINGEN  
PERTHOMETER S3P

Obj.: Dyract / Kugel  
NR.: table 056 pcx  
NAME:  
DAT.: 02.04.96

232933 Zylinder  
MESSUNG 5  
T8 FRW-750 750 CAL  
LT 5.600 MM  
LM 4.000 MM  
UB 2500 YM

LC GS 0.800 MM  
RA 3.1 YM  
RZ 12.1 YM  
RMAX 23.5 YM

D PROFIL POS  
UER 100.0 YM  
HOR 500.0 YM



FEINPRUEF PERTHEN  
GMBH  
D-3400 GOETTINGEN  
PERTHOMETER S3P

Obj.: Dyract 026  
NR.: Heliomolar / Dyr 3  
NAME: table 052 pcx  
DAT.: 02.04.96

251857 Zylinder  
MESSUNG 2  
T8 FRW-750 750 CAL  
LT 5.600 MM  
LM 4.000 MM  
UB 2500 YM

LC GS 0.800 MM  
RA 1.1 YM  
RZ 5.5 YM  
RMAX 8.9 YM

D PROFIL POS  
UER 50.00 YM  
HOR 500.0 YM

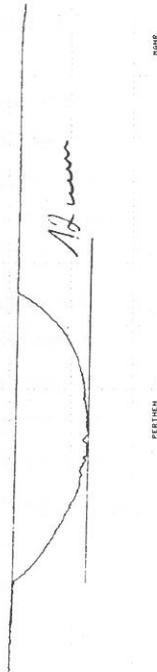


Abb./1c Abriebsprofile verschiedener Pindurchmesser (3mm, 2mm, 1mm) am Beispiel Heliomolar RO nach 8 Stunden Versuchszeit und 25N Belastung.

15 c

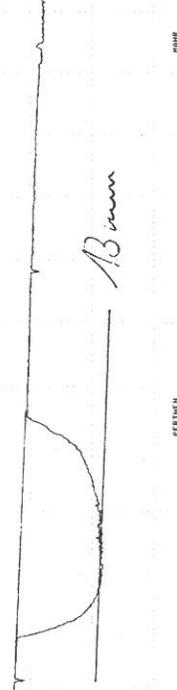
FEINPRUEF PERTHEN  
GMBH  
D-3400 GOETTINGEN  
PERTHOMETER S3P

Obj.: Heliomolar / Dyr 2mm  
NR.:  
NAME: table 050 pcx  
DAT.: 02.04.96

Dat 024  
MESSUNG 27  
T8 FRW-750 750 CAL  
LT 5.600 MM  
LM 4.000 MM  
UB 2500 YM

LC GS 0.800 MM  
RA 1.1 YM  
RZ 7.3 YM  
RMAX 16.3 YM

D PROFIL POS  
UER 50.00 YM  
HOR 500.0 YM



FEINPRUEF PERTHEN  
GMBH  
D-3400 GOETTINGEN  
PERTHOMETER S3P

Obj.:  
NR.:  
NAME:  
DAT.: 02.04.96

table 051 pcx  
MESSUNG 4  
T8 FRW-750 750 CAL  
LT 5.600 MM  
LM 4.000 MM  
UB 2500 YM

LC GS 0.800 MM  
RA 1.8 YM  
RZ 14.3 YM  
RMAX 33.1 YM

D PROFIL POS  
UER 50.00 YM  
HOR 500.0 YM



Auf der Grundlage dieser Erfahrungen entwickelte er schließlich eine Pin-on-disk-Maschine, mit der er klinisch relevante Ergebnisse, d. h. größere Verschleißfestigkeit von Amalgam im Gegensatz zu Kompositen, erzielte (POWELL und DICKSON 1975).

Die Arbeitsgruppen BAILEY (1981) und RICE (1981) begründeten die Wahl einer Pin-on-disk-Maschine zur Verschleißsimulation damit, daß eine Nachbildung des physiologischen Kauprozesses erst dann Sinn haben könne, wenn die zahlreichen einstellbaren Parameter hinsichtlich ihrer Bedeutung für den Materialverschleiß untersucht und verstanden worden sind.

Die von BAILEY (1981) und RICE (1981) gewählte Pin-on-disk-Versuchsanordnung besteht aus 5 Prüfständen. Den Gegenkörper stellt ein mit Hohlbohrern gewonnener Schmelzpin mit 1,5 mm Durchmesser, einer Länge von 3 mm und einer Oberflächenrauhtiefe von 1 µm dar. Die sich auf der Scheibe befindlichen Materialproben wurden ebenfalls mit SiC-Schleifpapieren und einer Diamantpolierpaste auf eine Oberflächenrauhtiefe von 1 µm bearbeitet.

Der Spurenradius der Probe wird mit 6,25 mm angegeben, sämtliche Versuche wurden unter fließendem Wasser bei 37°C durchgeführt, um einen regelmäßigen Abtransport von Schleifpartikeln aus der Abriebspur zu gewährleisten. Die Testlaufdauer betrug 18 - 24 Stunden, dies entsprach ca. 42.000 - 46.000 Umlaufzyklen.

Die Variation des nominalen Anpreßdrucks eines Schmelzpins gegen ein konventionelles Komposit von 10,4 MPa auf 14 MPa, also innerhalb des Bereiches des physiologischen Kaudruckes, führte zu einem plötzlichen Anstieg der Verschleißrate des Komposites auf den 1000-fachen Wert. BAILEY ET AL. (1981) kamen demzufolge zu der bedeutsamen Erkenntnis, daß die Verschleißrate eines Werkstoffs in hohem Maße von der jeweiligen Flächenpressung abhängt. Für Amalgam hingegen konnte der plötzliche massive Anstieg der Verschleißrate nicht beobachtet werden.

Auch eine Erhöhung der Umlauffrequenz schien keinen signifikanten Einfluß auf die jeweilige Verschleißrate auszuüben.

Pin-on-disk-Versuche, bei denen die Rauhtiefe der Probe von 240 Grit auf 400 Grit bei konstanter Geschwindigkeit und Flächenpressung variiert wurden, zeigten auf, daß, aufgrund des rapide verlaufenden Einschleifvorgangs, die initiale Rauhtiefe bei

2-Medien-Abrasionstests ohne Einfluß auf die Verschleißrate ist (BAILEY ET AL. 1981).

Aufgrund der biologischen Variationsbreite von Schmelz, die die Testergebnisse beeinflussen kann, suchte man nach einem adäquaten Ersatz als Standardantagonisten.

Hierfür untersuchten RICE ET AL. (1984) den Einfluß unterschiedlicher Pinmaterialien auf das Abriebverhalten konventioneller Komposite. Dabei kamen Schmelzpins, Pins aus gesintertem Aluminiumoxid und Magnesiumpins zur Verwendung. RICE ET AL. (1984) stellten fest, daß die Verschleißraten von Schmelz- und Aluminiumoxidpins mit konventionellen Kompositen signifikant korrelierten. Es muß jedoch hinzugefügt werden, daß dabei die Schmelzpins 3 x mehr Abrieb zeigten als die Keramikpins. Mittels rasterelektronenmikroskopischer Bilder konnten außerdem morphologisch ähnliche Abriebspuren nachgewiesen werden.

RICE ET AL. berichteten 1982 von signifikanten Unterschieden in der Verschleißrate bei der Kombination Schmelzpin / konventionelles Komposit bei einer Belastung von 10 MPa. Sogar die Variation der Schmelzpinlänge von 1 mm auf 4 mm führte zu noch größeren Unterschieden der Ergebnisse bezüglich Abriebfestigkeit, wobei die Durchschnittswerte konstant blieben. Diese Variationen an unterschiedlichen Proben könnten aber auch maschinenbedingt verursacht worden sein oder an biologischen Unterschieden in der Zusammensetzung der Schmelzpins gelegen haben.

Schon BURWELL UND STRANG (1952) wiesen darauf hin, daß Gleitverschleiß-Tests auf eine Reihe von Variablen extrem empfindlich reagieren würden. Auch ein minimales Verkanten des Pins auf der Probe hätte die Verschleißrate merklich erhöhen können.

Die Arbeitsgruppen MC KINNEY (1982) UND WU (1982) verwendeten für ihre Verschleißsimulationstests eine 3-Stationen Pin-on-disk-Apparatur. Im Wesentlichen jedoch wurden Versuchsaufbau und Belastungsparameter von BAILEY (1981) übernommen.

Neben Schmelz-, Durapatit- und Saphirpins verwendete MC KINNEY (1982) Stahlpins und beobachtete über eine Testlaufdauer von 127000 Zyklen einen Wechsel des Verschleißmechanismus, der auch morphologisch mittels Silbernitratanfärbung als Schadensakkumulation unterhalb der Oberfläche sichtbar gemacht werden konnte. Dieses Phänomen interpretierte man als sogen. Ermüdungverschleiß.

Die Tatsache, daß BAILEY (1981) dieses Phänomen nur unter einer Versuchsbedingung von 15 MPa Last beobachtete, führte MC KINNEY (1982) auf seine höhere Zyklenzahl sowie die Verwendung eines Stahlantagonisten zurück.

Er favorisierte deshalb aufgrund des Zeitraffereffekts dessen Verwendung bei all seinen weiteren Versuchsreihen.

In weiteren Versuchen konzentrierten sich die Arbeitsgruppen MC KINNEY (1982) und WU (1982) auf den Einfluß organischer Lösungsmittel (überwiegend Verdünnungsreihen von Äthanol) auf den Verschleiß von Kompositen und kamen dabei zu der Erkenntnis, daß die Verschleißraten, ähnlich wie die Knoop-Härteprofile, durch die „food-simulating-liquids“ negativ beeinflusst werden.

Es folgten weitere Pin-on-disk-Versuchsserien der Arbeitsgruppe MC KINNEY (1987 und 1988), in denen man sich auf den Vergleich der Verschleißfestigkeit unterschiedlicher Glasionomermzemente konzentrierte. Dabei zeigten sich initial hohe Verschleißraten, die allmählich auf einen konstanten Wert absanken.

MÜLLER ET AL. (1985) führten, ebenfalls mittels einer Pin-on-disk-Anordnung, vergleichende Untersuchungen der Verschleißfestigkeit unterschiedlicher Amalgame durch. Dabei konnten sie, neben dem bereits bekannten adhäsiven Verschleißmuster, Ermüdungverschleiß an verschiedenen Legierungen nachweisen. Rasterelektronenmikroskopische Analysen zeigten, daß die Ermüdungsrisse in der Amalgammatrix verliefen.

LUTZ ET AL. (1984) fanden heraus, daß die Verschleißraten von Durapatitpins gegen Mikrofüller-Komposite mit klinischen Beobachtungen korrelierten. Keine Korrelation zeigte sich dagegen bei chemisch härtenden Hybridkompositen, vermutlich deshalb, weil der Pin größere Füllpartikel „herausschlug“, was zu plötzlichem, unproportional hohem Substanzverlust führte.

SWARTZ, PHILLIPS ET AL. (1985) führten Pin-on-disk-Untersuchungen über die Auswirkung der Füllkörpergröße sowie des Füllgehalts auf die Verschleißfestigkeit von Kompositen durch. Als Antagonist dienten Pins aus synthetischem Hydroxylapatit. Aus der durchschnittlichen Tiefe und Breite der Spur wurde der Volumenverlust der einzelnen Proben ermittelt. Dabei zeigten ungefüllte im Gegensatz zu gefüllten Kompositen mehr Abrieb. Innerhalb der Gruppe der gefüllten Komposite bedeutete ein höherer Füllgehalt eine Verringerung des Abriebs, während die Größe der einzelnen Füllkörper sich positiv auf die Verschleißfestigkeit auswirkte.

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß die genaue Kenntnis des Aufbaus der Versuchsanordnung, der entscheidenden Versuchsparameter sowie das jeweilige Auswerteverfahren für die Interpretation der Ergebnisse, aber auch für den Vergleich aller bisherigen Pin-on-disk-Versuchsergebnisse untereinander von entscheidender Bedeutung ist. Im Folgenden werden bisherige In-vitro-Pin-on-disk-Simulationsapparaturen tabellarisch zusammengefaßt (Tabellen 2.1 - 2.5).

AUTOR/ JAHR/ THEMA	PROBE (DISK)	ANTAGONIST (PIN)	PARAMETER	TEST- DAUER	AUSWERTUNG	ERGEBNISSE
Powell, Dickson 1975 In-vitro Verschleiß- tests	Komposit, Amalgam	Schmelzpin, Durchm. 2 mm	Druck 10 MPa v = 1,5-4,5 cm/sec T = 37°C	24 h	Regelmäßige (alle 20 Min.) Spurentiefenver- messung mittels LVDT (Wegaufnehmer)	Verschleißrate konv. Komposite (Adaptic) 1,5-2 Mal höher als von Amalgam (Velvalloy)
William, Bailey, Rice, 1981 Verschleißverhalten Amalgam/Komposit bei Variation der Flächenpressung (5-Stationen-POD)	Komposit, Amalgam	Schmelzpin, Durchm. 1,5 mm, Länge 1,5-3,5 mm, Rauigkeit 1 µm	Variation Druck: 10/11/12/13/14 MPa, v = 2,06 cm/sec, T = 37°C, Medium aqua dest.	24 h	Regelmäßiges Vermessen der Spurentiefe u. Umrechnung in „Verschleißraten“ (µm/h)	Ein Vergleich der Verschleißraten Amalgam/Komp. hängt von den jeweiligen Flächenpressungen ab. In Bereichen des physiol. Kaudrucks Amalgam- Verschleiß konstant; jed. bei Komp. bei 14 MPa plötzlich Verschleißanstieg auf 1000-fachen Wert.
Bailey, Rice, Albert, 1981 Verschleißverhalten Amalgam/Komposit bei Variation von Flächenpressung, Gleitgeschwindigkeit und Oberflächen- bearbeitung. (5-Stationen-POD)	Konventionelle Komposite, 600 Grit, vor Testbeginn Lagerung für eine Woche in aqua dest.	Schmelzpin, Durchm. 1,5 mm, Länge 1,5-3,5 mm, Rauigk. 1 µm	Druckvariation: 10,4/ 11,2/ 14 MPa, Var. Rauigk.: 240, 400 Grit Variation Geschw.: 1,6/ 2,06 cm/sec, T = 37°C, aqua dest. Medium Spurenradius 6,25 mm	18 - 24 h (bei Oberflächen- zerstörung weniger)	Regelmäßiges (alle 10-20 Min) Vermessen d. Spurentiefe mittels Wegaufnehmer, Umrechnung in „Verschleißraten“ (µm/h), REM-Analysen	Initiale Rauigkeit ohne Einfluß auf Verschleiß, kein signifk. Einfluß auf Verschleiß bei Variation der Gleitgeschwindigkeit, Druck beeinflusst Abrieb in hohem Maße, bei 14 MPa bereits nach 0,5 h Oberfl. zerstört u. plötzlicher Verschleißanstieg auf Vierfaches.

Tab. 2.1 In-Vitro-POD-Simulationen in der Zahnmedizin

20

AUTOR/ JAHR/ THEMA	PROBE (DISK)	ANTAGONIST (PIN)	PARAMETER	TESTDAUER	AUSWERTUNG	ERGEBNISSE
Rice, Bailey, Pacelli, Blanc 1982 Einfluß unterschiedlicher Pinlängen auf Verschleißverhalten bei Kompositen	konventionelle Kom- posite, 600 Grit, vor Testung Lagerung 1 Woche in aqua dest. bei 37°C	Schmelz, Durchm. 1,5 mm Rauigk. 1 µm	Druck 10 Mpa, v = 2 cm/sec, Spurenradius 6,2 cm, Variation Pinlänge 1/ 2/ 3 mm	6 - 24 h, (11500- 46000 Zykl.)	Vermessen der Spurentiefe alle 20 Min. und Umrechnung in Verschleißraten (µm/h), REM-Analysen	stark differierende Verschleißraten (0,26-1,72 µm/h) und Morphologie bei Variation d. Pinlängen, durchschnittliche Verschleißrate jedoch annähernd gleichbleibend
Rice 1984, Vergleichende Untersuchung des Abriebverhaltens untersch. Komposite	1. Lichthärtende Mikrofüllerkomp., 2. Selbsthärtende Mikrofüllerkomp., 3. Konventionelle Komposite	Aluminiumpin, Durchm. 3 mm	Druck = 9 Mpa, v = 2,06 cm/sec, T = 37°C, Medium aqua dest.	46000- 68000 Zyklen	s.o.	Verschleißraten i. Vergl.: Lichthärtende Mikrofüller < Selbsthärtende Mikro- füller < Konventionelle Komposite
Rice, Bailey, Roto, Wayne 1984 Einfluß unterschiedl. Pinmaterialien auf Abriebverhalten von Kompositen	Konventionelle Komposite, 600 Grit, vor Testung Lagerung in aqua dest. 1 Woche lang bei 37°C	Pins aus Schmelz, gesintertem Aluminiumoxid u. Magnesiumfluo- rid, Durchm. 1,5 mm Länge 3 mm	Druck 10 Mpa, v = 2 cm/sec, T = 37°C, konst. Wasser- fluß	22 - 24 h, (42000- 46000 Zyklen)	alle 30 Min. Vermessung d. Höhenverlusts von Pin und Disk, Um- rechnung in Verschleißrate (µm/h), Morphologie d. Abriebspuren im REM	Quantitativ und qualitativ analoges Abriebverhalten bei Verwendung von Schmelz- und Aluminiumoxidpins gegen Komposite, jedoch wird Schmelzpin 3- mal mehr abgerieben als Aluminiumoxidpin.
Soltész, Klaiber, Pergande, Richter 1979 Vergleich Verschleißfestigkeit Komposit/Amalgam	Komposit-/Amalgam- pins, Durchm. 4 mm, Höhe 7,8 mm, vor Testung Lagerung in aqua dest. bei 37°C	Keramik- Schleifscheibe (umgekehrter Versuchsauf- bau)	Druck 8,2 Mpa, v = 13,25 cm/sec., Medium aqua dest.	2000 Zyklen	Regelmäßig alle 500 Zyklen Wiegen u. Vermessen d. Proben, Umrech- nung in Volumen- verlust	Amalgam abrasionsstabiler als Komposite, Größe der Füller ohne Einfluß auf Abriebfestigkeit, aber die Art der Füller (Quarz > Ba- glas > Li-Al-Silikat)

Tab. 2.2 In-Vitro-POD-Simulationen in der Zahnmedizin

21

AUTOR/ JAHR/ THEMA	PROBE (DISK)	ANTAGONIST (PIN)	PARAMETER	TESTDAUER	AUSWERTUNG	ERGEBNISSE
Mc Kinney, Wu 1982 in-vitro-Studie über Beziehung zw. Materialermüdung u. Verschleiß bei Kompositen (3-Stationen-POD)	Quarzgefüllte Komposite in BIS-GMA- Matrix, 600 Grit, vor Testung La- gerung 1 Tag lang in aqua dest. bei 37°C	Variabie Pins aus Stahl, Schmelz und Durapatit, Durchm. 2 mm	Variation Druck 2,5/ 5/ 12,5/ 15/ 20 Mpa, v = 27 U/Min., T = 37 °C, Radius Spur 12 mm, konstanter Wasserfluß	variabel (1550-127000 Zyklen)	stündlich (alle 1550 Zyklen) Vermessen d. Spurentiefe an 10 Positionen, Mikrodefektanaly- se zur Sichtbarmachung d. Schadensakkumulation unterhalb d. Oberfläche.	Verschleiß prop. zum Druck, plötzliche (sekundäre) Erhöhung d. Verschleißraten nach längerer Testzeit weisen auf Materialermüdung hin (Schadensakkumulation), mehr Druck (10-15 Mpa) läßt diesen Zustand schneller erreichen. Autor rät Verwendung v. Stahlpins, da Ermüdung schneller sichtbar
Mc Kinney, Wu 1986 Einfluß organischer Lösungsmittel (Heptan Äthanole) auf Verschleiß bei Kompositen	Komposite unterschiedl. Füllart, Korngröße 0,05 µm, Disk 2,5 x 18mm, vor Testung Lagerung 1 Woche lang in entspr. Medien	Stahlpins, Durchm. 2 mm	Druck 10 Mpa, v = 27 U/Min., Spurenradius 6 mm	10000 Zyklen	stündliches Vermessen d. Spurentiefe an 10 Stellen, -> Mittelwert und Umrechnung in Verschleißraten (µm)	bei nicht vorbehandelten Kompositen bleibt Verschleißrate konstant, Verschleißraten werden durch „food-simulating- liquids“ negativ beein- flußt. Initial hohe Ver- schleißrate geht über in „steady-state“-Verschleiß, Knicke in Verschleiß/Zeit- Kurve deuten auf Materialermüdung hin.
Mc Kinney et al. 1987 Verschleißfestigkeit unterschiedlicher Glasionomere	untersch. GlZ, 600 Grit, Durchm. Disk 18 mm	Stahlpins, Durchm. 2 mm	Druck 10 Mpa, v = 27 U/Min., Radius d. Spur 6 mm	30 h	stündl. Vermessen d. Spurentiefe an 10 Pos. mittels Wegaufnehmer, REM-Analyse	initial hohe Verschleißrate, die allmählich auf konstanten Wert absinkt

Tab 2.3 In-Vitro POD-Simulationen in der Zahnmedizin

22

AUTOR/ JAHR/ THEMA	PROBE (DISK)	ANTAGONIST (PIN)	PARAMETER	TESTDAUER	AUSWERTUNG	ERGEBNISSE
Mc Kinney, Antonucci, Rupp 1988 Zusatz von Silber- Glasfüllern bei Glasionomeren und Auswirkungen auf chemische Stabilität, Sprödhheit u, Verschleißfestigkeit	Ketac-silver, 600 Grit, Durchm. Disk 18 mm, vor Testung Lagerung 1 Woche lang in Wasser, Heptan u. Milchsäure bei 37°C	Stahlpins, Durchm. 2 mm	Druck 10 Mpa, v = 27 U/Min., Spurenradius 6 mm	30 h	Spurentiefenver- messung stündlich an 10 Positionen, REM-Analyse	Zu Beginn hoher Ver- schleiß, der allmählich auf konstanten steady- state-Wert absinkt. Demnach wird der erste Wert zur Berechnung der steady-state- Verschleißfestigkeit erst nach 5 h Versuchszeit herangezogen
Swartz, Phillips et al. 1985 Auswirkungen von Füllkörpergröße u. Füllgehalt auf Ver- schleißfestigkeit von Kompositen	Komposite mit Füllkörpergrö- ße (2/ 15 µm) u. Füllgehalt (20-65 Vol-%), 400 Grit, Disk-Durchm. 15 mm, vor Testung Lagerung f. 1 Woche in H2O	Pins aus synthet. Hydroxylapatit, Durchm. 2 mm	Druck 9,55 Mpa, v = 85 U/Min., T = 37 °C, konstanter Wasserstrom	5000 Zyklen	Berechnung des „Volumenverlusts“ aus der durchschnittlichen Tiefe und Breite der Spur	Mehr Abrieb bei ungefüllten Kompositen im Gegensatz zu gefüllten Kompositen. Für gefüllte Komp. gilt: je höher der Füllgrad, destomehr Verschleiß, je größer die einzelnen Füller, desto weniger Abrieb.
St. Germain, Swartz et al. 1985 Einfluß des Füllgehalts auf Verschleißfestigk. bei Mikrogefüllten Kompositen	unterschiedl. Füllgehalts, 400 Grit	Pins aus synthet. Hydroxylapatit, Durchm. 2 mm	Druck 10 Mpa, v = 85 U/Min. für erste 5000 Zykl. (running-in), für weitere 20000 Zyklen v = 185 U/Min.	25000 Zyklen	Berechnung des „Volumenverlusts“ aus der durchschnittlichen Tiefe und Breite der Spur	bei Mikrogefüllten Kompositen nimmt Verschleißrate mit steigendem Füllkörpergehalt zu

Tab. 2.4 In-Vitro-POD-Simulationen in der Zahnmedizin

23

AUTOR/ JAHR/ THEMA	PROBE (DISK)	ANTAGONIST (PIN)	PARAMETER	TESTDAUER	AUSWERTUNG	ERGEBNISSE
Lutz et al. 1984 Vergleich der 2-Medien- Abriebfestigkeit unterschiedlicher Füllwerkstoffe	1) Amalgam 2) Mikrofüller mit splitterförm. Vorpolymeri- saten, 3) Mikrofüller mit kugelförm. Vorpolymeri- saten, 4) Homogene Mikrofüller, chem. härtend, 5) Hybridkomp.	Durapatitpin, Durchm. 1,8 mm	Druck 10 Mpa, $v = 2,06 \text{ cm/sec.}$ , Medium aqua dest.	46000 Zyklen	ohne Angabe	Verschleißfraten: $1 < 2 < 3 < 4 < 5$ korrelieren mit klinischen Beobach- tungen
Müller, Mahendra et al. 1985 Vergleich der Abriebfestigkeit unterschiedlicher Amalgame	Amalgamdisk, Durchm. 16 mm, Dicke 4 mm, vor Testung Lagerung in Wasser bei 37°C 1 Woche lang	Schmelzpins, Durchm. 3 mm, Länge 10-15 mm	Druck 10 Mpa, $v = 300 \text{ U/Min.}$ , Raumtemperatur, konstanter aqua- dest.-Fluß	400000 Zyklen	Profilometrie, REM-Analyse	Nachweis von Ermüdungsversleiß, Ermüdungsrisse in Amalgammatrix

Tab. 2.5 In-Vitro-POD-Simulationen in der Zahnmedizin

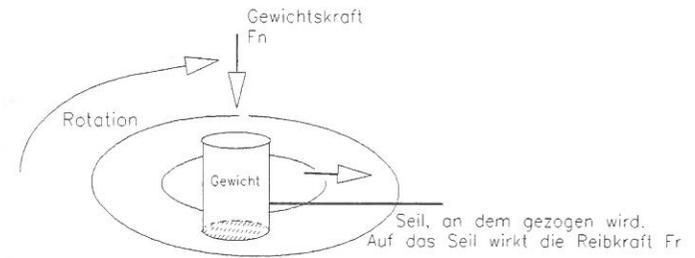
24

### 3 Material und Methode

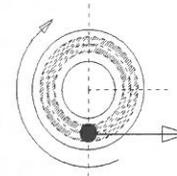
#### 3.1 Systematische Entwicklung der Pin-on-Disk-Maschine:

##### 3.1.1 Grundlegendes Funktionsprinzip:

Anhand Abbildung 2 läßt sich zunächst das Grundprinzip der Pin-on-disk-Maschine leicht erklären :



##### Pin-on-Disk:



Die Probe wird nicht auf dem Untergrund gezogen, sondern der Untergrund wird unter der Probe weggezogen. Die Reibkraft, die auf das Seil wirkt, bleibt gleich. Um den Reibvorgang beliebig lang aufrecht erhalten zu können, wählt man als Untergrund eine rotierende Scheibe. Verwendet man einen ausreichenden Radius, so ist die Wirkung so, als ob eine unendlich lange Gerade darunter hinweggleiten würde. Die Gerade verläuft als Tangente an die Scheibe. Dies ist die Kräfteichtung der Reibkraft an der Kontaktfläche. In dieser Richtung wird die Kraft gemessen.

Abb. 2 Grundprinzip der Pin-on-disk-Maschine

Ein fester Körper drückt mit seinem Gewicht  $F(N)$  gegen eine Probenscheibe. Dreht sich diese Scheibe, während man den Gewichtskörper mittels z.B. eines Seils in seiner Position hält, so wirkt auf das Seil die Gleitreibungskraft  $F(R)$ .

Das Wirkungsprinzip der Pin-on-disk-Maschine ist anhand dieser Skizze bereits in vereinfachter Form veranschaulicht. Man verwendet als Untergrund eine sich drehende Scheibe, um damit eine zeitlich beliebig lange gestaltbaren Reibvorgang erzeugen zu können.

25

Wählt man den Radius dieser Scheibe ausreichend groß, so ist die Wirkung so, als ob eine unendlich lange Gerade unter der Probe hinweggleiten würde. Diese gedachte Gerade verläuft tangential zur Scheibe und beschreibt die Richtung der Kraft, die gemessen wird (Wirkungslinie).

In dieser zahnmedizinischen Anwendung dient die Scheibe als Material-Probekörper und ein Antagonistenpin definierten Durchmessers als Zylinderkörper. Dieser wird über eine Vorrichtung mit Kraft beaufschlagt.

Der Antagonist sollte aus einem Werkstoff bestehen, der sich durch wesentlich höhere Härte im Gegensatz zu den verwendeten Probenmaterialien auszeichnet. Nur dann kann davon ausgegangen werden, daß sich der Pin während des Reibvorgangs nur unwesentlich ändert. Abrasive Prozesse (2-Medien-Abrasion) stellen dabei den dominierenden Verschleißmechanismus dar (CZICHOS 1992).

Definitionsgemäß tritt abrasiver Verschleiß dann auf, wenn der Gegenkörper beträchtlich härter ist, als der tribologisch beanspruchte Grundkörper.

Relativbewegung der Beanspruchungspartner führt schließlich zu Materialabtrennprozessen.

### **3.1.2 Aufbau der Münchner Pin-on-disk-Maschine**

Um Verständnisschwierigkeiten bei der folgenden eingehenden technischen Beschreibung der Apparatur sowie deren Entwicklung zu vermeiden, werden vorab die wesentlichen Komponenten der Maschine anhand einer Zeichnung (Abb.3) aufgezeigt.

Die Münchner Pin-on-disk-Maschine setzt sich aus folgenden technischen Bestandteilen zusammen.

- Eine rotierende, mittels eines Motors angetriebene Scheibe, versehen mit Probenmaterial.
- Senkrecht dazu drückt ein Pin mit definiertem Gewicht auf die Scheibe. (= Normalkraft)

- Die erzeugte Reibkraft wird direkt von einem Übertragungsarm "aufgefangen" und auf eine Kraftmeßdose übertragen (Druckmeßdose).
- Gleichzeitig wird mittels eines Wegsensors gemessen, wie weit sich der Antagonist in die Probe „hineingegraben“ hat.

Die sich ergebenden Reibkraft- und Längenwerte werden direkt und gleichzeitig einem PC mit implementierter Auswerteelektronik und Spezialsoftware zugeführt, der ein Kraft/Zeit- sowie ein Weg/Zeitdiagramm zur selben Zeit erstellt.

(Kraftmeßdose 50 N, Linearitätsfehler 2%, Analogmessung 0 - 10V Ausgang, Auflösung 10mV / 0.05N, 12-Bit-A/D-Wandler Althen, München / Inkrementaler Wegaufnehmer MS 30, Auflösung 2 µm, Elko Electronics, Weilheim / Analogkarte ME 26, 16 BIT Meilhaus, Puchheim).

### **3.1.3 Technische Einzelheiten der Münchner Pin-on-Disk-Maschine**

Ein unter der Scheibe (Disk) befestigter Antriebsmotor (Scheibenläufermotor mit tachometergesteuerter Drehzahlregelung, Drehmoment 30 Ncm, Riemenradgetriebeuntersetzung 1:5, Mattke, Freiburg) dreht die Probe mit gleichmäßiger Geschwindigkeit. Die Geschwindigkeit ist über einen Drehzahlregler stufenlos einstellbar (1 - 500 Umdrehungen/Minute). Alternativ erlaubt es ein zusätzlicher Schalter, fünf gespeicherte Fixgeschwindigkeiten zu verwenden.

Der Probenantagonist (Degussitpin) wird vertikal durch einen wechselbaren Gewichtszylinder (25N) gegen die Scheibe (Disk) gedrückt. Eine möglichst direkte Kraftübertragung des Gewichts auf die Probe wird durch ein hochpräzises, vertikal angebrachtes Kugellager (Feinprüf Perthen, Göttingen) gewährleistet. Dabei handelt es sich um ein kombiniertes Radial / Axiallager mit einer speziellen spiralförmigen Anordnung der Kugeln im Kugelkäfig. Diese Anordnung (Abb.4) reduziert Reibungsverluste im Lager bezüglich der Gewichts- bzw. Krafteinleitung, die durch das senkrecht auf die Lagerung wirkende Radialmoment (in unserem Fall hervorgerufen durch die zu messenden Reibkräfte) hervorgerufen werden, auf ein Minimalmaß.

# AUFBAU DER MESSANORDNUNG

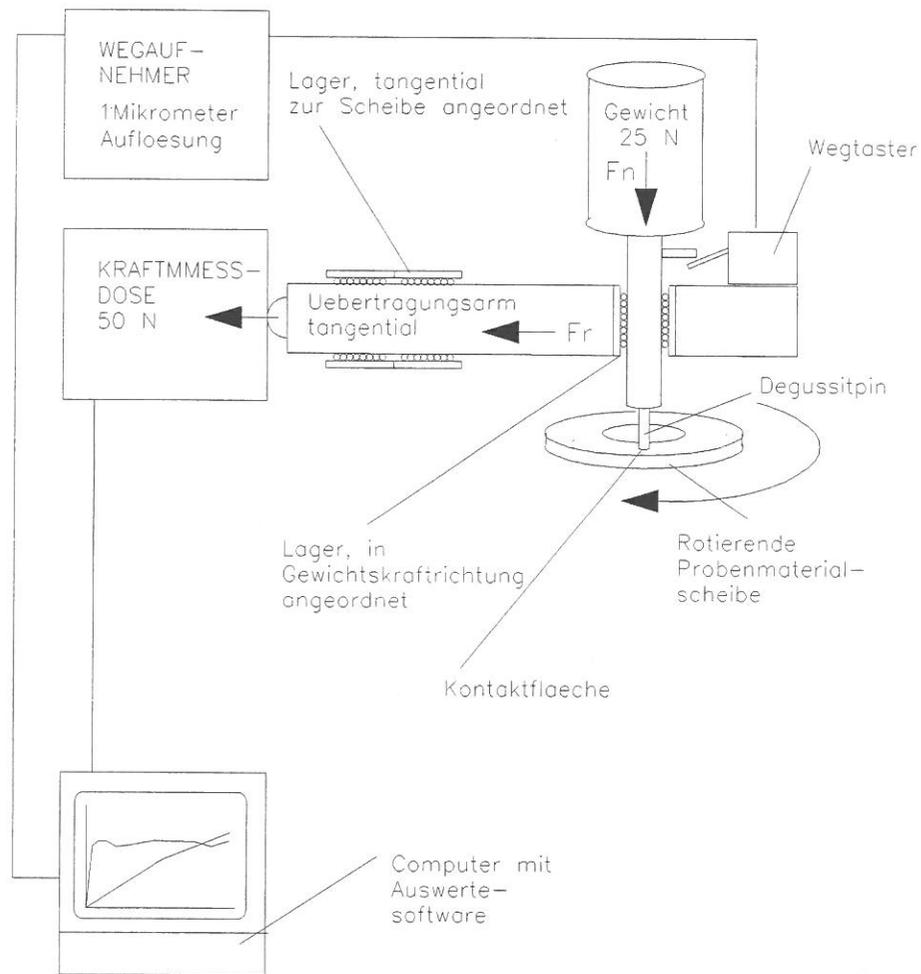


Abb. 3 Aufbau der Pin-on-disk-Maschine

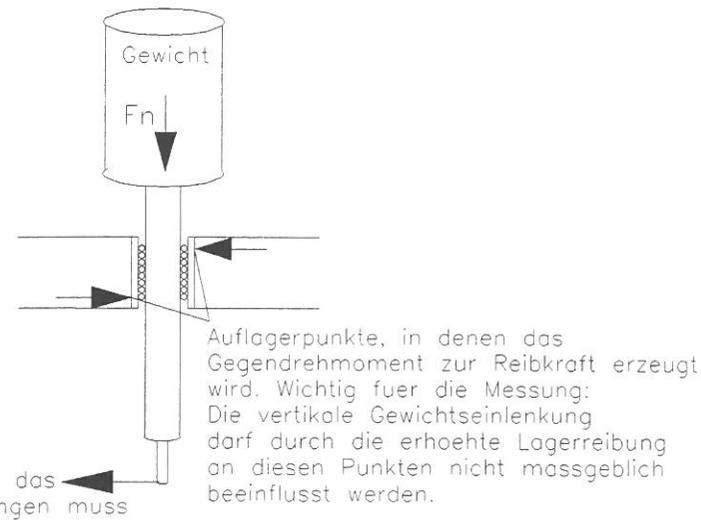


Abb.4 Vertikale Lagerung der kraftübertragenden Führungsstange im Meßarm der Pin-on-disk-Maschine

Dieses Vertikallager ist wiederum in einem Arm angebracht, der selbst horizontal auf einem hochpräzisen Walzenlager hoher Leichtläufigkeit (Schneeberger, Zürich) montiert ist.

Um Meßfehler durch die Schwerkraft zu vermeiden, muß dieses Walzenlager waagrecht einjustiert werden. Dazu können die als Dreipunktlauflage angeordneten Stellfüße der Pin-on-disk-Maschine jeweils so höhenverstellt werden, daß das Lager ohne Gewichtslast keine Tendenz mehr aufweist, selbständig „abwärts“ zu gleiten.

Das horizontale Walzenlager ist das eindimensionale mechanische Trennglied zwischen der Reibkraft, die zwischen der rotierenden Scheibe und dem Pin entsteht, und einer zur Reibkraftmessung angebrachten Kraftmeßdose. Um eine genaue Messung durchführen zu können, müssen Kraftmeßdose, Übertragungslager und Pin in derselben geometrischen Ebene liegen, parallel zur Wirkungslinie der Reibkraft.

Der Pin ist also mit der beweglichen Komponente des horizontalen Walzenlagers über den Arm mechanisch starr verbunden, die Kraftmeßdose dagegen mit der gehäusefesten, also unbeweglichen Komponente des Lagers.

Der bewegliche Arm stößt während der Messung an die Kraftmeßdose. Als zwischenliegendes Kraftübertragungsglied dient ein angular flexibel Gummipuffer. Dies hat zwei Gründe:

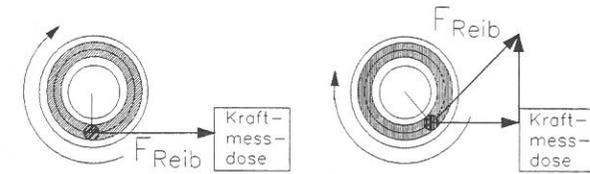
- Meßfehler der Kraftmeßdose durch mechanisches Verkanten des krafteinleitenden Bauteils werden vermieden.
- Hochfrequente Schwingungen des Pins während des Reibvorgangs werden von der Kraftmeßdose ferngehalten und somit Meßfehler vermieden.

Ein weiterer, für fehlerfreie Messungen notwendiger Einstellparameter ist die Längenjustage des Armes, denn:

Das Walzenlager kann für die Messung nur Kräfte in einer Richtung übertragen. Seitlich (normal) auf die bewegliche Achse wirkende Kräfte werden vom Lager aufgefangen und nicht weiter übertragen (Abb. 5). Für eine korrekte Kraftmessung müssen Kraftmeßdose, Walzenlager und Pin in der Wirkungslinie der am Pin anliegenden "Reibkraft" liegen. Um alle vektoriellen Komponenten der Reibkraft fehlerfrei messen zu können, bedarf es also einer weiteren Bedingung:

Die Gerade zwischen Berührungspunkt des Pins mit der Scheibe und Mittelpunkt der Scheibe muß senkrecht zur Wirkungslinie der Reibkraft stehen, bzw. die Wirkungslinie der Reibkraft ( = Arm mit Kraftmeßdose ) muß tangential zur Schleifbahn justiert sein.

Bei fehlerhafter Justage würde nur der der Wirkungslinie der Kraftmeßdosenanordnung entsprechende vektorielle Anteil der Reibkraft gemessen werden. Der restliche vektorielle Anteil würde von Lagergehäusen aufgenommen und nicht gemessen. Über dieses Armsystem läßt sich auch der Radius der Schleifspur des Pins auf der Probe variieren.



Wirkungslinie Reibkraft und Kraftmeßdose in derselben Ausrichtung

Wirkungslinie Reibkraft und Kraftmeßdose in unterschiedlicher Ausrichtung  
Es wird nur ein Teil der Reibkraft gemessen.

**Abb. 5 Ausrichtung der Wirkungslinie der Reibkraft mit der Richtung der Kraftmeßdose**

Durch den Radius wird das Verhältnis der Umdrehungszahl zur Relativgeschwindigkeit zwischen Pin und Probe bestimmt. Ein größerer Radius bedeutet weniger Eindringtiefe pro Zeiteinheit, dafür aber mehr Abrieb am Antagonisten per Zeiteinheit.

Das Armsystem läßt sich also zur Einstellung des Radius seitlich vom Rotationszentrum der Scheibe weg bewegen, so daß die Voraussetzung für eine optimale Kraftübertragung erhalten bleibt. Entsprechende Millimetermarkierungen befinden sich unterhalb des Arms. (Befindet sich der Arm auf Position "0", so liegt der Pin über dem Rotationszentrum bzw. dem Mittelpunkt der disk).

Zur weiteren Analyse der Abriebvorgänge ist die Maschine mit einem Wegaufnehmer ausgerüstet, der fortwährend den Status des Gesamttriebs aufzeichnet.

Es wird der Weg der Pinhalterung in Richtung Drehscheibe mechanisch abgetastet. Dazu dient eine Auslegerkonstruktion mit Wegaufnehmer der Firma Althen München (feinstgelagert, Auflösung 1µm, interne digitale Auswertung).

Bei dieser hochgenauen Wegmessung spielt die Planizität der Probenscheibe eine wesentliche Rolle. Die Probe ist natürlich - spätestens nach ein einer gewissen Versuchsdauer - nicht auch nur annähernd im Bereich von 1 µm plan. Vielmehr wird die Höhenmessung im Verlauf einer Umdrehung die Form einer Sinuskurve annehmen.

Um dies auszugleichen, ist die Mittelung einer Vielzahl von Meßwerten pro Umdrehung notwendig. Somit wird stets - unabhängig von der Drehzahl - nur der Durchschnittswert einer Umdrehung abgespeichert.

Als nächste Problemstellung ergibt sich die Tatsache, daß mit dieser Art der Wegaufnahme lediglich der Gesamttrieb - d.h. die Addition von Probenabrieb und

Antagonistenabrieb - erfaßt werden kann. Es bestünde die Möglichkeit, einen zweiten Wegaufnehmer auf die Probenspur zu setzen und per Software fortwährend eine Subtraktion durchzuführen.

Da aber die Profile / Querschnitte der jeweiligen Spurrillen unvorhersehbare Formen annehmen, ist es im Bereich von Mikrometermessungen nicht vertretbar, irgendeine Stelle dieser Rillen abzutasten. Darüberhinaus würde dieser Taster möglicherweise selbst eine neue Spurrille erzeugen und somit den Versuchsablauf beeinflussen.

Derzeit werden an der LMU München Möglichkeiten erwogen, die Onlinemessung der Spurrillen mit berührungslosen optischen Meßverfahren durchzuführen, z.B. mittels eines angebrachten Laserscanners, der die gesamte Spurbreite erfassen könnte. Die derzeit einzige praktikable Lösung dieser Aufgabenstellung ist die nachträgliche profilometrische Vermessung der Spur mittels mechanischer Oberflächenabtastung (Perthometer 3SP Feinprüf Perthen Göttingen). Die Differenz zum Endergebnis der Gesamtabriebmessung ergibt den reinen Pinabrieb. Die Online-Messung des Gesamtabriebs läßt dennoch zu, festzustellen, ob die Abriebsgeschwindigkeit (=Verschleißrate) konstant bleibt, oder aber ob markante Knickpunkte weitere Untersuchungen in dem entsprechenden Belastungsstadium interessant machen. Für die Münchner Pin-on-disk-Maschine wurde dafür eigens eine zweckmäßige Software programmiert. Diese beinhaltet :

- Anzeige und Verwaltung aller Versuchsparameter in Dialogfeldern.
- Voreinstellung von Abtastzeitpunkten, Datenmengen, Auflösung und Versuchsdauer.
- Eichprozedur für die Kraftmeßdose und den Wegaufnehmer.
- Dreh- und Zyklenzählerfassung bzw. Zählung
- Fortwährende Darstellung der Graphen von Reibkraft und Weg in einem Diagramm.
- Nach Versuchsende können interessante Kurvenausschnitte gezoomt werden
- Bis zu 8 Vergleichskurven aus anderen Versuchen können eingeblendet werden. Als Exportformate stehen ASCII und PCX-Bilder zu Verfügung.

## Die Münchner Pin on Disk - Maschine

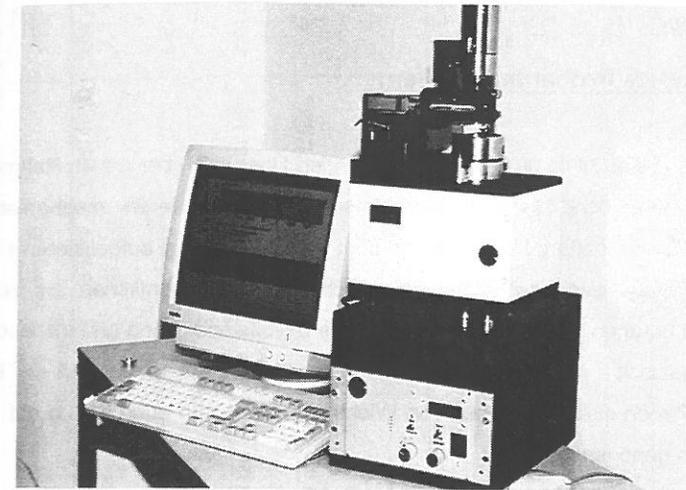


Abb.6 Komplett Pin-on-disk-Maschine mit Computer

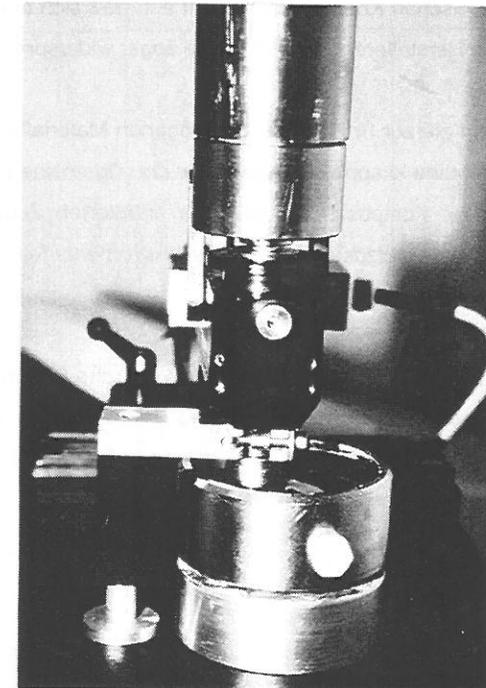


Abb.7 Nahaufnahme des Drehtellers mit Kraftmeßarm und Wegtaster

### 3.2 Prüfkörper

#### 3.2.1 Verwendete Probenmaterialien:

Die Tabelle 3.1 (Seite 34 a) gibt einen umfassenden Überblick über die im Rahmen der Pin-on-disk-Versuche verwendeten Materialien sowie deren mechanisch-physikalische Eigenschaften. Dabei soll erwähnt werden, daß die aufgelisteten Materialzusammensetzungen bzw. Materialeigenschaften im Wesentlichen auf Herstellerangaben beruhen. Da diese jedoch teilweise unvollständig sind und insbesondere die mechanisch - physikalischen Angaben für die spätere Diskussion der Ergebnisse der Pin-on-disk-Messungen von Wichtigkeit sind, wird auch Bezug auf Literaturangaben genommen.

WILLEMS ET AL. (1992) klassifizierten eine Reihe dentaler Komposite nach morphologischen und mechanischen Kriterien. Dabei fällt auf, daß sich deren Ergebnisse bzw. Angaben mit den Herstellerangaben teilweise sogar widersprechen.

In der Tabelle 3.1 werden die zur Prüfung herangezogenen Materialien klassifiziert. An dieser Stelle erscheint eine knappe Übersicht über die allgemeine Einteilung und die Eigenschaften dentaler Komposite sinnvoll. Die erläuterten Zusammenhänge dienen als Grundlage für die aufzustellenden Versuchsvorhersagen / Hypothesen sowie der Diskussion der Versuchsergebnisse.

Es wird nochmals betont, daß nicht nur technisch-physikalische Parameter, sondern insbesondere Parameter bezüglich der Elemente des Tribosystems - also des Körpers und des Gegenkörpers - eine entscheidende Rolle in Bezug auf den tribologischen Verlauf eines jeweiligen Versuchs spielen.

#### 3.2.2 Einteilung der Komposite

Die heutigen dentalen Komposite bestehen aus einer Vielzahl unterschiedlicher Komponenten, die die Eigenschaften des jeweiligen Werkstoffs beeinflussen. Hauptbestandteile sind im Wesentlichen die organische Matrix, die anorganischen Füllkörper und die Silanverbundphase.

Material	Hersteller	Kategorie	Füllertyp	Füllergehalt Vol%, Gew. %	durchschnittl. Partikelgröße	Härte nach Vickers	Druckfestigkeit	E-Modul	Partikelgrößen
Estilux HS	Kulzer	Hybrid	Li-Al-Silikat, Glaskeramik, Ba-Al-Borsilikat, hochdisp. SiO <sub>2</sub>	68 Vol %	Willems: 8,8 µm	1300 N/mm <sup>2</sup>	345 MPa	22600 MPa	0,04 µm - 5,2 µm
Tetric	Vivadent	Hybrid	Bariumglas, Ybteriumtrifluorid, hochdisp. SiO <sub>2</sub>	62 Vol%	k.A.	900 N/mm <sup>2</sup>	k.A.	k.A.	0,04 µm - 3 µm
Heilomolar RO	Vivadent	Mikrofüller mit agglomerierten Vorpolymerisaten	SiO <sub>2</sub> , hochdisp. Ybteriumtrifluorid	46 Vol% Willems: 41,3 Vol%	0,04 µm	610 N/mm <sup>2</sup>	325 MPa	10600 MPa	0,04 µm - 0,2 µm
Durafill	Kulzer	Mikrofüller heterogen, mikrofeiner Komposit mit splitterförmigen Vorpolymerisaten	SiO <sub>2</sub>	37,5 Vol% Willems: 23 Vol%	0,04 µm	450 N/mm <sup>2</sup>	474 MPa	6100 MPa	k.A.
Charisma	Kulzer	Hybrid (Ultrafein)	Ba-Al-Borsilikatglas, SiO <sub>2</sub>	60 Vol% Willems: 50,7 Vol%	0,7 µm	810 N/mm <sup>2</sup>	417 MPa	14800 MPa	k.A.
Pertac	Espe	Hybrid (fein)	Quarz, agglomerierter Mikrofüller aus SiO <sub>2</sub> + Ybteriumtrifluorid	61 Vol% Willems: 53,1 Vol%	4,2 µm	1260 N/mm <sup>2</sup>	450 MPa	15000 MPa	max. Korngröße: 2,5 µm
Dyract	De Trey	Kompomer	Strontium-Al-Fluorosilikat	73 Gew. %	k.A.	k.A.	ca. 180 - 250 MPa	k.A.	2,5 µm

Tab. 3.1 Überblick über die im Rahmen der Pin-on-disk-Versuche verwendeten Materialien und deren Eigenschaften

### 3.2.2.1 Die organische Matrix

Sie besteht im Wesentlichen aus Monomeren, Initiatoren, Stabilisatoren, Farbstoffen, Pigmenten u. anderen Additiven:

#### Monomere:

Monomere sind meist mehrfunktionelle Methacrylate der Grundformel: **MA-R-MA**

- MA** = Methacrylsäureester-Reste (sehr reaktiv mit guten physikalischen Eigenschaften, farbstabil, gering toxisch)
- R** = aliphatische Ketten, aromatische Ringe, (sie sind verantwortlich für mechanische Eigenschaften wie Wasseraufnahme, Schrumpfung, Polymerisationsgrad)

#### Initiatoren:

sie zerfallen durch Aktivierung (Licht, chemisch etc.) in sogenannte Radikale, reagieren mit den Doppelbindungen der Monomere und sorgen so für eine vollständige Aushärtung des Werkstoffs.

#### Stabilisatoren (Inhibitoren):

meist Phenole wie Hydrochinon, die mit vorzeitig entstehenden Radikalen der Monomerpaste reagieren und so die Lagerfähigkeit der Füllmaterialien erhöhen sollen.

### 3.2.2.2 Anorganische Füllkörper

Durch den Zusatz anorganischer Füllkörper werden die physikalischen und mechanischen Eigenschaften der Matrix entschieden verbessert. Es werden dadurch Druck-, Zugfestigkeit, E-Modul und somit die Verschleißfestigkeit des Materials gesteigert. Gleichzeitig wird die Polymerisationsschrumpfung sowie die Wasseraufnahme verringert.

Heute werden als anorganische Füllstoffe meist Quarz, Keramik und Siliziumdioxid verwendet.

Komposite werden in der Regel nach der Art und Größe der verwendeten Füllkörper klassifiziert. Man unterscheidet demnach zwischen Makrofüllern, Mikrofüllern und Hybridkompositen.

### 3.2.2.3 Makrofüllerkomposite

Die Korngröße dieser Füllkörper liegt definitionsgemäß zwischen 0,1 - 100 µm.

Heute eingesetzte Makrofüller weisen jedoch in der Regel eine mittlere Korngröße von  $\leq 10$  µm auf.

Durch Hydrolyse der Verbundphase können die harten Füllkörper aus der Matrix brechen. Die Matrix ist den Abrasionsvorgängen in der Mundhöhle somit ungeschützt ausgesetzt.

Dies hat wiederum zur Folge, daß die Oberfläche nach der Politur in der Mundhöhle infolge Herausbrechens der großen Füllkörper schnell wieder rauh wird, weswegen die klassischen Makrofüllerkomposite heute in den Hintergrund gerückt sind.

Bei etwas moderneren Makrofüllern mit kleineren Füllkörpern läßt sich zwar der Füllungsgrad erhöhen (dies bedeutet geringere Polymerisationsschrumpfung, geringeren thermischen Expansionskoeffizienten und geringere Wasseraufnahme), trotzdem führte deren mangelnde Polierbarkeit zur Entwicklung der Mikrofüllerkomposite.

### 3.2.2.4 Mikrofüllerkomposite

Hier liegt die Partikelgröße unter 0,1 µm. Gängige Mikrofüller enthalten Kieselsäuren (Siliziumdioxid) mit einer Größenverteilung zwischen 0,007 und 0,04 µm. Die Einzelpartikel sind meist kugelförmig. Um maximalen Füllstoffgehalt (70 - 80 %) der Mikrofüller zu erhalten, werden Vorpolymerisate in Form von Agglomeraten zusammen mit weiteren Mikrofüllern der Matrix zugesetzt.

Der große Vorteil der Mikrofüllerkomposite liegt in positiven ästhetischen Resultaten aufgrund guter Polierbarkeit und in deren Abrasionsbeständigkeit, da die Partikel gleichmäßiger an der Oberfläche verteilt sind und die Matrix vor Abrieb schützen. Abrasive Nahrung kann die weiche Matrix kaum angreifen (BAYNE ET AL. 1992).

Da jedoch der Füllkörpergehalt eines Mikrofüllerkomposits den eines konventionellen Komposits nicht erreicht, besitzen Mikrofüller schlechtere physikalische Eigenschaften als die makrogefüllten Komposite. Nicht agglomerierte Mikrofüllerkomposite enthalten nur 50 Gew.-% Füllkörperanteil. Sie weisen damit eine erhöhte Polymerisationsschrumpfung, geringere Biegefestigkeit, geringere Härte und geringeres E-Modul als konventionelle Komposite auf.

Um die positiven Eigenschaften beider Kompositsysteme, also Ästhetik sowie gute mechanisch-physikalische Eigenschaften zu verbinden, wurden die sogenannten Hybridkomposite entwickelt.

### **3.2.2.5 Hybridkomposite**

Sie stellen eine Kombination aus Makro- und Mikrofüllern dar, wodurch sich der Gesamtfüllkörpergehalt auf bis zu 85 Gew.-Prozent steigern läßt. Die Hybridkomposite besitzen gute physikalische Eigenschaften.

Da die Größenverteilung der Partikel, deren Form sowie Oberflächenbeschaffenheit diejenigen Faktoren sind, die den maximalen Füllkörpergehalt eines dentalen Komposits bestimmen, ist es nötig, ein möglichst breites Spektrum an Partikelgrößen zuzusetzen, damit ein maximaler Füllgehalt erreicht werden kann. Nur so können die verbliebenen Matrix-Zwischenräume optimal ausgefüllt werden (ROULET 1988).

Die heute gängig verwendeten dentalen Komposite zählen zur Klasse der Hybridkomposite.

### **3.2.2.6 Verbundphase (Silane)**

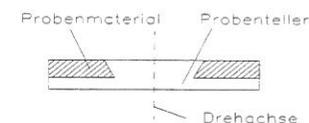
Die Silanisierung von Füllstoffen ist ein entscheidender Faktor für den Verbund zur organischen Matrix. Das Silan bewirkt eine Hydrophobierung des Füllstoffes und anschließende Polymerisation der Monomere mit dem Methacrylsäurerest des Silans. Durch Einbindung des Füllstoffes in die Matrix werden mechanische Werte wie Biege-, Druckfestigkeit und Härte deutlich erhöht.

Trotzdem stellt der Verbund zwischen Matrix und Füllkörper immer noch eine Schwachstelle für alle Komposite dar. Durch saure Hydrolyse (Speichel) kann sich

der chemische Verbund unter Umständen lösen, was zum Füllkörperverlust, freiliegender Matrix und demnach höherer Verschleißrate führt.

### **3.2.3 Probenherstellung**

Eine Aluminiumscheibe (Außendurchmesser 30 mm, Innendurchmesser 10 mm) dient der Aufnahme des zu testenden Probenmaterials. Um einen kraftschlüssigen Verbund zwischen Material und Metall zu gewährleisten, werden die Probenscheiben nach dem Rocatec-Verfahren silikatisiert. Mittels eines rotierenden Diamantschleifkörpers manuell angebrachte Retentionsrillen (Tiefe ca. 2 mm) dienen der zusätzlichen Drehsicherung des auf dem Metallträger befindlichen Probenmaterials während eines Testlaufs.



**Abb. 8a** Probenteller der Pin-on-disk-Maschine

Die verwendeten Materialien werden in 2 gleichmäßigen Schichten von jeweils 1,5 mm Dicke auf die Probenscheibe aufgetragen und im Lichtofen Kulzer Translux XS jeweils 90 Sekunden lang auspolymerisiert. Zur Vermeidung der Sauerstoffinhibitionsschicht sowie zu großer Überschüsse wird die zweite Schicht mit einer dünnen Kunststoffolie überspannt. Alle Proben werden nach ihrer Herstellung zunächst für 24 Stunden in destilliertem Wasser gelagert.

Schließlich werden die so hergestellten Probenscheiben mittels Si-C-Naßschleifpapier der Firma Leco gemäß der im Anschluß im Detail erläuterten Methodik, also in der Pin-on-disk-Maschine, auf die gewünschte Ausgangsrauigkeit plangeschliffen.

Bei der Herstellung einer Probe für Pin-on-disk-Versuche ergaben sich folgende Problemstellungen:

Zunächst sei die Problematik Bedeutung der Planparallelität der Probenoberfläche zur Drehebene des Pin-on-disk-Probentellers erörtert. Würde die Probe in vertikaler

Richtung während einer Umdrehung in Ihrer Dicke variieren, so würde das Prüfgewicht währenddessen gehoben und gesenkt. Dies hätte wiederum zur Folge, daß unterschiedliche Belastung an unterschiedliche Stellen auf das Material ausgeübt wird (Abb. 7a). An der Erhebung würde das Material mit der Gewichtskraft und der aufzubringenden Hubkraft belastet. Dies würde einen unterschiedlichen Abrieb an verschiedenen Stellen bedingen. Ebenso würde die sich zur Normalkraft addierende Hubkraft den Meßwert der Reibkraft unzulässig erhöhen.

Die im Folgenden beschriebene Methode zur Probenherstellung wurde im Rahmen dieser Dissertation entwickelt. Die Skizzen (Abb. 8) stellen die Situation überzeichnet dar.

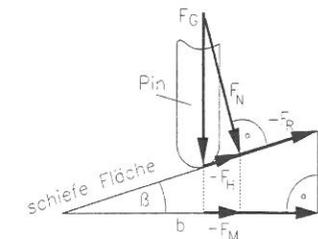
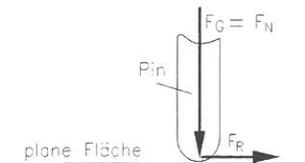
Der Aluminiumprobenhalter wird mit Probenmaterial beschickt. Anschließend wird der Halter mit der Probe z.B. in eine Drehmaschine eingespannt und die Scheibe plangedreht. An dieser Stelle können natürlich auch andere Möglichkeiten - z. B. Schleifscheiben - zum Einsatz kommen. Damit ist die Probe in erster Näherung planparallel.

Um schließlich die erforderliche Parallelität zum Drehteller zu erreichen, wird der Endzustand erst in der Pin-on-disk-Maschine hergestellt. Anstelle des Pins wird eine Schleifscheibe auf die Pinachse gesteckt. Die Verdrehsicherung der Pinachse wird entriegelt und der Arm soweit zur Seite verschoben, daß weniger als die Hälfte der Schleifscheibe auf der Probe zu liegen kommt bzw. mindestens die Breite der Probenbahn noch abgedeckt wird. Schaltet man den Motor der Pin-on-disk Maschine ein, so drehen sich beide Scheiben. Die Disk treibt aufgrund der Reibkraft die Schleifscheibe an. Den Drehbewegungen ist eine gegensinnige Gleit - / Schleifbewegung überlagert.

Während des Einschleifens dringt die Schleifscheibe immer weiter in das Material ein. Die maximale Tiefe dieses Eindringens kann durch einen über der Schleifscheibe liegenden Anschlag eingestellt werden (Abb. 8). Der Betrag dieser Tiefe bzw. die Position des Anschlags muß nun so gewählt werden, daß er höher ist als die höchsten Erhebungen der Probe. Die Schleifscheibe trägt nun so lange Material ab, bis sie nach Abschleifen aller Erhebungen auf dem Anschlag zu liegen kommt.

Abb. 7a erläutert den entstehenden Meßfehler bei nicht-planparallelen Flächen. Wäre die Probe nicht planparallel, so würde die Kraftmeßdose zusätzlich zur Reibkraft die Hangabtriebskraft  $F_h$  messen. Bei steigender Neigung würde sich die Kraft zur Reibkraft addieren, bei fallender Neigung dagegen von der Reibkraft subtrahieren.

$F_n$	auf den Pin lastende Normalkraft
$F_r = F_n \times \mu$	Reibkraft
$\beta$	Neigungswinkel
$F_h$	Hangabtriebskraft
$F_m$	Meßfehlerkraft (horizontale Komponente von $F_h$ )



Ein Rechenbeispiel veranschaulicht die Auswirkung:

Höhe h	sei	50 $\mu\text{m}$ = 0,05 mm
Strecke b	sei	10 mm
Prüfkraft $F_n$	sei	25 N

Der Pin würde also auf der Strecke von 10 mm um 50  $\mu\text{m}$  angehoben.

$$\tan \beta = h / b \quad \Rightarrow \quad \beta = 0,286^\circ$$

$$F_h = F_n \times \sin \beta = 0,125 \text{ N}$$

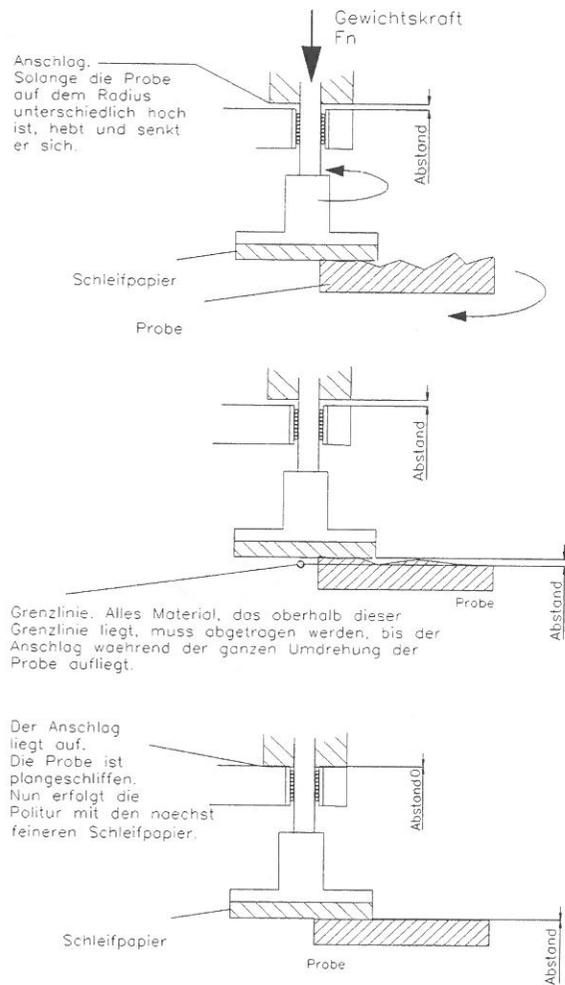
Die Kraftmeßdose mißt lediglich den horizontalen Kraftanteil  $F_m$  dieser Kraft:

$$F_m = F_h \times \cos \beta = \underline{\underline{0,125 \text{ N}}}$$

Ebenso mißt die Kraftmeßdose nur den horizontalen Kraftanteil von  $F_r$ . Der Unterschied im Betrag zwischen Reibkraft und horizontalem Anteil ist jedoch - ebenso wie die Zahlen  $F_h$  und  $F_m$  zeigen, vernachlässigbar.

Es ergibt sich also ein erheblicher Meßfehler. Mittelt man jedoch alle Meßwerte nach jeder vollen Umdrehung, so kürzt sich dieser Meßfehler größtenteils aus der Messung heraus. Diese Mittelung führt die Maschine bei Drehzahlen von mehr als 5 U/min automatisch durch.

Abb.7a Einfluß von nicht-planparallelen Proben auf die Reibkraftmessung

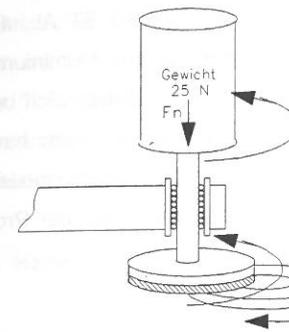


**Abb.8 Planschleifen der Probe in der Pin-on-disk-Maschine**

Mit größerer Schleifscheibe beginnend bis hin zu immer feinerer Körnung wird derselbe Vorgang mehrmals wiederholt. Die einzelnen Schleifscheiben werden jeweils 20 Minuten lang in die Maschine eingespannt. Ein weiterer Vorteil dieser Vorgehensweise liegt in der erzielten Homogenität der Oberfläche.

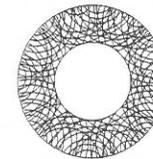
Wäre die Schleifscheibe beim Einschleifen nicht drehbar gelagert, sondern starr, so würden sich in der disk aufgrund der inhomogenen Körnung der Schleifscheiben

konzentrische Riefen ausbilden. Insbesondere von größeren Schleifscheiben hervorgerufenen Riefen würden von den nachfolgenden feineren Schleifscheiben nicht mehr abgetragen ( Abb. 9 ).



Um parallele Flächen zu erzeugen, wird die Materialprobe in der Maschine geschliffen. Es wird ein Loeppvorgang erzeugt, indem die mit dem Motor angetriebene Probenscheibe mittels Reibung die anstelle des Pins angebrachte Schleifscheibe antreibt.

Dadurch entsteht eine gegenseitige Drehrichtung der beiden Scheiben. Die Überlagerung der Drehrichtungen ergibt eine gleichmäßige Rauigkeit.



Schleifbild nach dem Loeppen: Gleichmäßig verteilte Riefen ergeben eine gleichmäßige Rauigkeit.



Schleifbild ohne Loeppen. Die Probe dreht sich unter starrer Schleifscheibe. Dabei entstehen unterschiedlich stark ausgeprägte Riefen. Die Rauigkeit auf verschiedenen Radien kann verschieden ausfallen.

**Abb. 9 Erzeugung einer homogenen Oberfläche**

### **3.2.4. Material des Antagonistenpins**

Da die Struktur des menschlichen Zahnschmelzes interindividuell eine große Varianzbreite bezüglich morphologischer und werkstoffkundlicher Eigenschaften aufweist und für die Ergebnis-Interpretation von In-vitro-Studien das Vorhandensein möglichst definierter Parameter von entscheidender Bedeutung ist, kann man die Verwendung

von Zahnschmelz als Antagonist für In-vitro-Verschleißtests als eher ungeeignet bezeichnen.

Die Verwendung eines standardisierten, leicht erhältlichen "Ersatz"- Antagonisten zur In-vitro-Simulation von Abriebvorgängen erscheint sinnvoll. (FANG ET AL. 1993). Daher werden sogenannte Degussit-Stäbe (zylinderförmige Pin aus Aluminiumoxid, Firma Frialit) unterschiedlichen Durchmessers verwendet. Diese haben sich bereits bei den in München durchgeführten Kausimulator-Abriebversuchen positiv bewährt (SCHNABEL 1994). Degussit verhält sich zwar wesentlich abrasionsstabiler als Zahnschmelz, erzeugt aber morphologisch ähnliche Abriebspuren auf der Proben-scheibe.

Die besondere Eignung von Degussitsiften zur In-vitro-Abriebssimulation wurde bereits von RICE und BAILEY (1984) bestätigt. Mittels einer Pin-on-disk-Apparatur wurde das Abriebsverhalten dentaler Komposite gegen menschliche Schmelzpins mit Pins aus gesintertem Aluminiumoxid verglichen. Man stellte fest, daß diese sowohl quantitativ als auch qualitativ analoge Eigenschaften aufwiesen.

Nachfolgende rasterelektronenmikroskopische Analysen zeigten, daß beide Pinmaterialien trotz erheblicher Unterschiede im Härtegrad (Härte von Schmelz: 343kg/mm<sup>2</sup>, Härte von gesintertem Aluminiumoxid: 2100 kg/mm<sup>2</sup> nach CRAIG ET AL. 1983) morphologisch ähnliche Abriebspuren auf der Proben-scheibe verursachten.

Die REM-Betrachtung der Morphologie der beiden Pins nach Versuchsende zeigte, daß Schmelzpins ein wesentlich inhomogeneres Bild zeigten als die Aluminiumoxid-Pins.

#### Eigenschaften des Degussitpins:

Material:	Aluminiumoxid-Keramik
Mittlere Korngröße:	20 µm
Härte (Knoop):	23000 MPa
Zugfestigkeit:	300 MPa
Druckfestigkeit:	3500 MPa
E-Modul:	380 MPa

Als Variationen dieses Stabtyps wurden desweiteren Stäbe mit Durchmesser 3 mm, 2 mm und 1 mm verwendet, um auf diese Weise die Flächenpressung zu variieren (siehe S. 52). Außerdem wurden Tests mit kugelförmigem Material (Durchmesser 6 mm) durchgeführt. Zur Veranschaulichung der mechanisch-physikalischen Eigenschaften sind einige Vergleichsdaten interessant :

<b>Härte nach Vickers:</b>	Schmelz:	4080 N/mm <sup>2</sup>
	Dentin:	600 N/mm <sup>2</sup>
	Komposite:	480 N/mm <sup>2</sup> - 1300 N/mm <sup>2</sup>
<b>Druckfestigkeit:</b>	Schmelz:	400 MPa
	Dentin:	300 MPa
	Komposite:	240 - 400 MPa
	Kompomere:	180 - 250 MPa

#### 3.2.5 Planschleifen des Degussitpins

Das Planschleifen des Pins unterliegt ähnlichen Anforderungen wie sie bezogen auf die Probedisk dargestellt wurden. Aufgrund des geringen Durchmessers des Pins ist jedoch ein Einlappen nach dem gleichen Verfahrensmuster nicht möglich. Es muß mit beim Einschleifen entstehenden Riefen vorlieb genommen werden. Es stehen zwei Alternativen (siehe Abbildung nächste Seite) bezüglich der Anordnung dieser Riefen zur Auswahl.

## Gerades Schleifen

Der Pin wird gegen eine Schleifscheibe gedrückt. Anschließend wird er in die POD-Maschine eingebaut. Dabei kann nicht gewährleistet werden, dass die geschliffene Fläche parallel zur Probenfläche zu liegen kommt.

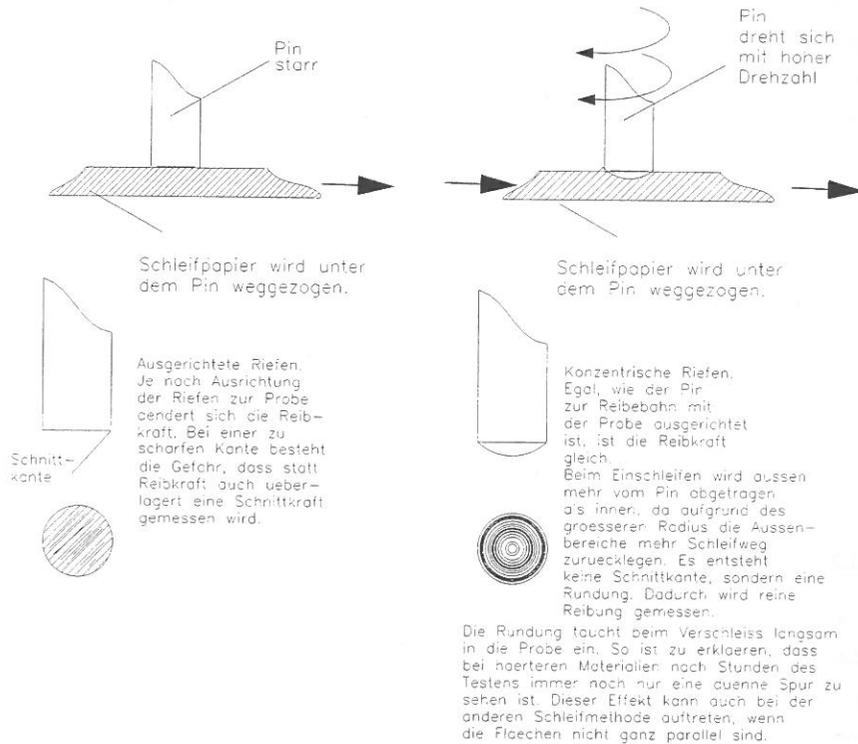


Abb. 10 Einschleifen des Antagonistenpins

Eine konzentrische Anordnung der Riefen erscheint in jedem Fall günstiger, da die Ausrichtung (= der Drehwinkel) eines mit parallelen Riefen versehenen Pins zur Disk sich auf die Kraftmessung auswirkt. Diese Tatsache wurde anhand von Vorversuchen nachgewiesen.

Der Pin wurde derart mit Si-C-Nassschleifpapier behandelt, daß parallele Feinstreifen an der Berührfläche vorhanden blieben. Während des Versuchs wurde der Pin ge-

## Konzentrisches Schleifen

Vorgehen wie bei Methode 1. Zusätzlich wird der Pin mit hoher Drehzahl gedreht. Idealerweise müsste diese Drehung als Zusatz an die POD-Maschine angebaut werden, so dass auch der Pin in der POD Maschine geschliffen werden kann.

ringförmig in seiner Zentrumsachse gedreht. Je nach Ausrichtung ergaben sich Schwankungen im Bereich von 10 % der gemessenen Reibkraft.

Als weiterer Vorteil kommt hinzu, daß bei der konzentrischen Anordnung aufgrund der nach außen hin größeren Umfangsgeschwindigkeiten während des Einschleifens in den Randregionen etwas mehr vom Pin abgetragen wird.

Der Pin wird dabei an der Außenkante etwas (in der Zeichnung übertrieben dargestellt) abgerundet. Dadurch wird im Versuch ausschließlich die Reibkraft gemessen und keine etwa an der scharfen Kante des Pins auftretende Schnittkraft (CZICHOS 1992).

## 3.3 Technische Probleme während der Entwicklung der Pin-on-disk - Maschine

Im Folgenden werden diejenigen Schwierigkeiten und Probleme in chronologischer Reihenfolge erörtert, die sich während der Entwicklung der Maschine herauskristallisierten, sowie deren technische Lösungen aufgezeigt.

### 3.3.1 Ankopplung an die Universalprüfmaschine

Der erste Versuchsaufbau bestand aus der Kombination einer Vorrichtung, die bereits die gewünschte mechanische Pin-on-disk-Belastung erzeugen konnte und der Universalprüfmaschine der Zahnklinik München.

Die Kraftmeßdose und die Software dieser Universalprüfmaschine sollte an die Pin-on-disk-Maschine angekoppelt werden und somit Reibkraftmessungen durchgeführt werden.

Erhebliche Probleme traten auf, die darauf zurückzuführen waren, daß die Software dieser Maschine für Langzeitmessungen nicht ausreichend ausgelegt war. Außerdem stellte der Export der Meßdaten eine weitere Schwierigkeit dar. Umfangreiche Anpassungen machten diese erste Version schließlich bedingt funktionsfähig. Um die vielfachen Einschränkungen, die nach wie vor mit der Ankopplung an die Universalprüfmaschine verbunden waren, zu überwinden, vor allem aber, um die Maschine ausbaufähiger zu gestalten, wurde schließlich der Ausbau zu einem autarken

„stand-alone-System“ beschlossen. Ein Kraftmeßaufbau sowie dazu geeignete Software waren hierfür notwendig.

Zunächst wurde auf dem Markt nach einem Meßsystem mit Software gesucht, man mußte aber feststellen, daß diese Systeme stets gewisse Einschränkungen in sich bargen. Dies führte zur Erstellung einer eigenen Software, die gewünschte Anforderungen beinhaltet:

- automatische oder manuelle Skalierung
- Prüfprotokoll mit entsprechend spezifizierten Eingabefeldern
- Kalibrierungsroutinen
- vielfache Exportmöglichkeiten
- Überlagerung von Meßkurven zum Vergleich verschiedener Proben
- Zoommöglichkeiten in von Kurvenabschnitte in x- und y- Richtung

### **3.3.2 Planparallelität der Probenfläche zur Antagonistenfläche**

Als größeres Problem kristallisierte sich die Forderung nach Planparallelität zwischen der Ebene der rotierenden Probenscheibe und der Pinoberfläche heraus. Zunächst wurden Spezialadapter für eine Naßschleifpapier-Läppmaschine (Fa. Wirtz) gebaut, um die Proben planzuschleifen. Bei einem anderen Versuchsansatz wurden Werkzeugmaschinen (z.B. eine Drehbank) eingesetzt. Ergebnisse hierzu waren nicht zufriedenstellend.

Als einzig mögliche Vorgehensweise wurde schließlich das Einschleifen in der Maschine selbst erkannt. Parallelitätsverluste, die schon durch alleiniges Reponieren der Probenscheibe in die Maschine nicht ausgeschlossen werden konnten, wurden dadurch ebenfalls eliminiert.

### **3.3.3 Schwingungen durch Reibung**

Eine weitere Schwierigkeit lag in der Minimierung von Schwingungen. Die Schwingungen aufgrund von Reibung zwischen Pin und Disk (stick-and-slip-Effekt) rufen bei manchen Materialpaarungen größere Meßfehler hervor.

Hier besteht bereits vom Prinzip des Versuchsaufbaus her ein technischer Widerspruch:

Um perfekte Meßergebnisse zu erreichen, muß sowohl die vertikale als auch die horizontale Kraftübertragung durch höchst leichtläufige Lagerung gewährleistet sein. Für die Abdämpfung der Schwingungen des reibenden Pins zur Kraftmeßdose hin wäre jedoch entweder eine absolut starre oder aber elastische Anordnung nötig.

Eine Reihe von Experimenten war nötig, um diese beiden widersprüchlichen Anforderungen weitestgehend zu erfüllen. Die Lösung lag in Gummi - Schwingungspuffern an drei verschiedenen Stellen:

- Zwischen Pinhalter und Gewichtsstange
- Zwischen Vertikallager und Arm.
- Zwischen Arm und Kraftmeßdose.

Die zu messende Reibkraft wird über diese Bauelemente unverfälscht übertragen, Schwingungen werden jedoch ausgefiltert.

### **3.3.4 Drehung des Pins in seiner Zentrumsachse**

Bereits nach den ersten Testläufen stellte sich heraus, daß unbeabsichtigte Änderungen in der Meßkurve entstanden, sobald sich der Pin sich in seiner Zentrumsachse ein wenig drehte. Dies ist wie folgt zu erklären:

Während der ersten Stunden eines Versuches steigt die Reibkraft zwischen den anfangs glatt polierten Probenflächen so lange, bis sich eine für die Materialpaarung charakteristische Oberflächenbeschaffenheit eingestellt hat. Ab diesem Zeitpunkt bleibt die gemessene Reibkraft annähernd konstant. Es herrschen ausgeglichene Oberflächenbedingungen vor. Diesen Zustand nennt man „steady state“.

Beim Einschleifen („running-in“) werden in Gleitrichtung orientierte Furchen in den Pin geschliffen, die bei einer leichten Drehung des Pins in seiner Zentrumsachse sofort eine ändernde Wirkung auf das Tribosystem verursachen.

Der Zustand des „Steady-state“ wird aufgehoben und der Einschleifvorgang beginnt von Neuem. Nach langer Prüfzeit wird diesem Effekt zusätzlich die Entstehung eines Abriebprofils (siehe Abb. 1a Seite 15a) überlagert. Diese Erkenntnisse haben für Zwischenvermessungen während eines Langzeitversuches die Konsequenz, daß es nicht möglich ist, die Proben aus der Maschine zu entnehmen und anschließend wieder zu reponieren. Die präzise Lage von Pin zu Disk kann nicht ausreichend wiederhergestellt werden. Demzufolge müssen also alle Zwischenmessungen in der Maschine erfolgen. Zur Vermeidung der selbständigen Drehung des Pins während eines Versuches wurde eine sogen. Drehsicherung für die Maschine konstruiert, die dem Pin nurmehr in sehr eingeschränktem Rahmen Winkelspiel erlaubt.

### 3.3.5 Schwankungen der Reibkraft innerhalb einer Umdrehung

Es ergibt sich das Problem, daß innerhalb einer Umdrehung der Scheibe (Disk) sowohl verschiedene Reibwerte als auch verschiedene Höhenwerte auftreten. Diese Unterschiede sind am Anfang eines Versuches mit frisch polierter Scheibe noch keine Schwierigkeit. Sie treten erst im Laufe des Versuches zum Vorschein.

Würden alle Werte aufgezeichnet, würde ein breiter „Balken“ an Stelle einer Kurve am Bildschirm zu sehen sein.

Um diese Kurve zu glätten, wird ein Durchschnittswert („Mittelung“) pro Umdrehung berechnet und am Bildschirm dargestellt.

Andererseits interessiert aber auch, inwieweit diese Unterschiede bei einem Material auftreten, gibt dies doch gewissen Aufschluß über die Homogenität eines Werkstoffs. Um dies ermitteln zu können, wurde die Software so ausgelegt, daß bei sehr langsamen Drehzahlen (unter 5 U/min) diese Mittelung automatisch abschaltet.

Somit auch können Reibkraftunterschiede innerhalb einer Umdrehung untersucht werden.

### 3.3.6 Getrennte Messung des Abriebs von Probe und Pin

Der Wegaufnehmer (Höhensensor) erfaßt die Bewegung der Gewichtsstange mit Pin in Richtung Disk. Dieser Weg beinhaltet den Höhenverlust bzw. Materialverschleiß von Körper (Probendisk) und Gegenkörper (Pin). Die derzeitigen Ausbaustufe der Maschine erlaubt demnach lediglich die Messung des Gesamtverschleißes. Aufgrund der Härte des von uns verwendeten Degussit - Antagonisten ist zwar der Großteil des Materialabriebs auf Seiten der Probenmaterialien zu erwarten, dennoch bleibt das tatsächliche Verhältnis der beiden Größen zueinander ungewiß. Nach Versuchsende wurde daher die Spurrille in der Disk mittels eines Profilometers (Fa. Feinprüf Perthen) quer zur Spur vermessen. Das so erhaltene Profil konnte zur Errechnung des getrennten Abriebs von Probe und Pin herangezogen werden. Die Differenz des vom Pin-on-disk-Höhensensor gelieferten Wertes und des vom Perthometer erfaßten Wertes lieferte schließlich die Verschleißrate des jeweiligen Antagonisten.

$$\begin{aligned} & \text{über Sensor erfaßter Materialabrieb} \\ - & \text{über Perthometer erfaßter Materialabrieb} \\ = & \text{Materialabrieb des Antagonisten (Degussit)} \end{aligned}$$

Entsprechend liefert uns die Differenz des Höhensensor-Abriebs vom reinen Antagonisten- Materialabrieb schließlich die Verschleißrate der jeweiligen Probe.

$$\begin{aligned} & \text{über Sensor erfaßter Materialabrieb} \\ - & \text{Materialabrieb des Antagonistenpins} \\ = & \text{Materialabrieb der Probe} \end{aligned}$$

Einschränkend muß gesagt werden, daß diese Methode den Fehler durch die Unregelmäßigkeiten des entstehenden Abriebprofils (Abb.1a Seite 15a) nicht berücksichtigt. Die Online-Messung von Reibung und Abrieb gibt dennoch Hinweise darauf, ob bei Reibkraftänderungen auch Änderungen in der Abriebsgeschwindigkeit (Steigungsänderung des Weg / Zeit-Graphen) bzw. Verschleißrate erkennbar sind, sowie ob der Abrieb stetig erfolgt oder aber in Abschnitten etc.

### 3.4 Festlegung und Eingrenzung der Parameter

Das Deutsche Institut für Normung gibt vier technisch-physikalische Parameter an, die beim Verschleißvorgang eine wesentliche Rolle spielen (DIN 50320):

- die Last,
- die Relativgeschwindigkeit von Körper und Gegenkörper
- die Temperatur des umgebenden Mediums
- die Dauer des Verschleißvorgangs.

Dabei fällt auf, daß die Mehrzahl weiterer, ebenfalls wichtiger Parameter nicht aufgeführt ist. Nicht zu vernachlässigen sind Parameter, die zusätzlich berücksichtigt werden müssen:

- **Werkstoffkundliche Parameter** wie Härte, E-Modul, Druckfestigkeit oder Zugfestigkeit .
- **Morphologische Parameter**, wie beispielsweise die Form der tribologisch beanspruchten Körper, deren Oberflächenbearbeitung oder - im Falle von Kompositen.- die Form, Größe oder Verteilung der Füllkörper (also die Art des verwendeten Werkstoffs)

Diese Fülle von Parametern verdeutlicht die Komplexität der Prozesse, die einen Reibvorgang beeinflussen. Bei der Entwicklung eines neuen, für klinische Zwecke aussagekräftigen Verschleiß-Meßverfahrens muß daher die Parametervielfalt sinnvoll eingegrenzt werden. Mit anderen Worten, es müssen vorab bestimmte Parameter dadurch „eliminiert“ werden, daß sie für weitere Versuchsreihen einmalig festgelegt, also standardisiert werden. Deshalb wurde folgendermaßen vorgegangen:

- Geeignete Maschinenparameter wurden gemäß klinischer In-vivo-Parameter definiert und festgelegt (z.B. die Normalkraft wurde der Kaukraft angeglichen) .

- In Vorversuchen wurden bestimmte Versuchsparameter gezielt variiert und deren Einfluß auf den Verschleißvorgang durchleuchtet. Daraus ergab sich, daß Parameter, die sich als klinisch wenig relevant herausstellten, für die zukünftige Untersuchungen ausgegrenzt werden können.

#### 3.4.1 Anpassung der Versuchsparameter an physiologische Bedingungen

Ohne mögliche physikalische Einflüsse auf die Versuche näher zu berücksichtigen, wurden vorab die möglichen Parameter im Hinblick auf physiologische Gegebenheiten im Mund eingegrenzt.

##### Vorüberlegungen:

- Kaukraft und Pindurchmesser:

In der Literatur schwanken die Angaben für die Kaukraft zwischen 400 N und 20 N (SOLTESZ ET AL. 1979, DE BOEVER 1978).

Für das Verschleißverhalten eines Werkstoffs ist die auftretende Flächenpressung entscheidend. Die Kernfrage bezieht sich darauf, ob sich die genannten Kräfte auf mehrere Berührungspunkte aufteilen oder in einem Punkt konzentrieren, sowie, ob die Berührung rein punktförmigen oder eher flächigen Charakter hat. Hier scheint es angebracht, auf experimentellem Wege herauszufinden, wann ausreichend starke Abrasionserscheinungen auftreten, um Vergleichsmessungen durchführen zu können. Die Pin-on-disk Maschine ist mit 25 N Gewichtskraft ausgerüstet. Die Variation des Parameters Kaukraft (Normalkraft) bzw. der Flächenpressung erfolgt also über die Variation des Pindurchmessers. Es ergeben sich:

Bei einem Pindurchmesser von 3 mm:	3,5 N/mm <sup>2</sup>
Bei einem Pindurchmesser von 2 mm:	8 N/mm <sup>2</sup>
Bei einem Pindurchmesser von 1 mm:	32 N/mm <sup>2</sup>

ANDERSON (1958) und EICHNER (1963) gehen bei der Festlegung der physiologischen Kaukraft von dem Idealfall aus, daß die Fläche aller 96 Kontaktpunkte ca 1 mm<sup>2</sup> beträgt und geben ausgehend davon den mittleren Kaudruck auf Werte zwischen 4,5 bis 12,5 N/mm<sup>2</sup> an. Diese bewegen sich in den von uns ermittelten Bereichen.

- Für die Kauzyklenfrequenz werden in der Literatur Werte von 58 bis 120 Zyklen pro Minute angegeben (ANDERSON 1958, BALES ET AL. 1975). Die durchschnittliche Kaufrequenz beträgt also ca. 1 Hz. Diese Frequenz kann - unabhängig davon, ob physikalisch relevant oder nicht - ohne weiteres realisiert werden. Bei einer Drehzahl von 60 U/min wird jede einzelne Stelle der Disk 1 mal pro Sekunde unter dem Pin hinweggleiten. Somit ist die Belastungsfrequenz gewährleistet. Es erscheint also sinnvoll, die Umdrehungszahl an der Pin-on-disk-Maschine auf diesen Wert festzulegen.
- Bei festgelegter Kaufrequenz kann die Relativgeschwindigkeit zwischen Pin und Disk nurmehr über den Radius der Scheibe eingestellt werden. Auch über die Abschätzung der Kau- bzw. Gleitgeschwindigkeiten herrschen in der Literatur unterschiedliche Ansichten. Wir arbeiten mit folgender Abschätzung:

Nach eigenen Messungen wird während eines Kauzyklus vom Unterkiefer bei der Öffnungs- und Schließbewegung ca. eine Wegstrecke von jeweils 10 mm zurückgelegt. Bei einem kompletten Kauvorgang wird innerhalb einer Sekunde (1Hz) also zweimal der Weg von 10 mm zurückgelegt. 66 % der Zeit können als Verweilzeit in der Umkehrstellung geschätzt werden. Dies bedeutet, daß die durchschnittliche Geschwindigkeit 3 x 20 mm/s betragen muß.

Die Rückrechnung auf den Radius erfolgt folgendermaßen:

60 mm Wegstrecke sollen bei einer Umdrehung zurückgelegt werden.

$$\text{Kreisumfang} = 2 \times \pi \times r \quad (\pi = 3,14)$$

Gesucht :  $r$

$$r = 60 \text{ mm} / 2 / \pi = 9.56 \text{ mm} \cong \underline{10 \text{ mm}}$$

Der Radius der Gleitspur auf der Probenscheibe sollte also auf 10 mm eingestellt werden.

- Die Temperatur kann in der Simulation theoretisch auf 37° Celsius angeglichen werden. Zur technischen Vereinfachung wurde zunächst Raumtemperatur (ca. 21° Celsius) für die Versuche gewählt. Ein weitreichend unterschiedliches Verhalten der Werkstoffe ist bei diesem Temperaturunterschied nicht zu erwarten. Dies wurde von uns auch im Rahmen der Vorversuche bestätigt (Abb. 11).
- Die Versuchsdauer sollte möglichst lang sein. Hier ist derjenige Mindestzeitraum experimentell zu ermitteln, der stabile Kurvenverläufe, das heißt annähernde Konstanz der Verschleißrate und des Reibkoeffizienten, aufweist.
- Speichel fungiert im Mund als Zwischenmedium. Als Ersatz erscheint destilliertes Wasser sinnvoll (DE LONG 1983). Zwar würde künstlicher Speichel aufgrund höherer Viskosität die Abrasion verringern, aber infolge von Verdunstung mit sich kontinuierlich verändernder (erhöhender) Viskosität würden die Meßergebnisse verfälscht (SOLTESZ ET AL. 1979). Erhöhte Viskosität würde den Reibkoeffizienten verändern und vermutlich verminderten Materialabrieb nach sich ziehen. Die Konstanz der Systemparameter während eines Testlaufs wäre damit nicht mehr gegeben. Es ist daher sinnvoll, ein Medium zu wählen, dessen Zustand während der gesamten Testlaufdauer konstant bleibt, um so eine insgesamt bessere Standardisierung der Meßergebnisse zu erreichen. DOUGLAS und DE LONG (1983) berichten, daß destilliertes Wasser bezüglich seines Reibkoeffizienten Speichel ähnlich ist (Abweichung 7 - 18 %).

### 3.4.2 Zusammenfassung der Parametervorgaben

- Gewichtskraft, Pindurchmesser : 25N, 3mm / 25N, 2mm / 25N, 1mm
- Ausgangsrauigkeit: glatt geschliffen, 400 Grit
- Drehzahlfrequenz: 1 Hz
- Geschwindigkeit abh. vom Radius: 60 mm/s bei 10 mm Radius
- Versuchsdauer: 250.000 Zyklen
- Umgebendes Medium: destilliertes Wasser bei 20°C

### 3.5 Vorversuche an der Pin-on-disk-Maschine

Als erster Schritt zur Beurteilung der gefundenen Parametereinstellungen wurden Kurzzeitversuche (bis zu maximal 8 Stunden Versuchsdauer) durchgeführt. Diese Versuche konzentrierten sich auf die Untersuchung des Verhaltens der Reibkraft bei der Variation der genannten Parameter. Sie dienten als Grundlage für die nachfolgenden Langzeitstudien, in die schließlich die Komponente der Messung der erst bei entsprechend langer Versuchsdauer auftretenden Abrasion aufgenommen wurde.

In den Vorversuchen am „stand-alone-System“ (mit dem Aufbau an der Universalprüfmaschine konnten keine ausreichend reproduzierbaren Ergebnisse erzielt werden) wurden folgende Kriterien untersucht:

- Einfluß der Umgebungstemperatur auf die Gleitreibung
- Änderung der Reibkraft bei verschiedenen Zwischenmedien  
Beispiele: Wasser, Öl, Hirsebrei, Zahnpasta, trocken
- Einfluß der Relativgeschwindigkeit (Drehzahl) auf die Gleitreibkraft
- Dauer des „running-in“
- Auswirkung der Anfangsrauigkeiten auf die Gleitreibung
- Das Reibungsgesetz aus der Physik wurde nachvollzogen
- Die Reproduzierbarkeit der Messungen wurde überprüft

### 3.5.1 Parameter Temperatur

Kraft [N]

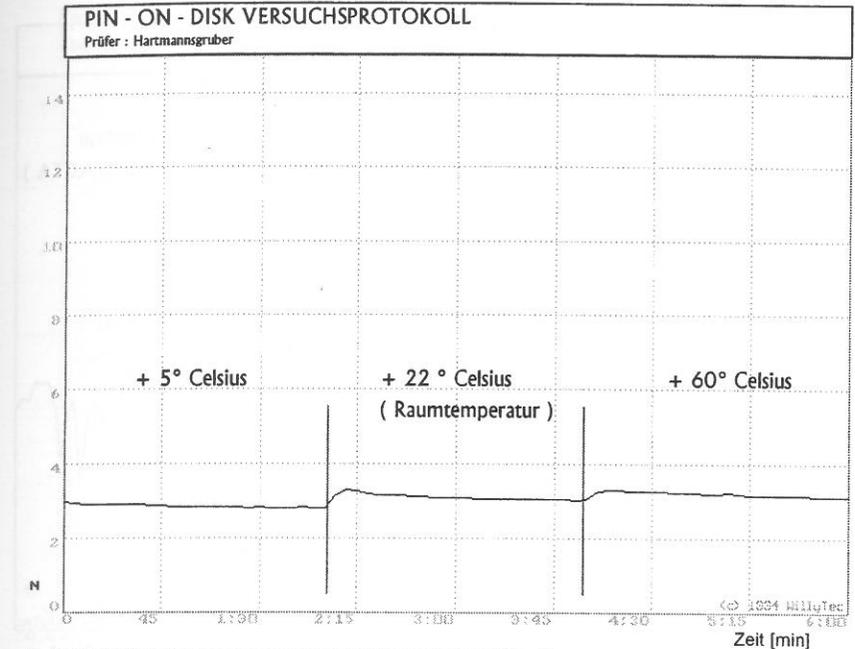


Abb. 11 Einfluß der Umgebungstemperatur auf die Reibkraft

#### **Materialpaarung / Medium :**

Pertac - Degussitstift beide 400 Grit in Aquadest

#### **Vorgehensweise:**

Testabschnitte je 2 Min Dauer. Zwischen den Versuchen wurde das Meßprogramm angehalten. Die Probenkörper wurden vor der Vergleichsmessung je 20 Minuten lang temperiert. ( Thermobäder Typ DC1, Haake, Karlsruhe).

#### **Ergebnis:**

Im gesamten klinisch relevanten Bereich zeigt die Änderung der Temperatur keinen unmittelbaren Einfluß auf die Reibkraft. Das Meßergebnis sagt hinreichend aus, daß eine Einstellung der Pin-on-Disk Testtemperatur auf 22°C (Raumtemperatur) anstelle von 37°C zulässig ist, ohne die Versuchsergebnisse zu verfälschen. Die sichtbaren Schwankungen von +/- 0.5 N liegen im Meßfehlerbereich der Reibkraftmessung.

### 3.5.2 Parameter Zwischenmedium

Kraft [N]

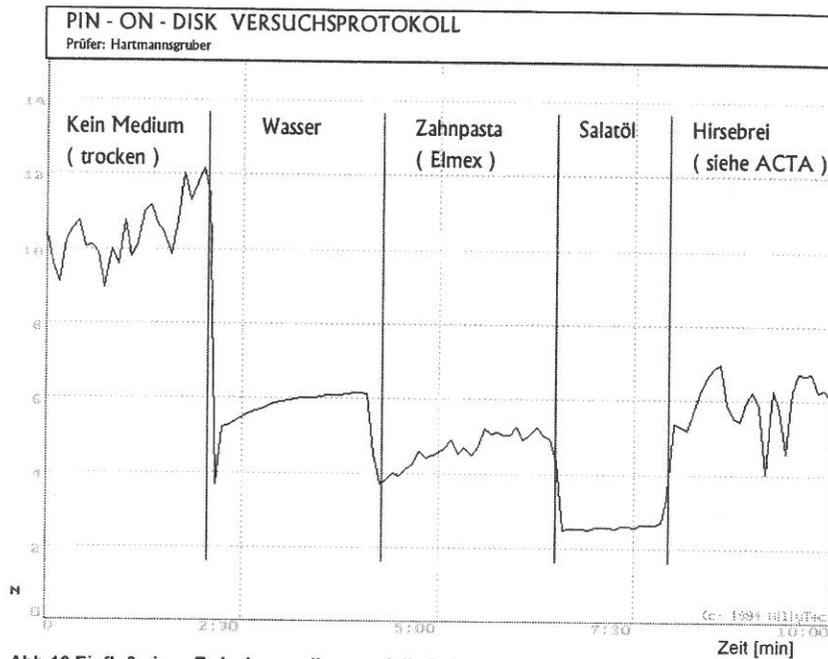


Abb.12 Einfluß eines Zwischenmediums auf die Reibkraft

#### Materialpaarung / Medium:

Pertac - Degussitstift beide 400 Grit in Aquadest

#### Vorgehensweise:

Zwischen den Versuchen wurde das Meßprogramm angehalten und die Anordnung gründlich gereingt.

#### Ergebnis:

Es wurden zu erwartende Größenverhältnisse gemessen (Das Zwischenmedium Öl hat den geringsten Reibwiderstand, die größte Reibung dagegen liegt beim Trockenlauf vor). Gut zu beobachten sind die Reibkraftschwankungen bei partikeldurchsetzten Medien sowie im Trockenlauf. Die Schwankungen im Trockenlauf sind mit Abriebspartikeln, die nicht aus der Schleifspur befördert werden, zu erklären. Die Beimengung von Wasser erlaubt offensichtlich den Abtransport dieser Partikel.

### 3.5.3 Parameter Gleitgeschwindigkeit

Kraft [N]

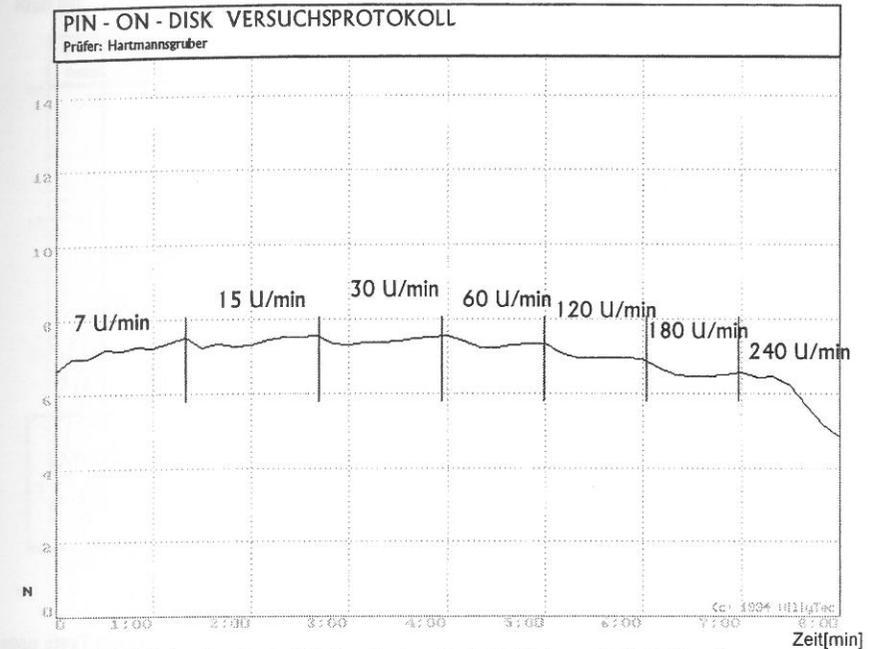


Abb. 13 Einfluß der Geschwindigkeit zwischen den Reibflächen auf die Reibkraft

#### Materialpaarung / Medium :

Pertac - Degussitstift beide 400 Grit, Probendurchmesser : 10 mm in Aquadest

#### Vorgehensweise:

Testabschnitte je 2 Min Dauer.

#### Ergebnis:

In der Physik (KUCHLING 1988) wird oft vereinfachend beschrieben, daß die Gleitreibung geschwindigkeitsunabhängig ist. Genau betrachtet (GERTHSEN 1986) kann jedoch von einer Verhältnismäßigkeit der Reibkraft zur Gleitgeschwindigkeit ausgegangen werden. Die vorliegende Messung zeigt Geschwindigkeitsabhängigkeit. Geschwindigkeiten von 15U/min bis 100 U/min sind als klinisch relevant zu beurteilen. In diesem Bereich zeigt die Messung keinen Einfluß der Geschwindigkeit auf die Reibkraft. Unsere berechnete Standardgeschwindigkeit 60 U/min liegen also in einem unkritischen Bereich.

### 3.5.4 Reproduzierbarkeit von Messungen

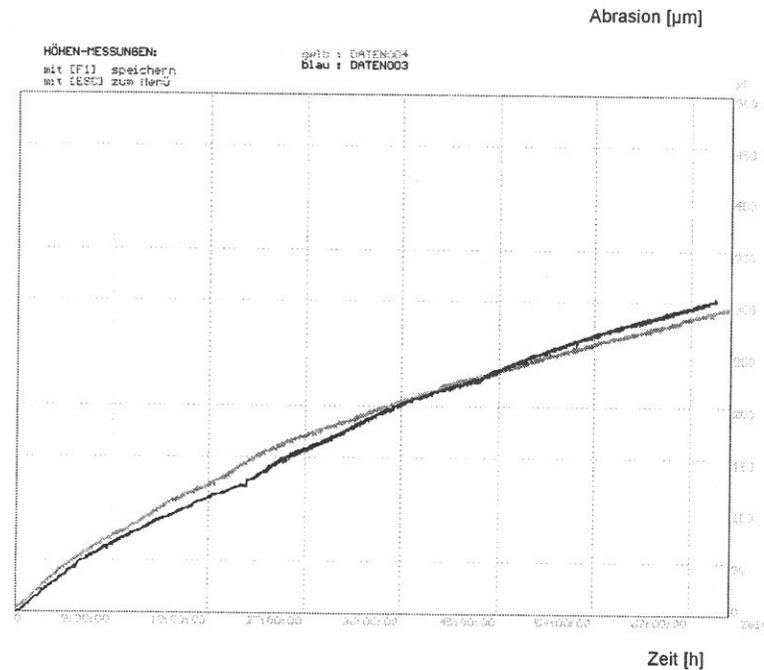


Abb. 14 Nachweis der Reproduzierbarkeit der Pin-on-disk Messung anhand von zwei Tests unter identischen Bedingungen

#### Parameter:

Material:	Tetric
Material Antagonist / Medium:	Degussit - Stift / Aquadest
Geschwindigkeit:	60 U/min
Versuchsdauer:	15 min

#### Vorgehensweise :

Zwei Versuche von 60 Stunden Dauer wurden unter gleichen Ausgangsbedingungen ( Materialpaarung, Vorbehandlung, Maschinenparameter ) durchgeführt und die Ergebnisse des Abrasionsverhaltens miteinander verglichen.

#### Ergebnis:

Das Material, die Vorbereitungsmethode für das Material und die Maschine erreichen eine überraschend präzise Reproduzierbarkeit der Meßergebnisse.

### 3.5.5 „Running-in“ verschiedener Materialien im Vergleich

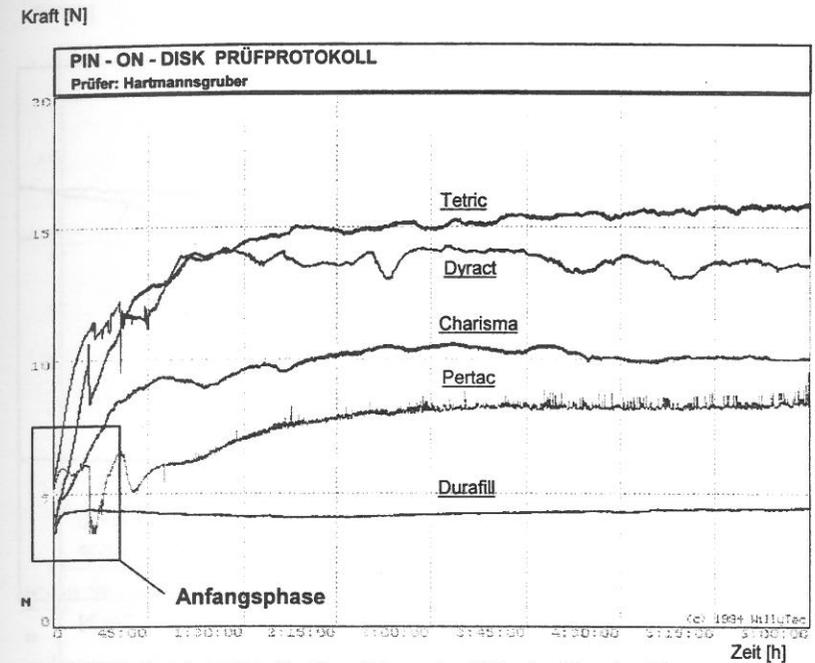


Abb. 15 Verhalten der Reibkraft während der ersten 6 Stunden (Running-in)

#### Versuchsbedingungen:

Material Antagonist:	Degussit - Stift
Versuchsdauer:	6 Stunden
Last:	25N
Medium:	Aquadest
Temperatur:	21° Celsius

#### Vorgehensweise und Ergebnis:

Probe und Antagonist wurden nach der Standardmethode mit 400 Grit Si-C-Papier auf dieselbe Ausgangsrauigkeit bearbeitet. In der Anfangsphase der Versuche liegt daher die Reibkraft bei allen Materialien in annähernd demselben Bereich von ca. 5N .

Je nach Werkstoff erhöht sich die Reibkraft unterschiedlich schnell und stellt sich auf einen bestimmten, gleichbleibenden Wert ( „steady-state“ ) ein.

Dieser Wert hat sich bei den getesteten Materialien unter den gewählten Versuchsbedingungen bereits nach ca. 3 Stunden Einlaufphase („running - in“) eingestellt.

### 3.5.6 Parameter Rauigkeit

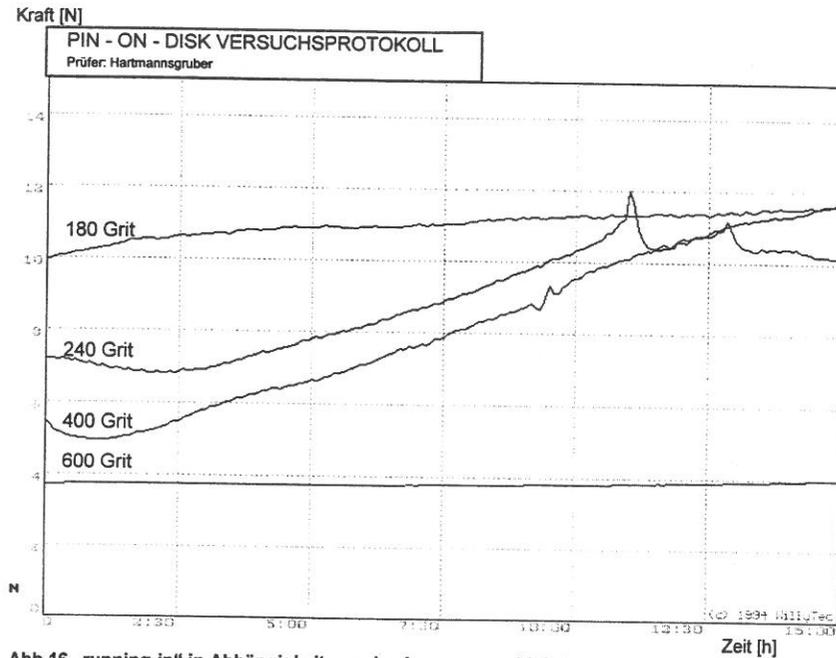


Abb.16 „running-in“ in Abhängigkeit von der Ausgangsrauigkeit

#### Vorgehensweise:

Die Materialpaare (Tetric - Degussitstift) wurden vor dem jeweiligen Versuch mit Schleifpapier verschiedener Rauigkeit beschliffen. Es wurden 4 Tests von 15 Minuten Dauer durchgeführt.

#### Ergebnis:

Die Oberflächenrauigkeit bestimmt in hohem Maße die Reibkraft. Die Reibkraft steigt mit zunehmender Rauigkeit. Sehr interessant erscheint die Beobachtung, daß im Rauigkeitsbereich von 240 Grit und 600 Grit das im Kapitel 3.5.5. protokollierte „running-in“ sehr schnell voranschreitet. Bei der mit 180 Grit bearbeiteten Materialpaarung vollzieht sich die Steigung der Reibkraft nurmehr langsam. Im Bereich von 600 Grit ist der Einlauf-Vorgang noch nicht ausgelöst. Man kann darauf schließen, daß während des „running-in“ anfangs eine gewisse Zeit benötigt wird, bis die Oberflächen aufgeraut sind. Anschließend erfolgt gegenseitiges „Aufrauen“ schnell, bis sich ein materialspezifischer Höchstwert an Rauigkeit und Reibkraft einstellt. Die hier gezeigten Rauigkeitsstufen können als „Momentaufnahmen“ der Oberflächenrauigkeiten während des „running-in“ verstanden werden.

### 3.5.7. Parameter Normalkraft

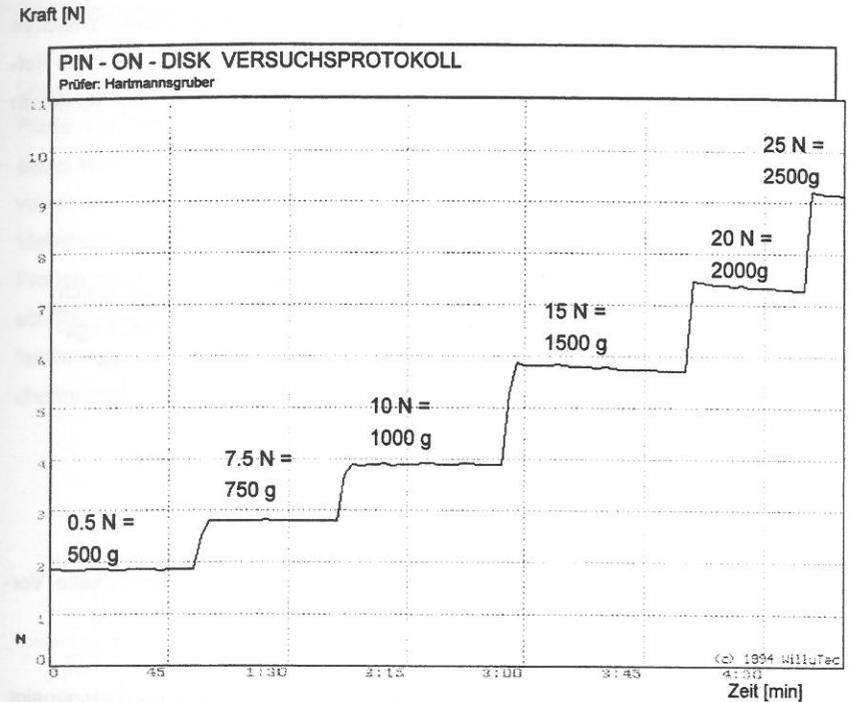


Abb.17 Reibkräfte bei verschiedenen Abstufungen der Normalkraft

#### Materialpaarung:

Pertac - Degussitstift beide 240 Grit

#### Ergebnis:

Zur Überprüfung der technisch einwandfreien Funktion des Kraftmeßsystems (bestehend aus Kraftmeßdose, Lagerung und Übertragungselementen) der neu entwickelten POD-Maschine sollte in diesem Versuch das Reibungsgesetz

$$\text{Reibkraft } F_r = \text{Reibkoeffizient } \mu \times \text{Normalkraft } F_n$$

nachgewiesen werden. Die direkte Proportionalität ist im Meßprotokoll gut erkennbar ( $\mu$  beträgt in diesem Fall  $3.8 \text{ N} / 10 \text{ N} = 0.38$ ).

### 3.6 Vorversuche zur Bestimmung von Reibkoeffizienten

Zur Beleuchtung der Thematik „Reibung“ wurden die Haftreibungskoeffizienten zwischen verschiedenen dentalen Werkstoffen ermittelt, um Zusammenhänge zwischen Haftreibung, Gleitreibung und Materialverschleiß gegebenenfalls erkennen und verstehen zu können.

Definition (Kuchling, 1986):

Haftreibung wirkt bei ruhendem Körper und ist dem Betrag nach gleich der entgegengerichteten äußeren Zugkraft. Die maximale Haftreibungskraft ist stets größer als die Gleitreibungskraft zwischen zwei Flächen.

#### 3.6.1 Funktionsprinzip der Vorrichtung zur Ermittlung der Haftreibungskoeffizienten

Zur Ermittlung der Haftreibungskoeffizienten diente eine speziell entwickelte Vorrichtung (Abb.18) :

Der Prüfkörper liegt auf einer neigbaren Ebene. Diese Ebene wird langsam geneigt, bis der Prüfkörper abrutscht. Der Winkel  $\beta$  dieser Grenzneigung wird gemessen. Der Haftreibungskoeffizient errechnet sich bei diesem Versuchsaufbau aus der Formel (GERTHSEN, KNESER, VOGEL 1986):

$$\tan \beta = \text{Haftreibungskoeffizient } \mu$$

Der Hauptvorteil der Versuchsanordnung besteht darin, daß sich der Parameter Normalkraft aus der Gleichung herauskürzt und eine direkte Beziehung zwischen Winkel und Reibkoeffizient besteht.

Die Vorrichtung erlaubt es, mittels eines Gelenks und einer Stellschraube die Neigung der Gleitebene zu variieren. Bei Loslassen der Stellschraube bleibt die Ebene in ihrer Stellung fixiert, so daß der Losbrechwinkel einfach abgelesen werden kann.

Zur korrekten Neigungsmessung muß die Referenzebene mittels einer Libelle vorab geeicht werden. Drei Stellfüße (Dreipunktauflage) ermöglichen dies. Die Messung des Neigungswinkels erfolgt über eine am Gerät angebrachte Winkelskala.

Die neigbare Ebene wurde in der Versuchsreihe mit einer polierten, rechteckigen Platte aus Degussit Plattenmaterial (50 mm x 30 mm x 5 mm, Frialit, Frankfurt) - adäquat zum Antagonistenpin der Gleitreibungsversuche an der Pin-on-disk-Maschine - versehen. Die Probenscheiben mit Zahnersatzmaterial wurden auf einem kleinen Metallzylinder aufgebracht, der als Gewicht zur Normalkrafterzeugung diente. Die Proben wurden mittels verschieden fein gekörnter Si-C-Naßschleifpapiere plangeschliffen. Dadurch wurde der Parameter Oberflächenrauigkeit mit dem Ziel variiert, festzustellen, ob bzw. inwieweit die Materialeigenschaften oder aber die Oberflächenrauigkeiten unterschiedlichen Einfluß auf die Haftreibung haben.

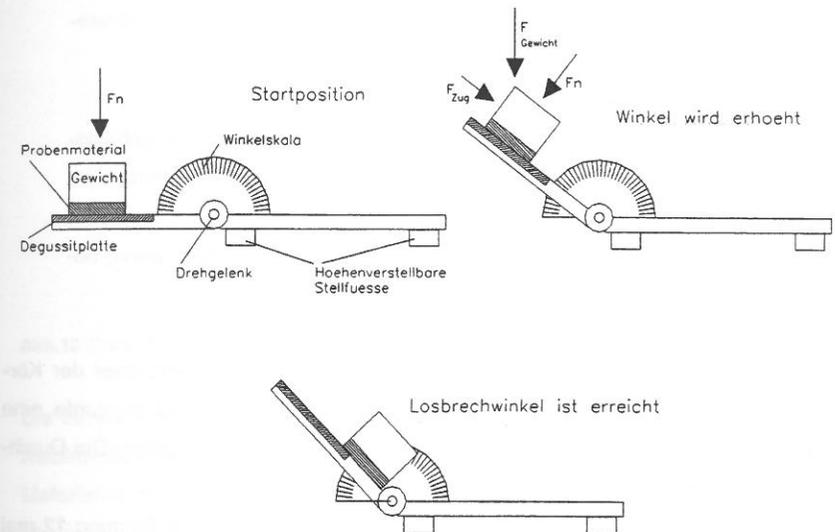


Abb. 18 Vorrichtung zur Bestimmung von Haftreibungskoeffizienten

## 4 Ergebnisse

### 4.1 Haftreibung

Ausgegangen wurde von der Annahme, daß die Haftreibung zwischen zwei Körpern von der Art der Materialien sowie der Beschaffenheit der sich berührenden Oberflächen bestimmt wird. Die Versuchsreihe sollte die Beziehung dieser Parameter zueinander sichtbar machen.

Als erster Schritt wurde der Einfluß der durch Vorbehandlung erzeugten Oberflächenrauigkeit auf die Höhe der Haftreibung geprüft. Die Versuchsreihe basierte auf folgenden zwei Hypothesen:

- Werden die Flächen jeweils rau vorbehandelt, müßten sich die Haftreibungskoeffizienten der verschiedenen Materialien im Vergleich nur wenig voneinander unterscheiden. Die grobe Oberflächenrauigkeit bestimmt vorwiegend den hohen Haftreibungskoeffizienten bei allen Materialien.
- Werden die Flächen jedoch sehr fein poliert, müßten sich die verschiedenen Materialien - bei insgesamt niedrigerem Niveau der Haftreibung - im Verhältnis mehr voneinander unterscheiden, da die Haftreibung in diesem Fall auch durch materialbedingte Faktoren, wie zum Beispiel Adhäsion, beeinflusst wird.

Die Materialproben für diesen Versuch wurden mit Si-C-Naßschleifpapier der Körnungen 240, 400 und 600 Grit bearbeitet. Für jede Rauigkeitsstufe wurde eine Messung durchgeführt. Die Degussitplatte wurde unbehandelt gelassen. Die Durchführung erfolgte ohne Zwischenmedium.

Um möglichst aussagekräftige Ergebnisse zu erlangen, wurde jede Paarung 12 mal geprüft, die beiden Extrem-Meßwerte aus der Reihe gestrichen und der Mittelwert gebildet. Tabelle 4.1 zeigt die ermittelten Haftreibungskoeffizienten, Abbildung 19 (Diagramm a.) deren Auswertung.

Grit	240	400	600
Estilux	0,61	0,41	0,31
Tetric	0,58	0,41	0,33
Dyract	0,56	0,42	0,29
Heliomolar	0,55	0,41	0,27
Pertac	0,61	0,42	0,28
Durafill	0,51	0,44	0,27
Charisma	0,52	0,38	0,29

Tab. 4.1 Haftreibungskoeffizienten bei verschiedenen Rauigkeitsstufen der Proben (Durchschnittswerte von je 12 Messungen).

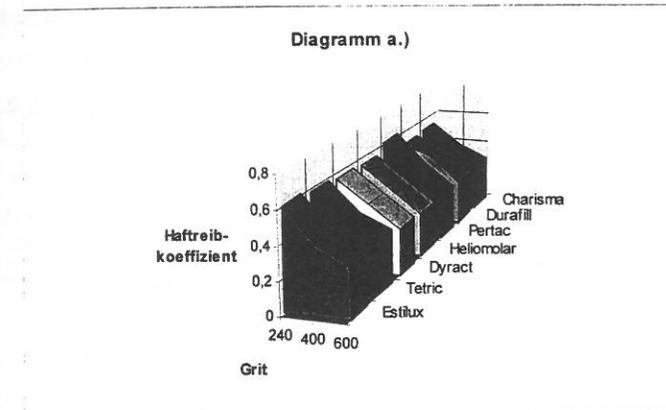


Abb.19 Diagramm zu Tabelle 4.1

Die Versuchsreihe bestätigt den Einfluß der Oberflächenrauigkeit auf die Höhe des Reibkoeffizienten. Materialspezifisch bedingte Unterschiede zwischen den einzelnen Materialien sind hingegen kaum zu beobachten. Der Haftreibungskoeffizient wird also vorwiegend von der Oberflächenrauigkeit bestimmt.

In einer weiteren Versuchsreihe erfolgte die paarweise Veränderung der Oberflächenrauigkeit. Im Gegensatz zur ersten Versuchsreihe wurde nun auch die Degussitplatte mit der jeweiligen Schleifkörnung bearbeitet, um die in der zweiten Hypothe-

se vermuteten Effekte auf diese Weise beobachten zu können. Die Tabelle 4.2 sowie Abbildung 20 ( Diagramm b.) zeigen die Ergebnisse:

Grit	240 / 240	320 / 320	400 / 400	600/600
Estilux	0,28	0,24	0,18	0,16
Tetric	0,26	0,25	0,18	0,16
Dyract	0,25	0,24	0,17	0,15
Heliomolar	0,26	0,24	0,23	0,16
Pertac	0,23	0,23	0,17	0,17
Durafill	0,24	0,24	0,23	0,17
Charisma	0,25	0,24	0,21	0,2

Tab. 4.2 Haftreibungskoeffizienten bei verschiedenen Rauigkeitsstufen der Proben und der Reibflächen (Durchschnittswerte von je 12 Messungen pro Paarung).

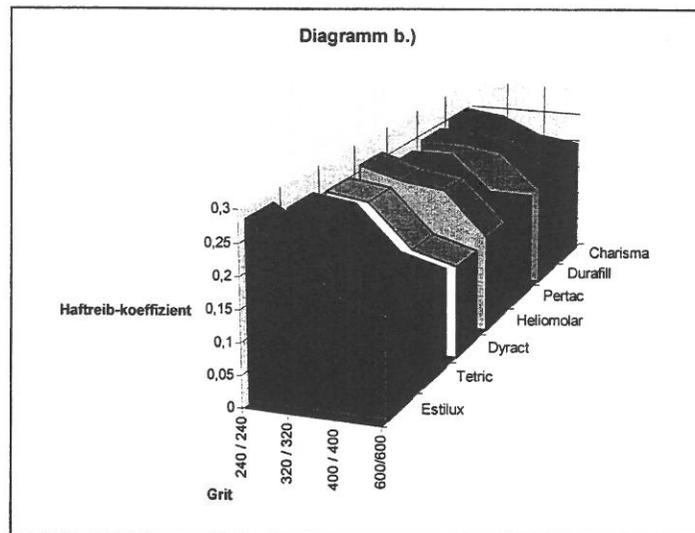


Abb. 20 Diagramm zu Tab. 4.2

Auch in der zweiten Versuchsreihe wird die Hypothese nicht bestätigt. Die im Balkendiagramm überhöht dargestellten Differenzen bewegen sich im Bereich der zweiten Nachkommastelle. Da die Ergebnisse der Messungen so knapp beieinander liegen, kann nicht mit Gewißheit von Zusammenhängen gesprochen werden. Das Niveau des Haftreibungskoeffizienten im Vergleich zu den Ergebnissen der ersten Versuchsreihe liegt niedriger, da die Degussitplatte ebenfalls beschliffen wurde.

#### 4.1.1 Schlußfolgerungen der Haftreiberversuche im Hinblick auf Materialtests in der Pin-on-disk-Maschine

Der Vergleich der Haftreiberversuche mit den Vorversuchen zum „running-in“ (Abb. 21 unten, siehe auch Kapitel 3.5.5) läßt folgende Schlüsse zu:

Die zu Beginn der Testläufe bei allen Werkstoffproben beobachteten identischen Reibkoeffizienten lassen sich auf deren Vorbehandlung mit Schleifpapier derselben Körnung zurückführen. Unterschiedliche, für den jeweiligen Werkstoff charakteristische Reibkoeffizienten nach dem „Running-in“ hingegen scheinen eher von deren jeweiligen Materialeigenschaften abzuhängen.

Reibkraft [N]

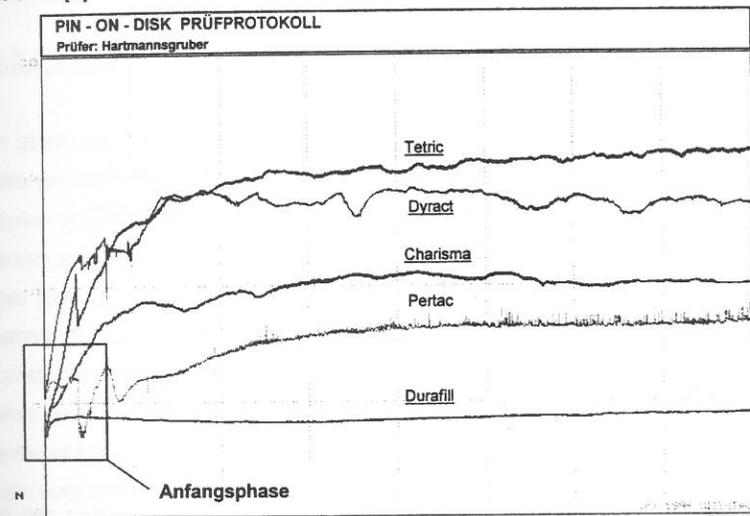


Abb.21 Pin-on-disk-Vorversuche zum „running-in“

Zeit [h]

Das Reibkraftniveau ändert sich bei den Pin-on-disk-Versuchen erst, nachdem die Materialien sich einige Zeit aufeinander eingeschliffen haben und sich dabei gewissermaßen ein „Formschluß“ der Profile der sich reibenden Flächen eingestellt hat.

Die Haftreibversuchsanordnung ist auf künstlich erzeugte Oberflächen (Schleifpapier anstelle von „running-in“) angewiesen und ermöglicht daher keine unmittelbaren materialbezogenen Aussagen. Bei der Pin-on-disk Maschine hingegen verändert sich während der Running-in-Periode die Höhe der Reibkraft so lange bis ausgeglichene Oberflächenbedingungen vorliegen und die darauf folgende Steady-state-Phase von materialspezifischen Eigenschaften bestimmt wird. Abschließend kann also Folgendes festgestellt werden:

- Der Haftreibkoeffizient zwischen Degussitplatten und Probenmaterial wird vornehmlich von der Oberflächenrauigkeit der beiden Partner bestimmt.
- Diese Oberflächenrauigkeit hängt von der Bearbeitung der Probe sowie des Antagonisten ab.
- Mittels alleiniger Bestimmung von Haftreibkoeffizienten lassen sich somit keine Voraussagen über das Verschleißverhalten eines Werkstoffs treffen.
- Unterschiedliche Materialien / Materialpaarungen weisen bei dynamischen Langzeitversuchen typische Reibkraftcharakteristika auf.  
Dafür ist eine gewisse Einlaufzeit („running-in“) erforderlich.

## **4.2 Praktische Anwendungen der Pin-on-disk-Maschine**

### **4.2.1 Einleitung**

Im nun folgenden Kapitel soll die Vielfalt der Anwendungsmöglichkeiten der neu entwickelten, optimierten Pin-on-disk-Maschine anhand von Beispielen aufgezeigt

werden. Dazu wurden vier in ihrer Zusammensetzung unterschiedliche Füllungsmaterialien - 2 Hybridkomposite (Tetric und Estilux), ein Mikrofüllerkomposit (Heliomolar) sowie ein Kompom7er (Dyract) in Langzeitversuchen von jeweils 250.000 Zyklen analysiert.

Parameter wie Durchmesser des Antagonistenpins, Aushärtezeit des Probenmaterials sowie Form des Antagonisten wurden gezielt variiert. Der Verlauf der tribologischen Kenngrößen Reibung und Verschleiß konnte in Form von Kraft / Zeit- und Abrieb / Zeit- Diagrammen untersucht werden. Mittels profilometrischer Vermessung der Spurentiefen und des bereits in Kapitel 3.3.6 erläuterten Umrechnungsmodus konnte der Abrieb von Probe und Pin differenziert analysiert werden. Sämtliche Pin-on-Disk- Langzeittestläufe wurden gemäß der in Kapitel 3.4 geschilderten Überlegungen zur Parameter-Standardisierung bei konstanter Gleitgeschwindigkeit von 60 U/Min. (entsprechend einer Wegstrecke von 6,3 cm/s.), konstantem Spurenradius 10 mm, konstanter Normalkraft  $F(N)$  von 25 N sowie unter Verwendung eines Zwischenmediums bestehend aus raumtemperiertem deionisiertem Wasser durchgeführt. Die Testlaufdauer betrug jeweils 250.000 Zyklen, was einer insgesamt zurückgelegten Wegstrecke von 15.750 Metern entspricht.

### **4.2.2 Variation der Pindurchmesser**

In einer ersten Langzeit-Versuchsserie wurden die Durchmesser des Antagonistenpins gezielt variiert. Jeder der vier getesteten Werkstoffe wurde demnach drei Testläufen unter Verwendung von Degussitpins der Durchmesser 1 mm, 2 mm und 3 mm unterzogen und in Bezug auf Materialverlust und Reibkraftverlauf untersucht.

Der Einfluß unterschiedlicher Flächenpressungen auf das tribologische Verhalten zahnärztlicher Füllungswerkstoffe konnte durch die Pindurchmesser-Variation bei konstanter Normalkraft untersucht werden. Die Variation der Pindurchmesser bedingt eine Variation der Flächenpressung. Die Verschleiß- und Reibkraftkurven bei unterschiedlichen Pindurchmessern werden im Folgenden für jeden Werkstoff einzeln aufgeführt (Abbildungen 22 - 29).

#### 4.2.2.1 Variation der Pindurchmessern am Beispiel Estilux HS Hybrid

Höhenverlust [ $\mu\text{m}$ ]

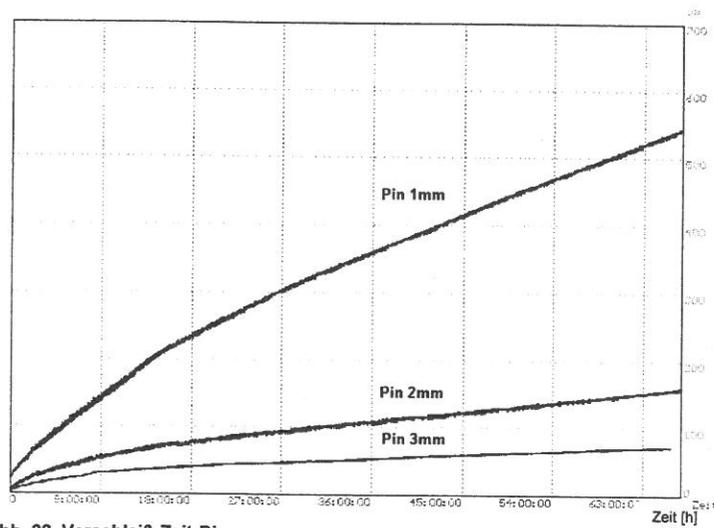


Abb. 22 Verschleiß-Zeit-Diagramm

Reibkraft [N]

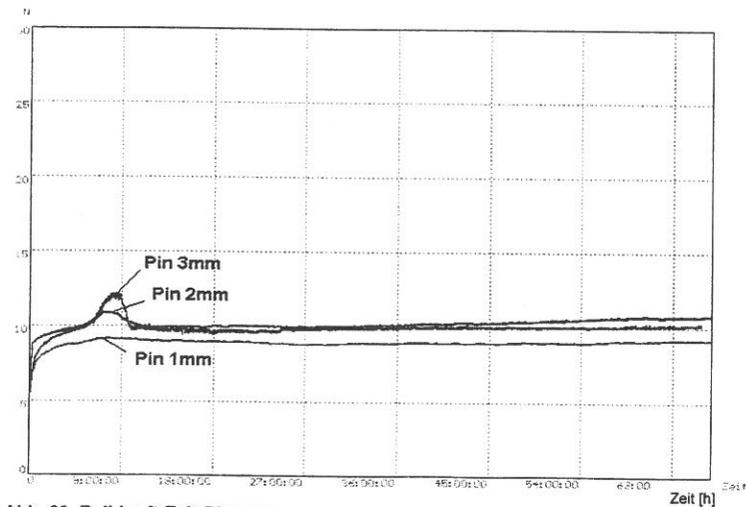


Abb. 23 Reibkraft-Zeit-Diagramm

#### 4.2.2.2 Variation der Pindurchmesser am Beispiel Heliomolar RO

Höhenverlust [ $\mu\text{m}$ ]

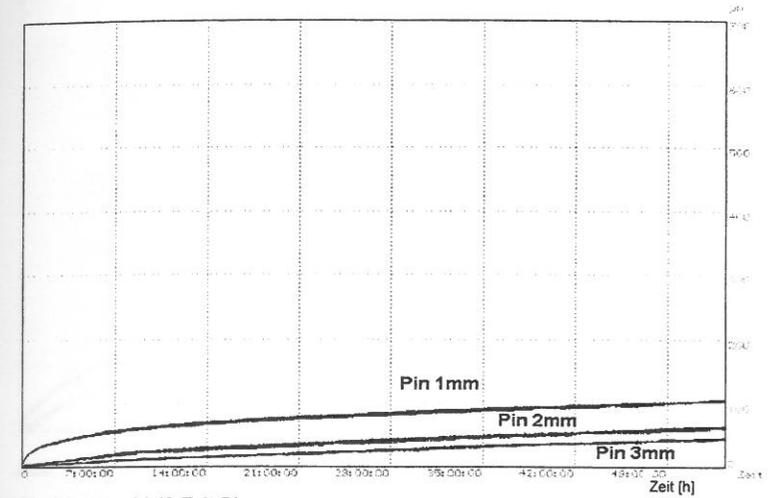


Abb. 24 Verschleiß-Zeit-Diagramm

Reibkraft [N]

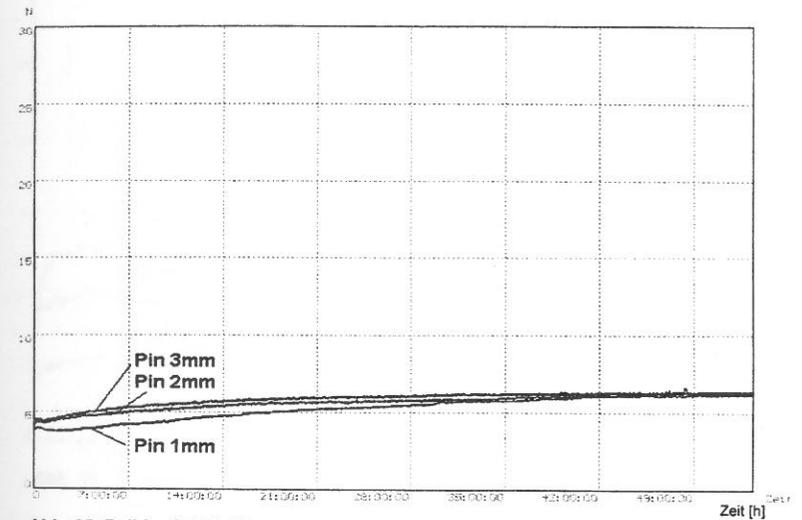


Abb. 25 Reibkraft-Zeit-Diagramm

#### 4.2.2.3 Variation der Pindurchmesser am Beispiel Tetric

Höhenverlust [ $\mu\text{m}$ ]

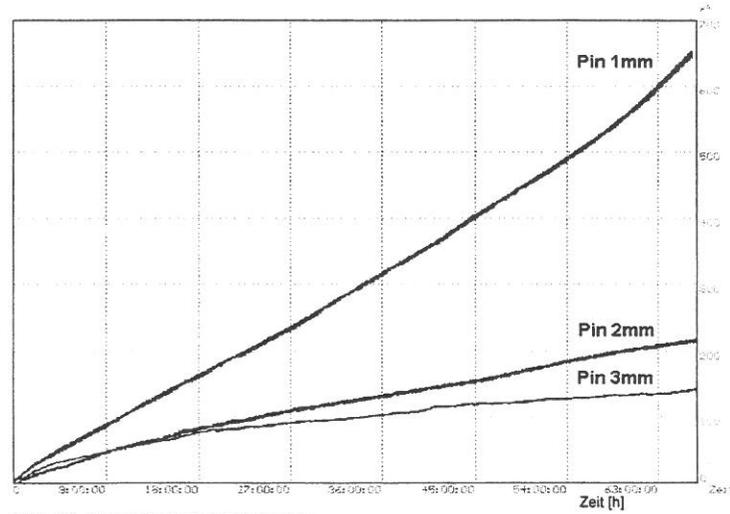


Abb. 26 Verschleiß-Zeit-Diagramm

Reibkraft [N]

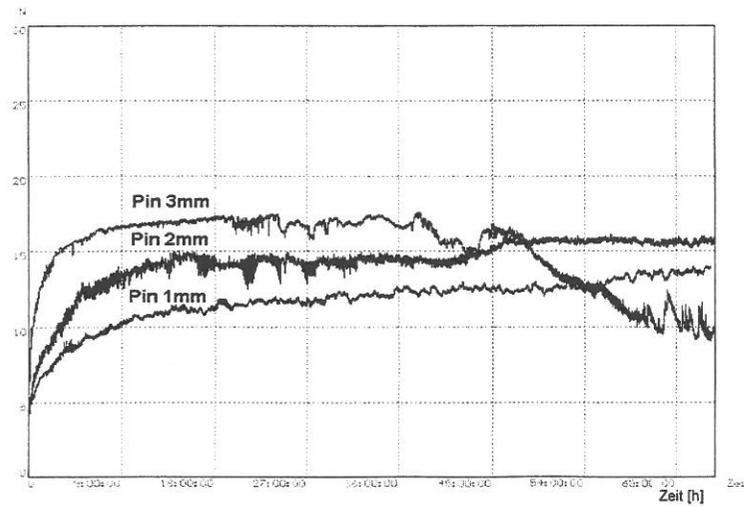


Abb. 27 Reibkraft-Zeit-Diagramm

#### 4.2.2.4 Variation der Pindurchmesser am Beispiel Dyract

Höhenverlust [ $\mu\text{m}$ ]

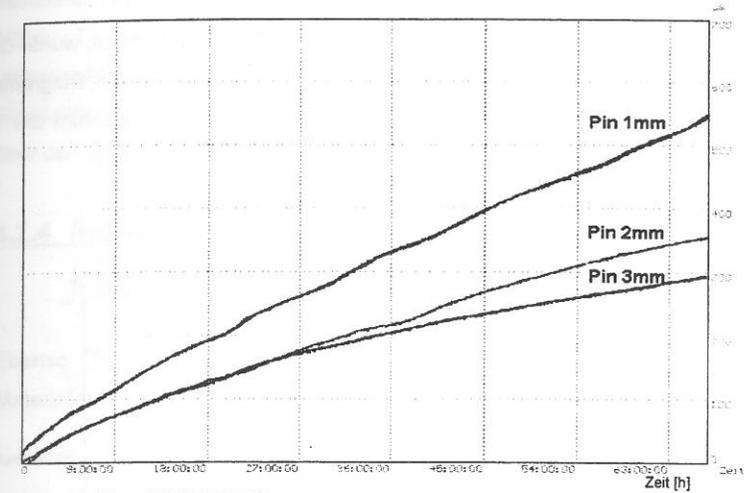


Abb. 28 Verschleiß / Zeit-Diagramm

Reibkraft [N]

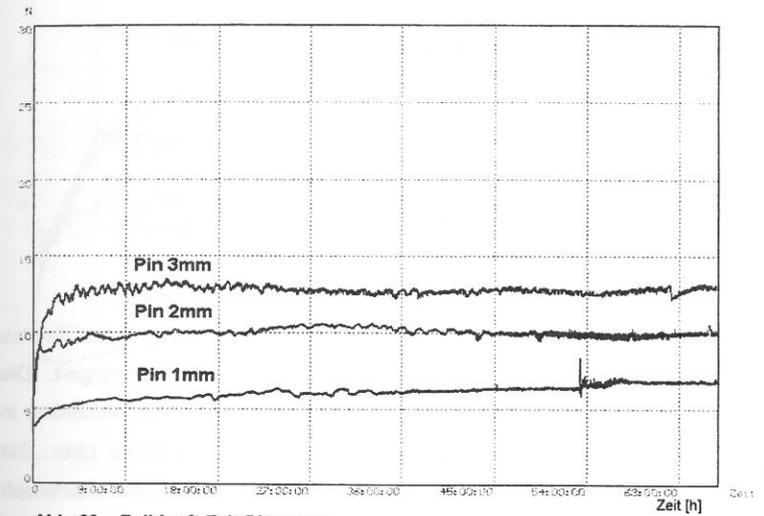


Abb. 29 Reibkraft-Zeit-Diagramm

### 4.2.3 Auswertung von Verschleiß-Zeit-Diagrammen unterschiedlicher Werkstoffe

Um das Abriebverhalten verschiedener Werkstoffe vergleichen zu können, wurde die Software der Maschine so ausgelegt, daß mehrere Meßkurven in ein Diagramm eingeblendet werden können. Abb. 30 zeigt das Verschleiß-Zeit-Diagramm der in dieser Studie getesteten Werkstoffe ( Pindurchmesser: 2mm, Last: 25 N).

Höhenverlust [ $\mu\text{m}$ ]

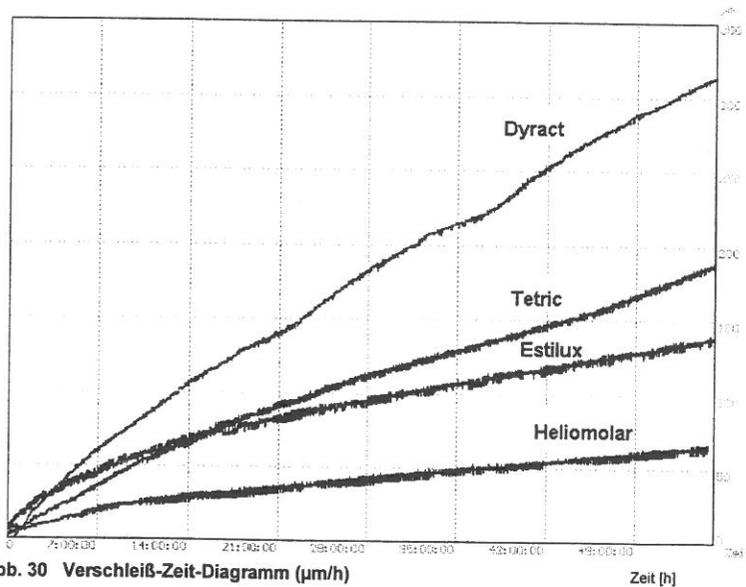


Abb. 30 Verschleiß-Zeit-Diagramm ( $\mu\text{m}/\text{h}$ )

Alle Kurven lassen erkennen, daß der pro Zeiteinheit stattfindende Materialabrieb anfänglich hoch liegt und sich ab einem gewissen Zeitpunkt verringert. Die Verschleißraten beim 2-Medien-Abrieb liegen initial hoch und gehen allmählich in eine steady-state-Phase des linearen, jedoch geringeren Verschleißes über. Der Zeitpunkt dieses Überganges sowie die Höhe der Verschleißrate ist charakteristisch für die jeweils verwendete Materialpaarung bei der beschriebenen Oberflächenbehandlung.

Vergleicht man die Höhe der Verschleißwerte der jeweils getesteten Materialien zu Versuchsende, so läßt sich ein übereinstimmendes Ranking der mittels des Münchner Kausimulators erhaltenen Verschleißwerte feststellen (SCHNABEL, 1994). Die In-vitro-Abribsimulation des Münchner Kausimulators kann als „artverwandt“ bezeichnet werden, da es sich, ebenso wie bei der Pin-on-Disk-Simulation, um ein 2-Medien-Abrieb-Simulationsverfahren handelt. Eine Übersicht über den zeitlichen Verlauf der Verschleißraten ist dem Kapitel 5.5 zu entnehmen.

### 4.2.4 Reibkraft-Zeit-Diagramme unterschiedlicher Werkstoffe bei konstantem Pindurchmesser

Ebenso wie die Abribskurven können auch die Reibkraftkurven verschiedener Materialien in einem Diagramm (Abb.31) dargestellt werden.

Reibkraft [N]

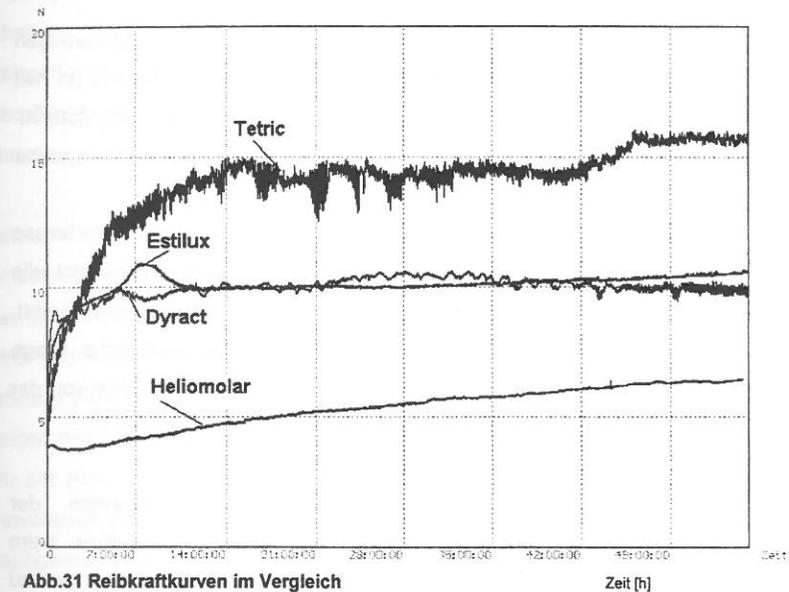


Abb.31 Reibkraftkurven im Vergleich

Dem Diagramm ist ein für alle getesteten Materialien gleicher Reibkraftwert zu Versuchsbeginn zu entnehmen.

Der initiale Reibkoeffizient beträgt demnach 0,18 ( $\mu = F(R) / F(N)$ ,  $F(N) = 25 \text{ N}$ ). Er hängt von der in der Vorbehandlung erzeugten Oberflächenrauigkeit ab (siehe Kapitel 4.1) und hat keinen Einfluß auf die Reibung nach Ablauf des „running-in“.

Im weiteren Versuchsverlauf erfolgt eine für die jeweilige Materialpaarung charakteristische Änderung der Reibkraftwerte. Die Höhe der Reibkraft pendelt sich schließlich auf ein bestimmtes, annähernd gleichbleibendes Niveau ein.

Ein verhältnismäßig hohes Steady-state-Reibkraftniveau läßt sich für das Material Tetric erkennen. Die mit Abstand geringsten Reibkraftwerte lassen sich für das Mikrofüllerkomposit Heliomolar RO beobachten. Estilux HS Hybrid und Dyract dagegen liegen in mittleren, jedoch annähernd gleichen Bereichen. Eine eingehende Diskussion des zeitlichen Verlaufs der Reibkraftkurven findet sich in Kapitel 6.4 .

#### **4.2.5 Variation der Antagonistenform**

WASSEL ET AL. (1994) raten grundsätzlich zur Verwendung von kugelförmigen Antagonisten bei der 2-Medien-Abriebsimulation. Zylinderförmige Antagonisten hält er insofern für nachteilig, als ein Graben bzw. Schneiden der Kanten den Materialabrieb erheblich erhöhen könnte und in diesem Fall sogar ein anderer Verschleißmechanismus vorliegen würde.

Andererseits wird bei Verwendung von Kugeln die Auswertung der Ergebnisse wesentlich erschwert, da sich bei immer tieferem Eindringen der Kugel die Berührfläche ständig vergrößert und somit die Flächenpressung immer geringer wird. Dadurch wird bei jeder Veränderung der Verschleißrate die zusätzliche Frage aufgeworfen, ob sie aus materialspezifischen Gründen entstand oder aber von der Veränderung der Flächenpressung herrührt.

Die genannte Problematik wurde bei unserer bisherigen Vorgehensweise der Antagonistenpräparation dadurch entschärft, daß die Kanten der Pins beim Einschleifen leicht verrundet werden, um überlagerte Schneidvorgänge zu vermeiden.

Aus diesen Überlegungen heraus wurde die Eignung des in dieser Studie eingesetzten Degussitpins überprüft. Deshalb wurden auch kugelförmige Antagonisten eingesetzt. Als Materialien wurden verwendet:

- Steatit (Kugelradius 3 mm): Ein in der Literatur oftmals erwähntes Material. Die Reibkoeffizienten sowie die Härte von Steatit soll dem Zahnschmelz sehr nahe sein (WASSEL und MC CABE 1994).
- Degussit (Kugelradius: 6 mm): Materialeigenschaften wie bereits beschrieben.

Zunächst wurde die Steatitkugel geprüft (Abb. 32). Aufgrund des massiven Abriebs des Antagonisten Steatit konnte der Versuch nicht über einen Zeitraum von 66 Stunden erfolgen und mußte bereits nach 18 Stunden abgebrochen werden. Bei dieser Kurve fällt der hohe Materialverlust auf. Innerhalb von nur 20 Stunden wurden  $1100 \mu\text{m}$  (Summenverschleiß) abgetragen. Schon makroskopisch läßt sich erkennen, daß der weitaus größte Anteil des Abriebs auf Seiten des Antagonisten stattgefunden hat. Die Steatitkugel wies nach dem Test eine spiegelglatte, plane Oberfläche auf, an der Probenscheibe hingegen läßt sich nur die Andeutung einer Abriebspur erahnen.

Bemerkenswert ist, daß die Abrasionskurve (Abb.32) eine Krümmung aufweist. Mit fortschreitender Versuchsdauer sinkt die Abriebgeschwindigkeit bzw. Verschleißrate. Bei länger andauerndem Versuch wird mehr und mehr von der Kugel abgetragen wird und somit die Reibfläche ständig vergrößert. Die Normalkraft wird auf eine größere Fläche verteilt. Es werden weniger Partikel pro Flächeneinheit von der Kugel gelöst, dafür aber ist die Fläche größer.

Ob der Abtrag insgesamt gleich bleibt, kann in diesem Prozess im Gegensatz zum Pinversuch jedoch nicht ohne komplexe mathematische Untersuchungen nachgewiesen werden.

Reibkraft [N]

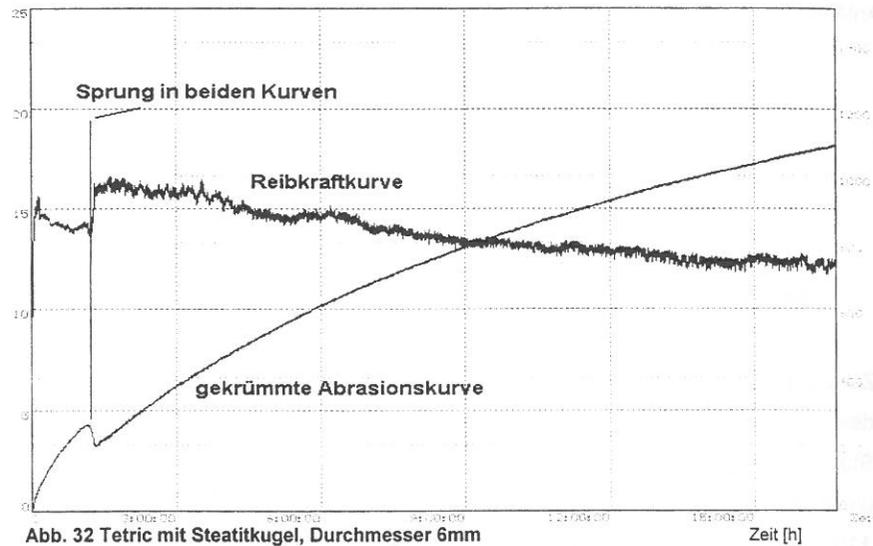
Höhenverlust [ $\mu\text{m}$ ]

Abb. 32 Tetric mit Steatitkugel, Durchmesser 6mm

Reibkraft [N]

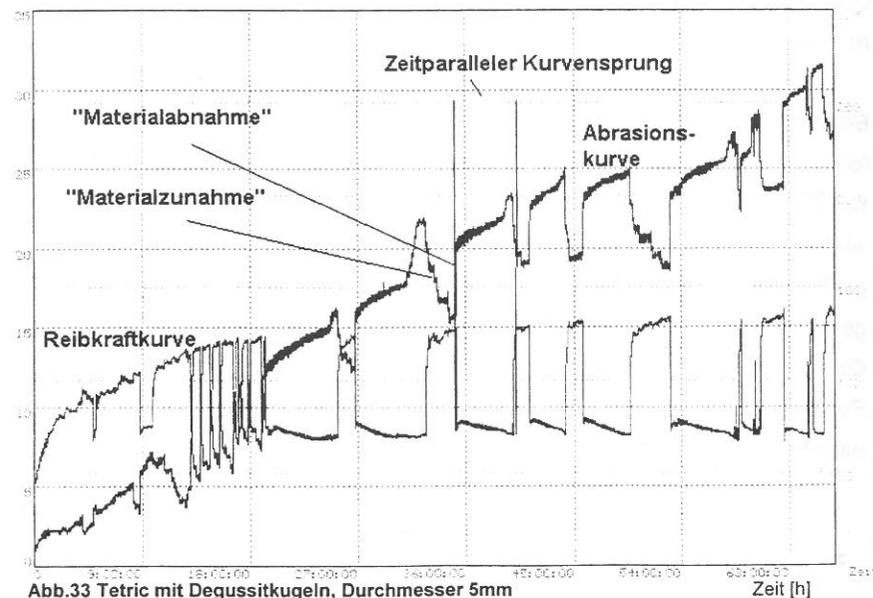
Höhenverlust [ $\mu\text{m}$ ]

Abb.33 Tetric mit Degussitkugeln, Durchmesser 5mm

Auf den ersten Blick sieht die Meßkurve (Abb. 33) der Degussitkugel völlig verwirrend aus. Man erkennt jedoch, daß die Sprünge in den Kurven nahezu spiegelbildlich verlaufen und zu exakt gleichen Zeitpunkten stattfinden. Widersprüchlich erscheint insbesondere, daß die Abrasionskurve zwischenzeitlich immer wieder abfällt, was ja im Grunde den Zuwachs von Material bedeuten würde. Dieser Zuwachs von immerhin bis zu  $50\mu\text{m}$  läßt sich mit der Ansammlung von Abrasionspartikeln zwischen Kugel und Disk erklären. Die Kugel „schwimmt“ zu gewissen Zeitabschnitten auf den Abriebpartikeln, bis sich diese sich unter der Kugel „hindurchgearbeitet“ haben und wieder der normale Reibvorgang gemessen wird. Die Ansammlung (einmal auch bei der Steatitkugel zu beobachten) kann folgende Ursachen haben:

- Die Berührfläche ist so groß, daß Verschleißpartikel nicht seitlich an der Kugel vorbeigleiten können.
- Die Kugelkrümmung wirkt als keilförmiger Trichter für die Partikel. Diese werden richtiggehend in den Spalt gekeilt, während ein rechtwinkliger, zylinderförmiger Pin die Partikel eher seitlich ausweichen läßt. (sofern maximale Planparallelität zur Scheibenfläche gegeben ist und ein Schneiden der Kanten ausgeschlossen werden kann.)  
Im Fall der Degussitkugel verstärkt bzw. verdeutlicht der große Krümmungsradius von 6mm diesen Effekt.

Eine Krümmung der Abrasionskurve läßt sich auch hier, analog zum Steatit, beobachten. Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß Steatit als Antagonist für unsere Pin-on-disk-Versuche aufgrund seiner hohen Verschleißrate ungeeignet erscheint. Der Einsatz von Degussitkugeln als Alternative zu Degussitpins hat vermutlich nur dann Sinn, wenn dünne Stifte mit kleinem Halbkreisradius verwendet würden, um den beschriebenen Keileffekt zu vermeiden. Derart beschaffene Stifte waren jedoch für diese Versuchsserien nicht zugänglich.

#### 4.2.6 Variation der Aushärtedauer:

Im Zusammenhang mit der Verschleißfestigkeit von Zahnersatzmaterialien erschien uns die Frage interessant, ob und inwieweit sich die Variation der Aushärtzeit der verwendeten Materialien auf das Verschleißverhalten auswirkt.

Dazu wurden die Materialproben einmal jeweils 90 Sekunden und einmal jeweils 720 Sekunden lang im Lichtofen (Translux XS, Fa. Kulzer) ausgehärtet. Nach dem Aushärten wurden die oberen Schichten mittels einer Drehbank entfernt und die inneren Schichten des Materials plangeschliffen. Die Testlaufdauer in der Pin-on-Disk-Maschine betrug auch hier 250.000 Zyklen, als Antagonisten dienten Degussitpins der Durchmesser 3 mm. Es ergaben sich folgende Kurvenverläufe:

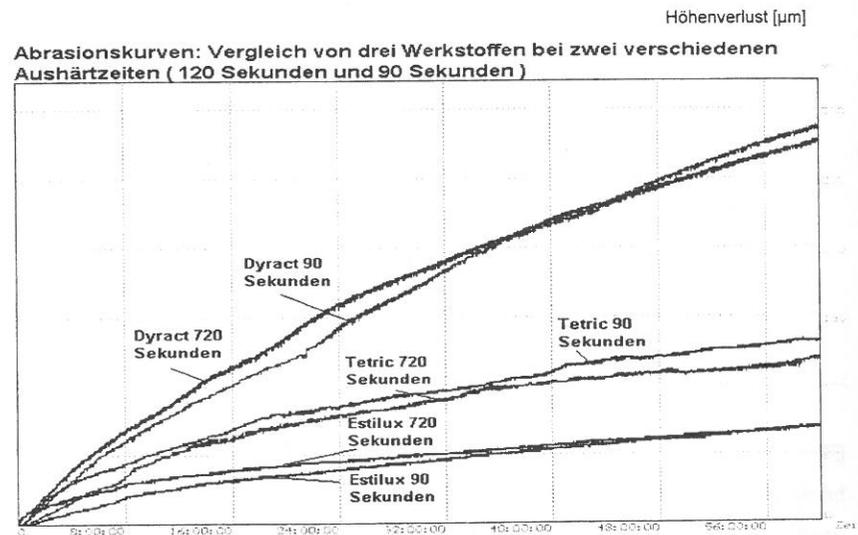


Abb.34 Abrasionskurven verschieden lang ausgehärteter Probenmaterialpaare Zeit [h]

Es ist zu erkennen, daß bei allen Materialien selbst bei 8-fach verlängerter Aushärtzeit kaum Unterschiede im Verschleißverhalten auftreten (Abb. 34). Die Unterschiede zwischen den Materialien an sich fallen weitaus stärker ins Gewicht. Auch diese Abrasionskurven weisen - verglichen mit den Kugelversuchen in abgeschwächter Form - eine leichte Krümmung auf. Demzufolge muß auch bei den

Pin-Versuchen davon ausgegangen werden, daß anfangs nicht die komplette Fläche des Pins in den Verschleißvorgang eingreift, sondern nur größere Teilflächen wirken. Im Laufe des Versuchs gleichen sich die Oberflächen schließlich soweit an, daß die gesamte Pinfläche zum Tragen kommt.

Bei den Reibkraftkurven (Abb. 35) ergibt sich ein ähnliches Bild wie bei den Abrasionskurven. Dominant bezüglich der Reibkraft zeigen sich die Materialeigenschaften, nicht jedoch die Aushärtzeiten.

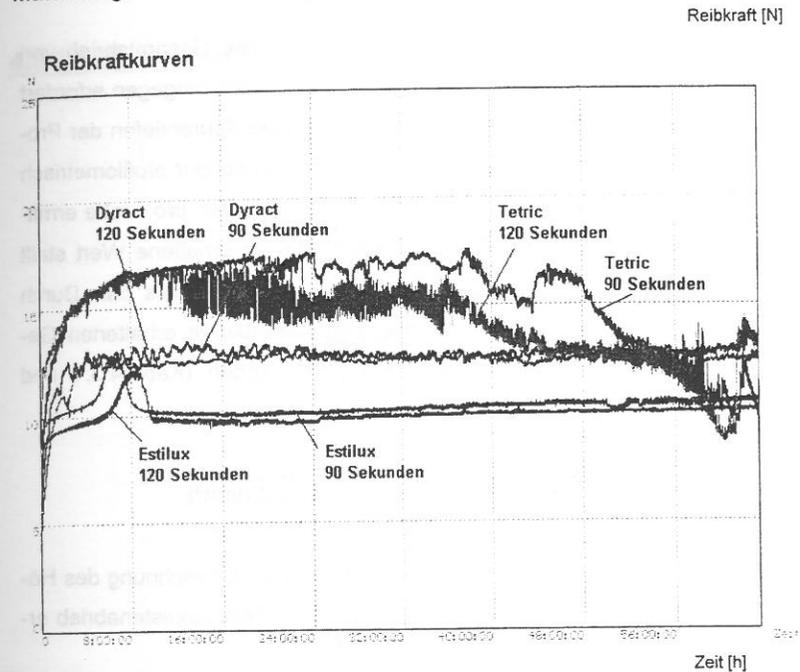


Abb.35 Reibkraftkurven verschieden lang ausgehärteter Probenmaterialpaare

Die Schwankungen in der Reibkraft (Reibkraftamplituden) müssen, insbesondere für den Werkstoff Tetric, mit dem Vorhandensein relativ großer Verschleißpartikel, die sich fortwährend zwischen Pin und Disk befinden, erklärt werden. Im Falle von Estilux HS Hybrid scheinen sich weniger Partikel zu lösen und zwischen Pin und Disk zu gelangen, wodurch sich ein weitaus ruhigerer Verlauf der Reibkraftkurve ergibt.

### 4.3 Auswertung der Meßergebnisse

Die Auswertung der mittels der Pin-on-disk Langzeittests erhaltenen Verschleiß/Zeit- sowie Reibkraft/Zeit-Diagramme erfolgte systematisch und in Teilschritten. Dazu vorab einige wichtige Erläuterungen:

- **Differenzierung von Proben- und Antagonistenabrieb:**

Wie bereits erwähnt, liefern uns die Verschleißdiagramme den Gesamtabrieb von Materialprobe und Antagonistenpin, eine detaillierte Interpretation hingegen erfordert deren Differenzierung. Hierzu wurden nach Versuchsende die Spurentiefen der Proben-scheiben an jeweils 5 äquidistanten Punkten quer zur Abriebspur profilometrisch manuell erfaßt (Profilometer Feinprüf Perthen, Göttingen). Aus den pro Probe ermittelten 5 Maximalwerten wurde der Mittelwert gebildet, der so erhaltene Wert stellt den reinen Materialabrieb (Höhenverlust in  $\mu\text{m}$ ) des Probenmaterials dar. Durch Subtraktion des Materialabriebs von dem mittels Verschleißkurve erhaltenen Gesamtabrieb konnte schließlich der Pinabrieb errechnet werden (Kap. 4.3.1 und 4.3.2).

- **Umrechnung von Höhenverlust ( $\mu\text{m}$ ) in Volumenverlust ( $\text{mm}^3$ )**

Zur Beurteilung und Interpretation der Ergebnisse erschien die Umrechnung des Höhenverlusts in Volumenverlust sinnvoll. Für den Proben- und Antagonistenabrieb erfolgte die Umrechnung wie folgt:

$$\text{nominaler Volumenverlust Pin} = \text{Pinradius}^2 \times 3,14 \times \text{Pinabrieb}$$

$$\text{nominaler Volumenverlust Disk} = (\text{Spurenradius aussen}^2 - \text{Spurenradius innen}^2) \times 3,14 \times \text{Spurentiefe}$$

Anmerkung: Der Aussenradius der Schleifspur betrug bei dieser Versuchsserie  $10\text{mm} + \text{Pindurchmesser}/2$

- **Ermittlung der Verschleißraten (Abriebgeschwindigkeit)**

Mittels mathematischer Ableitung der Verschleißkurven nach der Zeit konnten die Verschleißraten während der Testläufe ermittelt und übersichtlich dargestellt werden (Kap. 4.3.4).

Die folgenden Graphiken, Diagramme und Tabellen stellen die Auswertungen aller Pin-on-disk-Langzeitversuche dar. Eine eingehende Diskussion der Ergebnisse erfolgt in Kapitel 5.

#### 4.3.1 Differenzierte Darstellung des Abriebs von Probe und Pin

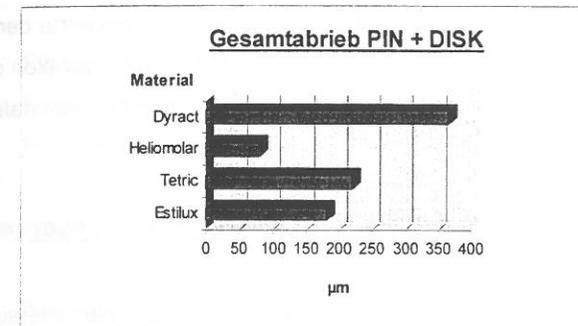


Abb. 36 Ergebnis der Abriebmessungen an der Pin-on-disk-Maschine

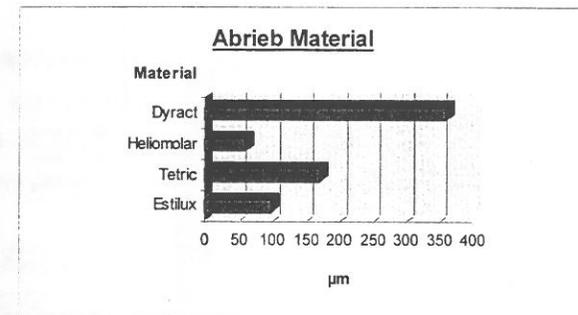


Abb. 37 Abrasionstiefen in den Proben-scheiben

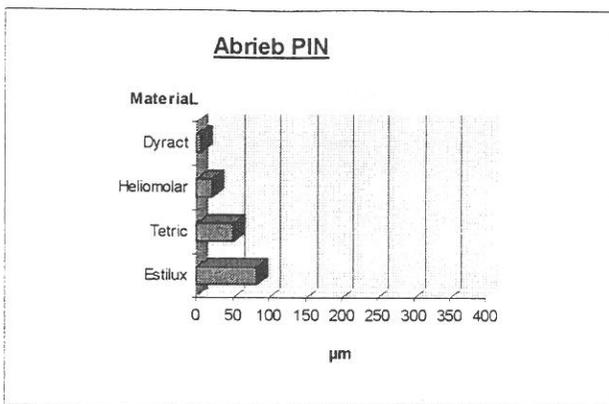


Abb. 38 Differenz von Pin-on-disk-Meßwert und Abrasionstiefe

In den Abbildungen (36, 37, 38) sind die differenzierten Abriebswerte der einzelnen Materialien einander gegenübergestellt. Als Grundlage für die Graphiken dienten die Verschleiß-Zeit-Diagramme unter Verwendung von 2-mm-Pins (nominale Flächenpressung von 8 N/mm<sup>2</sup>).

#### 4.3.2 Materialverschleiß bei Variation der Pindurchmesser

Das Balkendiagramm (Abb.39) zeigt den Gesamtabrieb [µm] der untersuchten Materialien mit dem Degussitantagonisten nach 250.000 Zyklen.

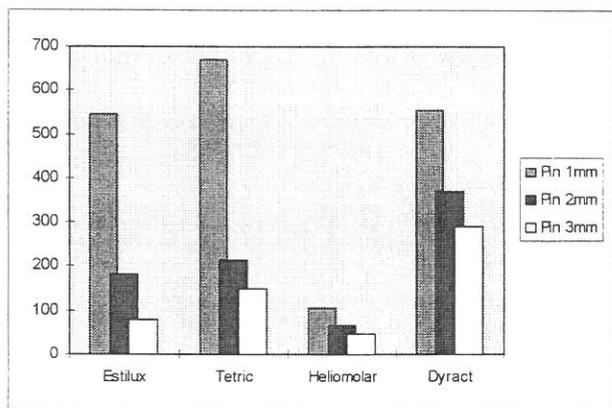


Abb. 39 Vergleich der Pin-on-disk-Meßwerte verschiedener Pindurchmesser

Erwartungsgemäß zeigt sich bei allen getesteten Materialien der höchste Materialverschleiß bei Verwendung von 1 mm-Degussitpins. Dies erklärt sich aus folgenden Zusammenhängen:

Die Variation der Pindurchmesser verändert die wirkende Reibfläche wie folgt:

$$\text{Pindurchmesser 1mm: Fläche} = r^2 \times \pi = 0,25 \times 3,14 = 0,79 \text{ mm}^2$$

$$\text{Pindurchmesser 2mm: Fläche} = r^2 \times \pi = 1 \times 3,14 = 3,14 \text{ mm}^2$$

$$\text{Pindurchmesser 3mm: Fläche} = r^2 \times \pi = 2,25 \times 3,14 = 7,07 \text{ mm}^2$$

Die auf den Pin wirkende Kraft beträgt 25 N. Daraus resultiert pro Flächeneinheit:

$$\text{Pindurchmesser 1mm: } 32 \text{ N / mm}^2$$

$$\text{Pindurchmesser 2mm: } 8 \text{ N / mm}^2$$

$$\text{Pindurchmesser 3mm: } 3,5 \text{ N / mm}^2$$

Für die unterschiedlichen Pindurchmesser betragen die Belastungsstufen:

- Für einen Pindurchmesser von 3 mm: 1 - fach (gesetzt),
- für einen Pindurchmesser von 2 mm: 2,3 - fach,
- für einen Pindurchmesser von 1 mm: 9.15 - fach

Diese Verhältnismäßigkeit läßt sich im Balkendiagramm (Tab 4.3.) bei den einzelnen Materialien nicht wiedererkennen. Der Abrieb mit dem 1 mm-Pin bei Estilux HS Hybrid beträgt ca. das 8.9 fache des 3mm - Pins bzw. der des 2mm - Pins das 4 - fache des 3mm-Pins. Bei Heliomolar RO ist dieses Verhältnis stark verschoben.

Pindurchm.	3mm	2mm	1mm
Estilux HS Hybrid	1	4	8,9
Tetric	1	1,5	4,6
Dyract	1	1,31	2,0
Heliomolar RO	1	1,4	2,2

Tab. 4.3 Verhältnismäßigkeit Verschleiß/ Pindurchmesser

### 4.3.3 Volumenverluste von Probe und Pin im Vergleich

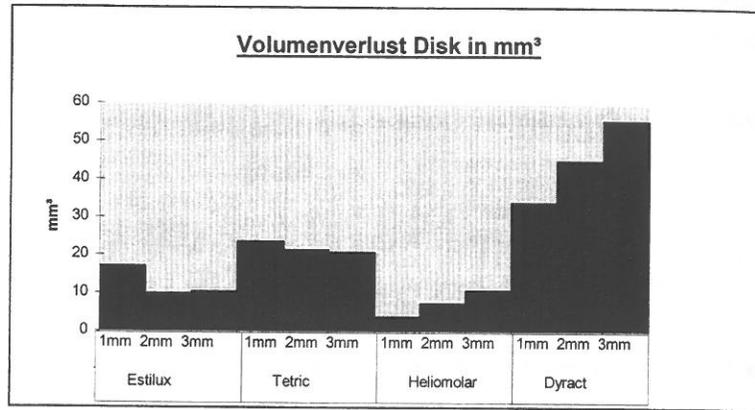


Abb. 40 Volumenverluste bei verschiedenen Pindurchmessern

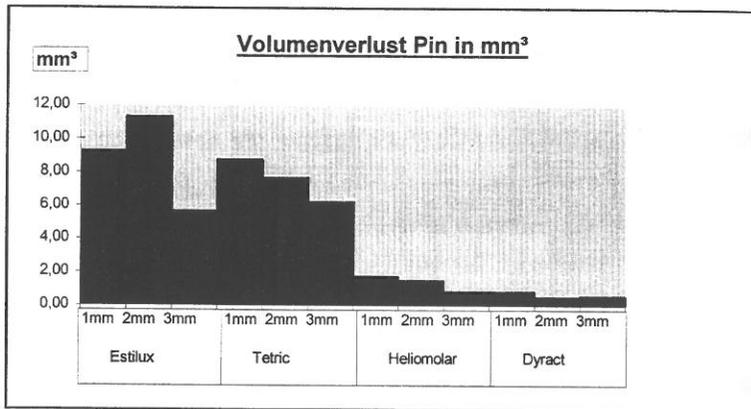


Abb. 41 Volumenverlust der Pins verschiedener Durchmesser

### 4.3.4 Übersicht über den zeitlichen Verlauf der Verschleißraten

Die Verschleißrate wurde nach folgender Formel mittels der Abriebstiefen  $h$  zu den Zeitpunkten  $t$  bestimmt.

$$\begin{aligned} \text{Verschleißrate} &= \\ \frac{\text{Abriebstiefe}_{\text{Zeitpunkt 2}} - \text{Abriebstiefe}_{\text{Zeitpunkt 1}}}{\text{Zeitpunkt 2} - \text{Zeitpunkt 1}} &= \\ &= \frac{h_{t_2} - h_{t_1}}{t_2 - t_1} \end{aligned}$$

Zwischen den auf diese Weise errechneten einzelnen Abriebsgeschwindigkeitswerten wurde interpoliert.

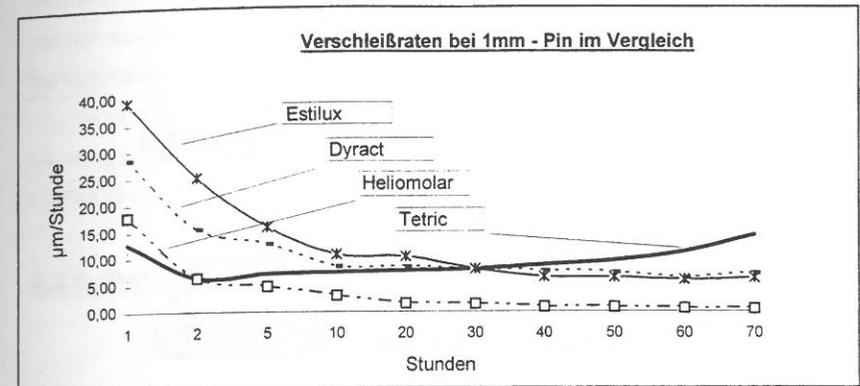


Abb.42 Ableitung Abriebsgeschwindigkeit nach der Zeit (1mm-Pin)

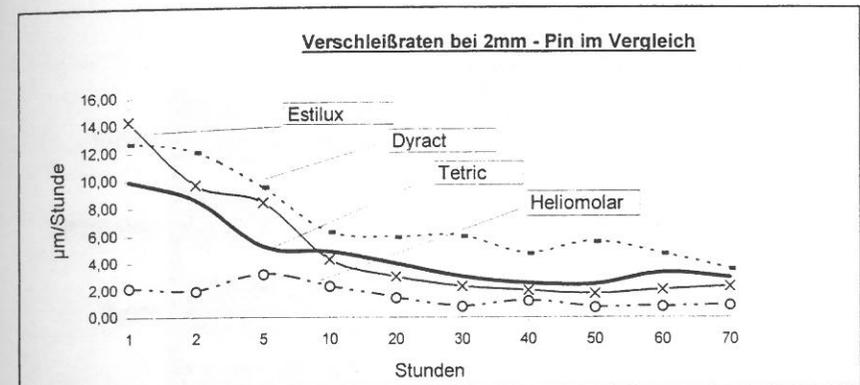


Abb.43 Ableitung der Abriebsgeschwindigkeit nach der Zeit (2mm-Pin)

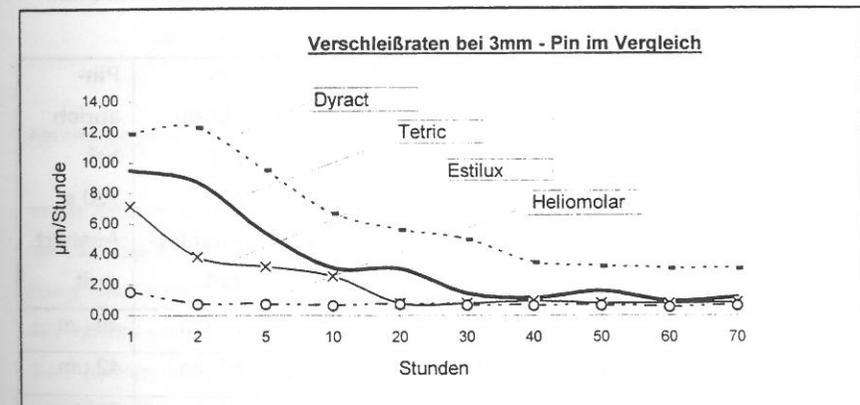


Abb.44 Ableitung der Abriebsgeschwindigkeit nach der Zeit (3mm-Pin)

#### 4.3.5 Materialabrieb bei Variation der Aushärtzeit

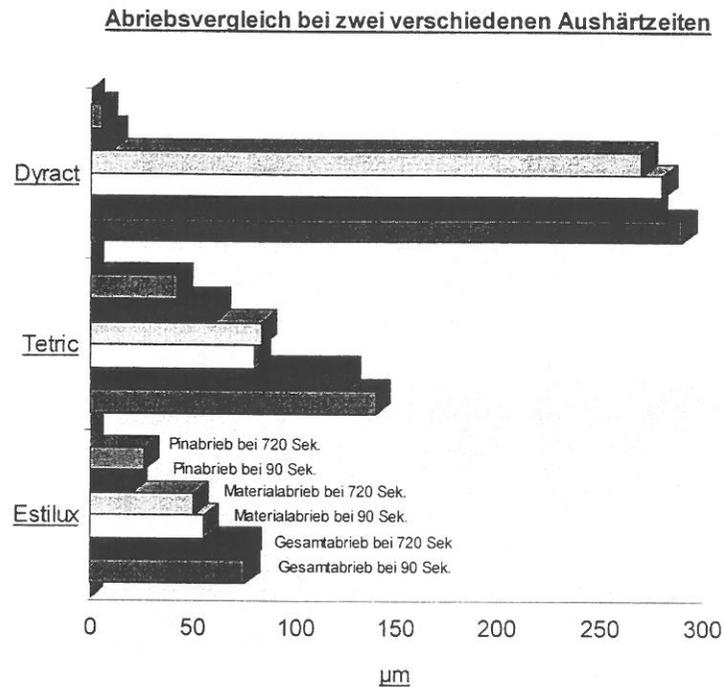


Abb.45 Gesamtüberblick aller ermittelten Abriebswerte bei der Variation der Aushärtzeiten

	Gesamt- abrieb bei 90 s Aushärt- zeit	Gesamt- abrieb bei 720 s Aushärt- zeit	Material- abrieb bei 90 s Aushärt- zeit	Material- abrieb bei 720 s Aushärt- zeit	Pin- abrieb bei 90 s Aushärt- zeit	Pin- abrieb bei 720 s Aushärt- zeit
Estilux	75 µm	77 µm	54 µm	50 µm	20 µm	26 µm
Tetric	139 µm	126 µm	79 µm	83 µm	59 µm	42 µm
Dyract	289 µm	277 µm	279 µm	271 µm	11 µm	5 µm

Tab.4.4 Gesamtüberblick aller ermittelten Abriebswerte bei der Variation der Aushärtzeiten

Abb. 45 sowie die Tabelle 4.4 zeigen deutlich, daß die Abriebsmengen bei diesem Test ausschließlich von den Materialtypen bestimmt werden. Bei 8-fach erhöhter Aushärtzeit von 720 Sekunden konnte keine Änderung der Meßergebnisse nachgewiesen werden. Die sichtbaren Schwankungen liegen im Bereich des Reproduzierbarkeitsfehlers. Die größte Abweichung in dieser Versuchsreihe liegt beim Pinabrieb von Tetric. Der Unterschied beträgt hier 17 µm.

Diese geringe Schwankungsbreite läßt keine Schlußfolgerungen hinsichtlich des Einflusses der Aushärtzeit bezüglich der Abriebsfestigkeit der Materialien zu.

#### 4.3.6. Materialabrieb (µm) bei unterschiedlicher Antagonistenform

**Vergleich des Materialabriebs bei verschiedenen Antagonisten**

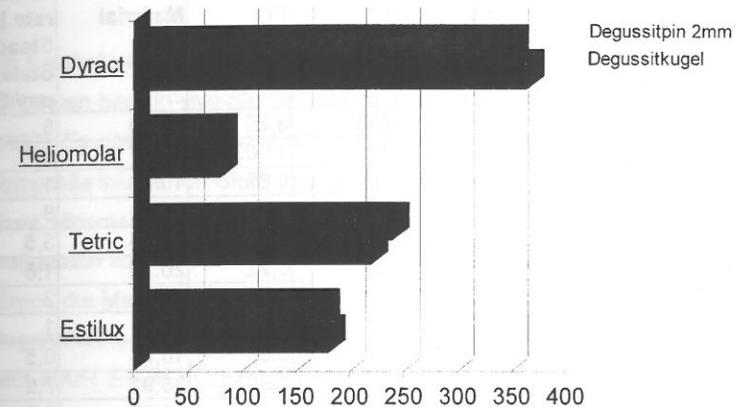


Abb. 46 Überblick Abriebswerte (µm) bei der Variation der Antagonistenform

In der Versuchreihe „Vergleich von Degussitpin - Durchmessern“ konnten wir beobachten, daß die Abrasionstiefe unter anderem von der Größe der Berührfläche abhängt. Die dargestellten Abriebsmengen von Pin und Kugel sind in diesem Fall (Abb. 46) nahezu identisch. Dies erklärt sich dadurch, daß für diese Graphik derjenige Pindurchmesser ausgewählt wurde, der von den Versuchsergebnissen her den Ergebnissen mit der Kugel am nächsten lag. Abbildung 46 zeigt, daß der Unterschied zwi-

schen Pin und Kugel als Antagonistenform bei Langzeitversuchen nicht relevant ist. Dies läßt sich vermutlich dadurch erklären, daß die scharfe Kante des Pins beim Reibvorgang schnell verrundet wird und somit eine kugelhähnliche Form entsteht.

#### 4.3.7 Tabellarische Gesamtübersicht der ermittelten Werte

In folgender Tabelle sind alle ermittelten Versuchsergebnisse bei den hier empfohlenen Versuchsparametern sowie sich daraus errechenbare Größen aufgeführt. Vergleiche zu anderen In-vitro-Studien können anhand dieser Tabelle (Tab. 4.5) gezogen werden. Versuchsparameter:

Spurenradius 10mm, 250.000 Zyklen, Gleitgeschwindigkeit 1 Zyklus / Sekunde, Normalkraft 25 N

	Gesamt-abrieb in µm Tiefe	Material-abrieb in µm Tiefe	Pin-abrieb in µm	Volumen-verlust in mm <sup>3</sup>	Volumen-verlust Material in mm <sup>3</sup>	Ver-schleiss-rate bei Steady State in µm/ Std
Estilux / 1mm Pin	565	270	295	9,26	16,96	8
Estilux / 2mm Pin	168	120	48	11,03	15,07	3
Estilux / 3mm Pin	75	55	20	5,65	10,36	1
Tetric / 1mm Pin	654	376	278	8,73	23,61	8
Tetric / 2mm Pin	231	170	61	7,66	21,35	3,5
Tetric / 3mm Pin	132	110	22	6,22	20,72	1,5
Heliomolar / 1mm Pin	116	60	56	1,76	3,77	2
Heliomolar / 2mm Pin	70	58	12	1,51	7,28	1
Heliomolar / 3mm Pin	60	57	3	0,85	10,74	0,5
Dyract / 1mm Pin	567	541	27	0,85	33,91	7,5
Dyract / 2mm Pin	362	358	4	0,50	44,96	5,5
Dyract / 3mm Pin	296	294	2	0,57	55,39	4

Tab. 4.5 Gesamtübersicht der ermittelten Meßwerte zum Vergleich mit anderen In-vitro-Studien

## 5 Diskussion

### 5.1 Unterschiedliche Abrasionsfestigkeit (ranking) der im Langzeitversuch getesteten Füllungsmaterialien

In Bezug auf die Verschleißfestigkeit erzielte das mikrogefüllte Komposit Heliomolar RO die besten Ergebnisse (s. Kap. 4.3.7), gefolgt von den Hybridkompositen Estilux HS Hybrid und Tetric. Das Kompomer Dyract hatte erwartungsgemäß die schlechtesten Abriebwerte (Abb. 30). Ein übereinstimmendes ranking dieser Materialien konnte mittels des Münchner Kausimulators, bei dem es sich ebenso um ein 2-Medien-Simulationsverfahren handelt, festgestellt werden. Auch WASSEL ET AL. (1994) konnte mit seinem reciprocating sliding-wear-tester zeigen, daß beim 2-Medien-Abrieb Hybridkomposite schlechter abschneiden als mikrogefüllte Komposite.

Die Ergebnisse bezüglich Verschleißfestigkeit decken sich auch mit klinischen Beobachtungen bzw. In-vivo-Studien von HEYMAN ET AL. (1986) und MAZER ET AL. (1992). Es gibt unterschiedliche Erklärungen dafür, wie es zu Materialverlust dentaler Komposite infolge von Gleitvorgängen kommen kann.

Ganz allgemein kann man aber sagen, daß 2-Medien-Abrieb dentaler Komposite maßgeblich von der Art, Form, Größe, Ausrichtung und dem Volumenanteil der Füllkörper, der Matrix sowie von der Art und den Eigenschaften des jeweils verwendeten Gegenkörpers beeinflusst wird (SCHNABEL ET AL. 1993).

Laut MAIR ET AL. (1996) beziehen sich die wesentlichen Überlegungen bei der Neuentwicklung von Kompositen für den Seitenzahnbereich darauf, die Verschleißfestigkeit dadurch zu verbessern, daß die Partikelgröße sowie der Abstand zwischen den Partikeln so klein wie möglich gehalten wird. Je kleiner die Partikel, umso weniger können diese während des Gleitvorgangs aus der Oberfläche herausragen, die Oberfläche der Abriebspur bleibt verhältnismäßig glatt, abrasive Prozesse werden dadurch minimiert.

Kleine Füllpartikel bedingen geringen Abstand untereinander. BAYNE ET AL. (1992) stellten die Hypothese auf, daß die weniger abriebstabile Matrix dadurch eher geschützt wird.

Dies könnte eine mögliche Erklärung für den geringen 2-Medien-Verschleiß von mikrogefüllten Kompositen sein.

Desweiteren können während des Gleitvorgangs herausgebrochene Füllkörper, die sich in der Abriebspur befinden, als zusätzliches Abrasivum fungieren und den Abrieb erhöhen. Im Falle von Hybridkompositen, die im Vergleich zu Mikrofüllern größere Füllkörper enthalten, bedeuten größere Partikel in der Spur auch verhältnismäßig mehr Abrieb.

Man nimmt an, daß weniger, aber größere Füllkörper auch weniger Kontakt- bzw. Reibfläche bieten als Werkstoffe mit kleineren, aber kompakter angeordneten Füllkörpern (Mikrofüller). Geringere Reibfläche bei definierter Reibkraft bedeutet eine Erhöhung des lokalen Druckes. Die Füllkörper übertragen diesen Druck direkt auf die sie umgebende Matrix (große Füllkörper können mehr Druck übertragen als kleine) und komprimieren diese. Infolge der unterschiedlichen E-Module von Füllkörpern und organischer Matrix kommt es zu internen Spannungen, die sich in einer Bildung von Mikrorissen innerhalb der Matrix äußern. Bei fortbestehendem Reibvorgang werden diese Mikrorisse immer größer, verbinden sich untereinander und führen schließlich zum kompletten Ausbruch aus dem Gefüge (LEINFELDER ET AL. 1986).

## **5.2 Unterschiedliche Abrasivität der Materialien auf den Antagonisten**

Bei der Untersuchung der Verschleißfestigkeit von Werkstoffen sollte auch deren Wirkung auf den Gegenzahn bzw. Antagonisten nicht außer Acht gelassen werden (MAIR ET AL. 1996).

Übereinstimmend mit WASSEL ET AL. (1994), konnte festgestellt werden, daß Hybridkomposite ein deutlich abrasiveres Verhalten gegenüber dem Antagonisten aufweisen als mikrogefüllte Komposite.

Innerhalb der Gruppe der Hybride erwies sich in unserer Studie Estilux HS Hybrid im Gegensatz zu Tetric als abrasiver, Dyract war erwartungsgemäß als am wenigsten abrasiv am Antagonisten.

Die Tribophysik definiert Abrasion folgendermaßen: Abrasion ist Materialverlust durch ritzende Beanspruchung, die dadurch bedingt ist, daß der Gegenkörper wesentlich härter und rauher ist als der tribologisch beanspruchte Grundkörper (ZUM GAHR 1987, CZICHOS 1986)

Dentale Komposite bestehen im Wesentlichen aus einer harten (Füllkörper) und aus einer weichen Komponente (organische Matrix).

Die Abrasivität eines Komposits wird demnach mit Sicherheit von der harten Komponente, also den Füllkörpern, beeinflusst. Die materialbedingte Rauigkeit hängt wiederum von deren Größe und Verteilungsmuster ab.

Je mehr ein Füllkörper aus der Oberfläche herausragt und je größer er ist, desto abrasiver wird er auf den Antagonisten wirken (Sandpapier-Effekt).

Ganz allgemein kann man also sagen, daß die Abrasivität eines Werkstoffes von der Größe und Härte der Partikel abhängt, sowie davon, wie weit diese aus der Oberfläche herausragen (MAIR ET AL. 1996).

Nicht nur herausragende Füller, sondern auch während des Reibvorgangs herausgebrochene, sich in der Abriebspur befindliche Partikel wirken nicht nur auf das Material selbst, sondern auch auf den Gegenkörper abrasiv.

Infolge der kleinen Füllkörper bei Mikrofüllern (0,04 µm) läßt sich auch noch nach längerer Testlaufdauer eine im Vergleich zu Hybridkompositen relativ glatte Schleifspur nachweisen. Dies könnte eine mögliche Erklärung für deren geringe Abrasivität sein. Auch der vergleichsweise geringere Füllgehalt von Mikrofüllern kann deren weniger destruktives Verhalten auf den Antagonisten erklären (EMBONG ET AL.).

Der relativ hohe Pinabrieb bei Estilux HS Hybrid im Gegensatz zu Tetric läßt sich vermutlich damit erklären, daß zum einen die Füllpartikel im Durchschnitt größer sind (8,8 µm bei Estilux HS Hybrid im Gegensatz zu 3 µm bei Tetric), zum anderen Estilux HS Hybrid auch das härtere Material (ca. 30%) von beiden darstellt.

### 5.3 Zeitlicher Verlauf der Verschleißkurven

Immer wieder wird in der zahnmedizinischen Materialforschung (KREJCI 1990, ROULET 1980, LEINFELDER 1985) darauf hingewiesen, daß bei 2-Medien-Abriebstests in-vitro der beobachtete Materialabrieb nicht zeitlich linear verlief, sondern anfänglich relativ hoch lag und im weiteren Verlauf allmählich wieder abflachte. Im Gegensatz zu vorliegender Arbeit konnte bei diesen In-vitro-Verschleißstudien der Verlauf der Abrasion nicht kontinuierlich (Online-Abrasionsmessung) sondern regelmäßig zu empirisch festgelegten Zeitabständen aufgezeichnet und beurteilt werden. Dazu mußten die Testläufe jedesmal gestoppt werden.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit konnte diese Beobachtung ebenfalls aufgezeigt und bestätigt werden. ( siehe Abb. 30, 34, 42, 43, 44 )

KREJCI (1990) führt die allmähliche Abflachung der Verschleißkurven darauf zurück, daß infolge der sich vergrößernden okkludierenden Flächen die Flächenpressung und damit der Materialabrieb allmählich sinkt.

LEINFELDER (1985) sieht eine mögliche Ursache des initial erhöhten Abriebs in der Traumatisierung der Füllungsoberfläche beim Ausarbeiten (oberflächliche Kompositdesintegration).

Vermutlich liegt die Ursache für die anfänglich erhöhte Verschleißrate in einem gegenseitigen Einschleifvorgang der tribologisch beanspruchten Oberflächen von Probe und Antagonist begründet. Man nennt diese erste Phase running-in-Periode. Diese dauert, je nach Testbedingungen sowie verwendeter Materialpaarung, unterschiedlich lange und führt zu ausgeglichenen Oberflächenbedingungen. Schließlich wird diese initiale Phase des running-in von der steady-state-Phase des linearen Verschleißes abgelöst ( Abb.15 ).

Zur Verdeutlichung dieser Phänomene erfolgte im Rahmen dieser Arbeit die mathematische Umrechnung der zeitlichen Veränderung der Spurentiefe in Verschleißraten bzw. Abriebgeschwindigkeit.

Bei allen von uns getesteten Materialien zeigte der zeitliche Verlauf dieser Kurven (Abb. 42, 43, 44) eine initial hohe Verschleißrate (running-in), die allmählich absank und von der linearen steady-state-Verschleißrate abgelöst wurde.

Im Fall des Werkstoffs Tetric unter Verwendung eines 1 mm-Pins konnte nach der linearen steady-state-Phase ein plötzlicher Anstieg der Verschleißrate beobachtet werden (Abb.26, Abb. 42). Eine mögliche Erklärung für diese Beobachtung mag in dem Hinzukommen einer weiteren Verschleißkomponente - zusätzlich zu dem bei dieser Art von Testverfahren vorherrschenden abrasiven Verschleißmechanismus - zu finden sein. Man nennt diese Komponente „Materialermüdung“ (fatigue). Dabei handelt es sich um einen Verschleißmechanismus, bei dem es infolge wiederholter tribologischer Beanspruchungen zu Scherspannungen kommt, die die Entstehung von Mikrorissen unterhalb der Oberfläche bewirken. Infolge weiterer Beanspruchung verbinden sich diese untereinander, bis es zum Ausbrechen relativ großer, lamellenförmigen Verschleißpartikeln kommt. SUH (1987) nennt daher diese Art von Verschleiß „delamination wear“. Das Herausbrechen relativ großer Schollen bedeutet nicht nur Materialverlust der Probe sondern erhöht auch die Oberflächenrauigkeit der Spur. Gemeinsam mit sich in der Spur befindlichen Abriebpartikeln ist somit eine Grundlage für noch höheren Abrieb geschaffen und die Verschleißrate steigt überproportional, bis es zur kompletten Zerstörung der Oberfläche und damit zur Untauglichkeit des Füllungswerkstoffes kommt.

Ein plötzlicher Anstieg der Verschleißrate nach längerer Testdauer konnten auch von MC KINNEY ET AL. (1982) im Rahmen seiner Pin-on-disk-Abriebversuche festgestellt werden und wurde als „Materialermüdung“ interpretiert. Allerdings verwendete er für seine Versuche Stahlantagonisten bei einer Flächenpressung von 10 MPa. BAILEY ET AL. (1981) konnten mittels einer Pin-on-disk-Maschine bei Verwendung von Schmelzpins und einer Flächenpressung von 15 MPa bereits nach 0,5 Stunden Materialermüdung durch plötzlichen massiven Anstieg der Verschleißrate nachweisen.

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß beim 2-Medien-Abrieb im wesentlichen drei Phasen differenziert werden können:

1. Die Phase des running-in, in der sich die tribologisch beanspruchten Körper gegenseitig einschleifen, bis ausgeglichene Oberflächenbedingungen vorherrschen.

2. Die steady-state-Phase des linearen Abriebs

3. Die Ermüdungsphase, die schließlich zur kompletten Zerstörung der Werkstoffoberfläche führt.

Wann diese Phasen einsetzen bzw. wie lange sie andauern, hängt nicht nur von der Art der verwendeten Materialpaarungen, sondern ganz entscheidend auch von den jeweils verwendeten Versuchsbedingungen ab. Als Schlußfolgerung kann festgestellt werden, daß Materialvergleiche nur in der steady-state-Phase zulässig sind. Die Möglichkeit Online-Messung der Münchner Pin-on-disk-Maschine macht diese Phase sehr gut sichtbar bzw. protokollierbar

### 5.5 Zeitlicher Verlauf der Reibkraftkurven - Reibkoeffizient

Die Aufzeichnung der Reibkraft  $F(R)$  stellt neben der Abriebmessung eine wichtige Komponente bei der Beurteilung tribologischer Vorgänge dar (CZICHOS 1987)

Die Höhe der Reibkraft  $F(R)$  steht mit dem Reibkoeffizienten „ $\mu$ “ in folgender Beziehung:

$$\mu = F(R) / F(N)$$

Da bei sämtlichen Testläufen der vorliegenden Arbeit eine konstante Normalkraft  $F(N)$  von 25 N verwendet wurde, kann auf eine Umrechnung der Reibkraftwerte in Reibkoeffizienten  $\mu$  verzichtet werden. Für die Beurteilung von Verschleißvorgängen ist lediglich die zeitliche Änderung des Reibkoeffizienten von Relevanz.

In der tribologischen Literatur (SUH, 1987) wird darauf hingewiesen, daß der initiale Wert des Reibkoeffizienten unabhängig von den Materialien und den Testbedingungen 0,1 - 0,2 beträgt. Während des folgenden Reibvorganges ist die Höhe des Reibkoeffizienten gewissen Änderungen unterworfen.

Diese Änderungen sind, ganz im Gegensatz zum initialen Wert, auf materialbedingte Faktoren zurückzuführen und resultieren aus dem Zusammenwirken sämtlicher am

Verschleißvorgang beteiligten Komponenten. Die verwendete Testapparatur kann demnach den Verlauf des Reibkoeffizienten maßgeblich beeinflussen.

Aussagen dieser Art konnten von uns anhand der mittels Pin-on-disk-Simulation erhaltenen Kraft-Zeit-Diagramme bestätigt werden (Abb. 15, 31). Der initiale Reibkoeffizient belief sich stets auf einen Wert von 0,18. Bei allen Reibkraftkurven zeigten sich insbesondere im frühen Gleitstadium Änderungen. Die initial geringe Reibkraft stieg dann allmählich auf ein für jedes Material charakteristisches steady-state-Niveau an (annähernd konstante Reibkraftwerte, Abb. 15, 31). Ähnliche Beobachtungen wurden auch von WASSEL ET AL. (1994) aufgezeigt. SUH (1986) und CZICHOS (1987) betonen nachhaltig, daß die Höhe der Reibkraft bei einem Reibvorgang von drei wesentlichen Komponenten bewirkt wird:

1. Durch Deformation von Rauheits-Spitzen,
2. durch „Eingraben“ von Verschleißpartikeln oder Oberflächen-spitzen des Antagonisten in den Werkstoff sowie
3. durch adhäsive Prozesse

Der relative Beitrag dieser drei Komponenten an der Höhe der Reibkraft hängt von den Versuchsbedingungen, der Art der verwendeten Materialien, deren Oberflächentopographie und dem umgebenden Medium ab.

Bei dem Hybridkomposit Estilux HS Hybrid konnte nach ca 6 Stunden Testlaufdauer ein interessantes Phänomen beobachtet werden (Abb 23). Nach der initialen Erhöhung des Reibkoeffizienten sank dieser plötzlich wieder und pendelte sich schließlich auf einen geringeren steady-state-Wert ein. Dieses Phänomen kann vermutlich auf einen gegenseitigen Poliervorgang zwischen Probe und Pin zurückgeführt werden, der zur Ausbildung glatter Oberflächen und dementsprechender Verringerung der Reibkraft führt. Insbesondere bei Estilux HS Hybrid konnte makroskopisch eine spiegelglatte Abriebfläche am Antagonisten nachgewiesen werden.

Auch die tribologische Literatur beschreibt dieses Phänomen und führt es vor allem auf die in diesem Fall wesentlich höhere Härte der stationären Komponente zurück (SUH 1986).

Die Modellvorstellung der Schulphysik (KUCHLING 1988), die Reibkraft sei unabhängig von der scheinbaren Kontaktfläche, konnte in unseren Testläufen bei Variation der Pindurchmesser nicht bestätigt werden.

In den meisten Fällen konnten bei größeren Pindurchmessern auch höhere steady-state-Reibkraftwerte beobachtet werden (siehe Diagramm Estilux HS Hybrid und Dy-ract) Laut SUH (1986) ist die Reibkraft direkt proportional zur aktuellen Kontaktfläche.

Eine Beziehung zwischen der Höhe der Reibkraft und der Verschleißrate bei tribologischen Vorgängen gilt nach wie vor als ungeklärt und konnte auch in unseren Pin-on-disk-Versuchen nicht eindeutig nachgewiesen werden.

Obwohl beide Komponenten mikroskopisch gesehen aus dem Zusammenspiel von Oberflächenspitzen resultieren, stellt sich gerade bei Kompositen die Situation wesentlich komplexer dar, da diese aus sich in ihrem physikalischen Verhalten erheblich unterschiedlich verhaltenden Komponenten zusammengesetzt sind (WASSEL ET AL. 1994).

In der zahnmedizinischen Literatur existieren diesbezüglich unterschiedliche Ansichten. DOUGLAS ET AL. (1985) betonte, die Verschleißfestigkeit von Kompositen könne erhöht werden, indem man den Reibkoeffizienten verringere.

Tendenzmäßig zeigen mikrogefüllte Komposite am ehesten eine direkte Beziehung zwischen Reibkraft und Verschleiß, vermutlich dadurch bedingt, daß hier der Gleitvorgang in struktureller Hinsicht eher als homogener Vorgang gesehen werden kann. Bei Kompositen mit größeren Füllkörpern dagegen stellt sich die Situation allein deshalb wesentlich komplexer dar, weil allein das Herausbrechen von Füllkörpern zu verhältnismäßig größeren strukturellen Änderungen führt (WASSEL ET AL. 1994).

Wenn man auch von einem direkten Bezug zwischen Reibkoeffizient und Materialabrieb absehen sollte, so liefert uns der Verlauf der Reibkraft eine wichtige Grundlage bzw. Werte, die zur Beurteilung und zum Verständnis von Verschleißvorgängen hinzugezogen werden können.

So kann uns der Verlauf der Reibkraft indirekten Einblick in Veränderungen im Gleitverhalten und den daraus resultierenden Verschleißmechanismen geben.

Eine Erhöhung der Reibkraft kann das Vorhandensein von Abriebpartikeln in der Schleifspur, eine Aufrauung der Oberfläche infolge ausgebrochener Füllpartikel, Risse oder Materialermüdung zur Ursache haben, eine Verringerung der Reibkraft auf das Vorhandensein glatter Oberflächen infolge stattgefundener Poliervorgänge hinweisen.

### **5.5 Einfluß des Pindurchmessers bzw. der Flächenpressung**

Wie bereits in Kapitel 3.4.1 erläutert, stehen die Variablen „Pindurchmesser“ und Flächenpressung in direkter Beziehung zueinander. Bei bekannter Normalkraft  $F(N)$  läßt sich für gegebenen Pindurchmesser die Flächenpressung direkt berechnen. Die in unseren Versuchen verwendete Normalkraft von 25 N ergibt für einen

Pindurchmesser von 3 mm eine Flächenpressung von 3,5 MPa,

Pindurchmesser von 2 mm eine Flächenpressung von 8 MPa,

Pindurchmesser von 1 mm eine Flächenpressung von 31 MPa.

Jede Oberfläche eines festen Körpers ist, mikroskopisch gesehen, aus Spitzen und Tälern zusammengesetzt. In der Tribophysik unterscheidet man daher die scheinbare von der realen Kontaktfläche. Man sollte sich dessen bewußt sein, daß sich derartige Umrechnungen natürlich nur auf die scheinbare Kontaktfläche beziehen können, Kontakt- bzw. Reibvorgänge hingegen nur an den sich berührenden Spitzen bzw. Arealen stattfinden.

Jeder Werkstoff hat eine ganz spezifische, materialbedingte Rauigkeit, insbesondere Komposite, die sich aus zwei erheblich differierenden Komponenten zusammensetzen.

Ein raueres Oberflächenprofil läßt weniger Flächen- bzw. Gleitkontakt zu, was zu entsprechend mehr Druckübertragung auf den Körper führt.

Schließlich hängt Materialverschleiß letztendlich davon ab, wieviel Gleitkontakt zwischen den beiden tribologisch beanspruchten Körpern zustandekommt (BAYNE ET AL. 1992).

Ein Komposit mit größeren Füllpartikeln weist im Gegensatz zum mikrogefüllten Komposit ein raueres Oberflächenprofil auf. Dadurch bedingter geringerer Gleit-

kontakt führt dazu, daß verhältnismäßig mehr Druck über die Füller auf die Matrix übertragen wird (SCHNABEL ET AL. 1993).

Die unterschiedlichen E-Moduli von Matrix und Füllkörper führen zu Scherspannungen und es kommt zu Mikrorissen innerhalb der Matrix, die letztendlich zu Materialverlust führen (LEINFELDER 1985).

Laut BAILEY ET AL. (1981) und MC KINNEY (1982) spielt beim 2-Medien-Verschleiß die Flächenpressung bei der Beurteilung von Verschleißvorgängen eine signifikante Rolle. Sie stellten fest, daß innerhalb eines bestimmten Bereiches der Flächenpressung die Verschleißrate konstant blieb. Eine Erhöhung des Drucks auf 14 MPa führte innerhalb kürzester Zeit zu Materialermüdung. Infolge des rapiden Anstiegs der Abriebgeschwindigkeit konnte keine Gesetzmäßigkeit mehr erkannt werden.

BAILEY ET AL. (1981) betonte daher nachhaltig, daß der Vergleich von Verschleißraten unterschiedlicher Werkstoffe nur unter Angabe der jeweiligen Flächenpressung Sinn hat, da diese den Verschleißvorgang, ja sogar den Verschleißmechanismus nachhaltig beeinflussen.

WASSEL ET AL. (1994) stellte mittels einer 2-Medien-Simulation, bei der er Komposite gegen eine Steatitkugel (Normalkraft von 25 N) reiben ließ, fest, daß die Verschleißrate bzw. Abriebgeschwindigkeit konstant blieb, obwohl sich mit der allmählichen Vergrößerung der Antagonistenfläche während des Reibvorgangs die Flächenpressung änderte.

Die Abb. 42, 43 und 44 veranschaulichen für jeden Werkstoff den mittels Pin-on-disk-Versuchen erhaltenen unterschiedlichen Verlauf der Verschleißraten bei Variation der Pindurchmesser. Die Hypothese, Variation der Flächenpressung übe keinen Einfluß auf die Verschleißrate aus, konnte für den Werkstoff Heliomolar RO bei allen 3 Pindurchmessern (1 mm, 2 mm, 3 mm) nachvollzogen werden. Bei den Hybridkompositen Estilux HS Hybrid und Tetric, aber auch beim Kompomer Dyract konnte folgende interessante Beobachtung gemacht werden: Für jeden der drei Werkstoffe konnte die annähernde Konstanz der Steady-state-Verschleißrate festgestellt werden, jedoch lediglich unter Verwendung von 2 mm- sowie 3 mm-Pins, also bei Flächenpressungen von 3,5 MPa und 8 MPa. Verwendete man hingegen 1 mm-Pins (31 MPa), so lagen bei diesen drei Werkstoffen die Verschleißraten in deutlich höhe-

ren Bereichen, beim Füllungsmaterial Tetric konnte sogar ein plötzlicher weiterer Anstieg der Abriebgeschwindigkeit von Material und Pin festgestellt werden. Diese Beobachtung läßt vermuten, daß bei bestimmten Flächenpressungen neben dem beim 2-Medien-Abrieb dominierenden abrasiven Verschleißmechanismus ein weiterer Mechanismus, nämlich Materialermüdung, hinzukommt. Diese Hypothese würde die Beobachtungen von MC KINNEY ET AL. (1982) und BAILEY ET AL. (1981) bestätigen. Die Tatsache, daß im Falle des Mikrofüllers Heliomolar RO dieses Phänomen nicht beobachtet werden konnte, liegt vermutlich darin, daß hier aufgrund der kleinen Füllpartikel und der dadurch bedingten geringeren, materialbedingten Rauigkeit, eine insgesamt bessere Verteilung des Druckes stattfinden kann. Eine Erhöhung der Flächenpressung wird sich dementsprechend nicht so drastisch auswirken wie bei einem rauheren Material, das bei gleicher Flächenpressung verhältnismäßig mehr Druck ins Werkstoffinnere weiterleitet. Eine weitere Erklärung dafür könnte auch sein, daß bedingt durch den geringeren Füllgehalt von Mikrofüllern insgesamt mehr Matrixraum zur Verfügung steht. Die elastische Matrix kann hierbei bei der Kraftübertragung wie ein Stoßdämpfer wirken und einen spannungsreduzierenden Effekt haben.

Zusammenfassend lassen sich also folgende Behauptungen aufstellen:

- Die Beziehung Flächenpressung - Verschleißverhalten muß für jedes Komposit differenziert betrachtet werden. Sie hängt von der Art des Komposits ab bzw. von der Art, Form, Größe und Verteilung der Füller in der Matrix, vom Füllgehalt, aber auch von den am Tribosystem beteiligten Komponenten (Wahl des Antagonistenmaterials).
- große Füllkörper übertragen bei gleicher Flächenpressung im Verhältnis mehr Druck ins Werkstoffinnere und auf die Matrix als kleine Füllkörper.
- Innerhalb bestimmter Bereiche der Flächenpressungen kann für einen bestimmten Werkstoff von einer Unabhängigkeit bzw. Kon-

stanz der Verschleißrate gesprochen werden und das Verschleißvolumen steigt linear mit der Testlaufdauer.

- Werden diese Bereiche aber überschritten bzw. kommt als weiterer Verschleißmechanismus Materialermüdung hinzu, so kann von keiner Relation oder Gesetzmäßigkeit mehr die Rede sein.

## **5.6 Potentiale der entwickelten Pin-on-disk-Maschine**

Die neu entwickelte und schrittweise optimierte Pin-on-disk-Maschine gestattet neben der 2-Medien-Abriebsimulation eine gleichzeitige Online-Aufzeichnung der wichtigsten tribologischen Kenndaten Reibung und Verschleiß. Dieser Prüfvorgang erfolgt vollautomatisch. Daher ist, im Gegensatz zu bisherigen 2-Medien-Simulationsverfahren, ein Reponieren der Materialproben nach deren Vermessung nicht mehr notwendig. Mittels speziell entwickelter Software werden während des Reibvorgangs Verschleiß-Zeit-Diagramme sowie Reibkraft-Zeit-Diagramme erstellt.

Die Pin-on-disk-Maschine bietet Flexibilität in der Auswahl zu verändernder Prüfparameter. Variablen wie Normalkraft, Relativgeschwindigkeit, Testlaufdauer oder umgebendes Zwischenmedium können gezielt variiert werden. Die während des Prüfvorgangs erstellten Verschleißdiagramme liefern uns folgende tribologische Einblicke:

- Neben Aussagen bezüglich des Abriebverhaltens unterschiedlicher Materialien (ranking) kann auch die Abrasivität von Werkstoffen gegenüber dem Antagonisten vergleichend beurteilt werden. Diese sind äußerst wichtige Kriterien bei der Vorauswahl und Beurteilung der klinischen Tauglichkeit eines Füllungsmaterials.
- Änderungen im Abriebverhalten lassen sich zeitlich festlegen und Rückschlüsse auf gewisse Änderungen des dominierenden Verschleißmechanismus ziehen. Beispielsweise läßt ein plötzlicher Anstieg der Verschleißrate beginnende Materialermüdung (Fatigue) vermuten.

Die Reibkraft-Zeit-Diagramme geben Einblick in Veränderungen der Oberflächentopographie, die wiederum Änderungen im Gleitverhalten bewirken können. Ein plötzlicher Anstieg der Reibkraft oder der Kraftamplitude innerhalb einer Kurve kann auf das Vorhandensein von Verschleißpartikeln hindeuten (Akkumulation von „wear-debris“ in der Schleifspur). Die Höhe der Reibkraftänderung wiederum läßt Rückschlüsse auf die Größe dieser Partikel zu (evtl. vorhandene Füllkörperagglomerate).

Auch die Sichtbarmachung unterschiedlicher Phasen eines Gleitvorgangs wie die running-in- oder steady-state-Phase ist möglich.

## **5.7. Optionen für zukünftige Pin-on-disk-Untersuchungen**

Im Laufe der Anwendung der Pin-on-disk-Maschine in Langzeit-Testläufen sowie bei der Bewertung der Meßergebnisse ergaben sich noch einige Methodenkritikpunkte, die durch zusätzliche Verbesserungen der Meßapparatur eliminiert werden könnten. Hier einige Überlegungen zur Weiterentwicklung der Maschine:

- Größter technischer Nachteil der Maschine ist die Beschränkung auf nur eine Probe. Bei über mehrere Tage hinweg andauernden Versuchen wird ein enorm großer Zeitraum für umfangreichere Studien benötigt. Daher wäre die Entwicklung einer Maschine mit mehreren Prüfkammern sinnvoll.
- Eine interessante Erweiterung bestünde in der Realisierung einer zweiten Online-Meßfassung für den Pinabrieb. Damit könnten Verschleißvorgänge zwischen Pin und Disk noch eingehender analysiert werden.
- Als weitere Verbesserung wäre eine automatische Nachfüllanlage für das destillierte Wasser zu nennen.

Das fortwährend nötige Nachfüllen aufgrund von Verdunstung könnte dadurch vermieden werden. Hierzu denkbar wäre ein ständiger Wasserdurchfluß:

Der Wasserzufluß könnte über eine Düse erfolgen, die unmittelbar auf die Schleifspur gerichtet ist (180° versetzt zum Pin). Auf diese Weise würden Abriebpartikel, die sich bislang in der Spur absetzen konnten, umgehend weggespült und über

den Abfluß abtransportiert werden. Das Sammelbecken für den Wasserkreislauf müsste großvolumig genug sein, damit das Wasser dort trotz des ständigen Durchflusses nahezu ruhen kann und sich die Verschleißpartikel zum Gefäßboden hin absenken können. Das zur Pin-on-disk-Maschine zugeführte Wasser würde auf diesem Wege automatisch gereinigt werden.

Darüberhinaus könnte man pro Kammer ein separates Sammelbecken evtl. mit Filter zur Untersuchung der Abriebspartikel vorsehen.

Die morphologische Analyse (REM) dieser Partikel könnte sich als sehr aufschlußreich erweisen.

- Die Aufsteckgewichte könnten nach einer anderen Methode geeicht werden: Anstatt z.B. 20 N auf einen 2mm - Pin wirken zu lassen, könnte man die Kraft pro Fläche (Flächenpressung) als Eichfaktor wählen. 3.14 N Gewicht auf einen 2 mm - Pin ergäben z.B.  $1 \text{ N} / \text{mm}^2 = 1 \text{ MPa}$  Druck zwischen den Reibflächen.

## 6 Zusammenfassung

Bei der an der Münchner Poliklinik neu entwickelten und optimierten Pin-on-disk-Maschine handelt es sich um eine In-vitro-Testapparatur, die Grundprinzipien des 2-Medien-Gleitverschleißes dentaler Werkstoffe simulieren soll.

Der entscheidende Vorteil dieser Maschine besteht - im Gegensatz zu allen bisherigen in der Zahnmedizin angewendeten Simulationsvorrichtungen - in einer zusätzlichen Komponente, die es gestattet, während des Reibvorgangs den zeitlichen Verlauf wichtiger tribologischer Kenndaten wie Reibung und Verschleiß aufzuzeichnen. (online-screening). Ein Reibung/Zeit- bzw. Abrieb/Zeit-Diagramm kann somit zu jeder Zeit erstellt werden.

Da jeder Verschleißvorgang von einer Reihe von Parametern maßgeblich beeinflusst wird, wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Auswahl von Parametern auf physiologische Gegebenheiten im Mund eingegrenzt. Eine standardisierte Vorgehensweise der Testläufe, die als wichtige Grundvoraussetzung für die Reproduzierbarkeit von Messungen gesehen werden muß, wurde möglich gemacht.

Um die Tauglichkeit der neuen Pin-on-disk-Apparatur zu prüfen und zu bestätigen, wurden in einer Reihe von Vorversuchen Parameter wie Flächenpressung, Gleitgeschwindigkeit, Umgebungstemperatur, Zwischenmedium, Rauigkeit sowie Testlaufdauer gezielt variiert.

In weiteren Langzeitversuchen wurde schließlich der Einfluß von Variablen wie Testlaufdauer, Flächenpressung, Aushärtzeit und Antagonistenform auf das Verschleißverhalten anhand von drei unterschiedlichen Kompositen sowie eines Komomers zeitlich verfolgt.

Die in der tribologischen Literatur oftmals zitierte running-in-Periode sowie die steady-state-Periode konnte sichtbar gemacht und zeitlich festgelegt werden.

Bezüglich der unterschiedlichen Verschleißfestigkeit der getesteten Materialien sowie deren abrasiver Wirkung auf den Antagonisten konnten Übereinstimmungen sowohl mit klinischen Beobachtungen als auch mit anderen in München durchgeführten 2-Medien-Simulationstests festgestellt werden.

Schließlich zeigte sich, daß es die neu entwickelte, optimierte Pin-on-disk-Maschine sogar gestattet, in Kombination mit morphologischen Auswertungen bei der Identifizierung von Verschleißmechanismen während eines Reibvorgangs beizutragen. Das Hauptziel der vorliegenden Arbeit, einen weiteren Baustein zu setzen, der Verständnis der komplexen Verschleißvorgänge dentaler Werkstoffe beiträgt, konnte damit erreicht werden.

## 7 Literaturverzeichnis:

**Bailey W. F., Rice S. L., Albert R.J.:** Influence of contact stress, sliding velocity and surface finish on the sliding wear of a composite restorative.

J Dent Res 60, 914-918 (1981)

**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)

**Bales J. F., Stafford G. D., Harrison A.:** Masticatory function-a review of the literature II. Speed of movement of the mandible, rate of chewing and forces developed in chewing.

J Oral Rehabil 2: 349 - 361 (1975)

**Bayne S. C., Taylor D. F., Heymann H. O.:** Protection hypothesis for composite wear.

Dent Mater 8, (9), 305 - 309 (1992)

**Czichos H., Habig K.-H.:** Tribologie Handbuch, Reibung und Verschleiß.

Vieweg-Verlag, Braunschweig (1992)

**De Boever J. A., Mc Call W. D., Holden S., Ash M. M.:** Functional occlusal forces: an investigation by telemetry.

J Prosth Dent 40: 326 - 333, (1978)

**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 Long R., Douglas W. H.:** Development of an Artificial Oral Environment for the Testing of Dental Restoratives: Biaxial Force and Movement Control.  
J Dent Res 62 (1), 32 - 36 (1983)

**Dickson G.:** Physical and Chemical Properties and Wear.  
J Dent Res 58 (5): 1535 - 1543, (1979)

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

**Eichner K.:** Messung der Kräfte bei Kauvorgängen.  
Dtsch Zahnärztl Z 18, 115 (1963)

**Emborg A., Jones J. G., Harrison A.:** The wear effects of selected composites on restorative materials and enamel.  
Dent Mater 3, 236 - 240 (1987)

**Fang H., Kunzelmann K.-H., Hickel R., Petschelt A.:** Standardisierung des Antagonisten bei 2-Körper-Abriebsimulatoren.  
Dtsch Zahnärztl Z 48, 481 - 483 (1993)

**Friedrich K.:** Friction and Wear of Polymer Composites.

Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam (1986)

**Gerthsen Chr., Kneser H. O., Vogel H.:** Physik.  
Springer Verlag Berlin, 15. Auflage (1986)

**Hellwig E., Klinek J.:** Einführung in die Zahnerhaltung.  
Verlag Urban & Schwarzenberg München (1995)

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

**Krejci I., Reich T., Lutz F., Allbertoni M.:** In vitro-Testverfahren zur Evaluation dentaler Restaurationssysteme. 1. Computergesteuerter Kausimulator.  
Schweiz Monatsschr Zahnmed 100, 953 - 960 (1990)

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

**Kuchling, Horst:** Taschenbuch der Physik.  
Verlag Deutsch Frankfurt/M, 10. Auflage (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, 1396 - 1401 (1986)

**Lugassy A. A., Greener E. H.:** An Abrasion Resistance Study of Some Dental Resins.

J Dent Res 51, 967 (1972)

**Lutz F., Phillips R. W., Roulet J. F., Imfeld Th.:** Komposits - Klassifikation und Wertung.

Schweiz. Mschr. Zahnheilk. 93, 914 - 929 (1983)

**Lutz F., Phillips R. W.:** A classification and evaluation of composite resin systems.

J Prosthet Dent 42 (1), 480 - 488 (1983)

**Lutz F., Phillips R. W., Roulet J. F., Setcos J. C.:** In-vivo and In-vitro wear of potential posterior composites.

J Dent Res 63, 914 (1984)

**Mair L. H., Stolarski T.A., Vowles R. W., Lloyd C. H.:** Wear: mechanisms, manifestations and measurement. Report of a workshop.

Dent 24, 141 - 148 (1996)

**Mc Kinney J. E.:** Apparatus for measuring wear of dental restorative materials.

J Dent Res 61, 1083 -1088 (1982)

**Mc Kinney J. F., Wu W.:** Chemical Softening and Wear of Dental Composites

J Dent Res 64, 1326 -1331 (1985)

**Mc Kinney J. E., Antonucci J. M., Rupp N. W.:** Wear and Microhardness of GIC.

J Dent Res 66 (6), 1134 - 1139 (1987)

**Mc Kinney J. E., Antonucci J. M., Rupp N. W.:** Wear and Microhardness of a Silver-sintered Glass-Ionomer Cement.

J Dent Res 67 (5), 831 - 835 (1988)

**Mueller HJ, Bapna MS, Knoeppel R.:** Human enamel-dental amalgam pin-on-disc wear.

Dental Materials (1985, 1: 31 - 35.

**Phillips R. W., Avery D. R., Mehra R., Swartz M. L.:** Observations on a composite resin for class II-restorations: three year report.

J Prosth Dent 26, 68 - 77 (1971)

**Powell J. M., Phillips R. W., Norman R. D.:** In Vitro Wear Response of Composite Resin, Amalgam and Enamel.

J Dent Res 54, 1183 -1195 (1975)

**Powell J.M., Dickson G.:** In-vitro wear-testing of restorative materials.

J Dent Res 54 (Special issue) A, 134, Abstr.No. 356 (1975)

**Powers J. M., Leslie J. A., Craig R. G.:** Two-body abrasion of commercial and experimental restorative and coating resins and an amalgam.

J Am Dent Assoc 89, 1118 -1122 (1974)

**Powers J.M., Craig R.G.:** „surface failure of commercial and experimental restorative resins.

J Dent Res 55, 432 - 436 (1976)

**Reid C. N., Fisher J., Jacobsen P. H.:** Fatigue and wear of dental materials.  
J Dent 18, 209 - 215 (1990)

**Rice S. L., Bailey W. F., Pacelli P. F., Blanck W. R.:** Influence of enamel stylus stiffness on the sliding-wear behaviour of a composite restorative.  
J Dent Res 61, 493 - 496 (1982)

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

**Roulet J-F.:** Die Abrasion von Kompositen.  
Schweiz Mschr Zahnmed 86, 413 - 425 (1976)

**Roulet J-F.:** Degradation of Dental Polymers.  
Karger, Basel (1987)

**Roulet J-F.:** Werkstoffkundliche Parameter und ihre Auswirkungen auf die Klinik.  
Dtsch Zahnärztl Z 43, 887 - 892 (1988)

**Schnabel C., Daes P., Kunzelmann K.-H., Hickel R.:** Two-body wear simulation in a computer controlled artificial mouth.  
J Dent Res 5, Abstr.No. 1540 (1994)

**St. Germain H. S., Swartz M. L., Phillips R. W., Moore B. K., Roberts T. A.:** Properties of Microfilled Composite Resins as Influenced by Filler Content.  
J Dent Res 64, 155 - 160 (1985)

**Söderholm K.-J.:** Degradation of Glass Filler in Experimental Composites.  
J Dent Res 60, 1867 - 1875 (1981)

**Soltesz U., Klaiber B., Pergande Ch., Richter H.:** Vergleichende Untersuchungen über das Abrasionsverhalten von Composite-Füllungsmaterialien.  
Dtsch Zahnärztl Z 34, 406 - 412 (1979)

**Soltesz U., Klaiber B., Schlude V.:** Bürstenabrasionen mit 27 handelsüblichen Kompositen und ihre Oberflächenveränderung im Rasterelektronenmikroskop.  
Dtsch Zahnärztl Z 35, 502 (1980)

**Suh N. P.,** Tribophysics.  
Massachusetts Institute of Technology, Simon & Schuster New Jersey (1986)

**Sulong M. Z. A., Aziz R. A.:** Wear of materials used in dentistry. A review of the literature.  
J Prosthet Dent 63, 342-349 (1990)

**Wassel Robert W., Mc Cabe J. F., Walls A. W. G.:** Wear characteristics in a two-body wear test.  
Dent Mater 10, 269 - 247 (1994)

**Wassel R. W., Mc Cabe J. F., Walls A. W. G.:** A two-body Frictional Wear Test.

J Dent Res 73, 1546 - 1553 (1994)

**Willems G., Lambrechts P., Braem M., Celis J. P., Vanherle G.:**

A classification of dental composites according to their morphological and mechanical characteristics.

Dent Mater 8: 310 - 319 (1992)

**Wu W., Mc Kinney J. E.:** Influence of chemicals on wear of dental composites.

J Dent Res 61, 1180 - 1183 (1982)

**Zum Gahr, K.-H.:** Microstructure and wear of materials.

Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam (1987)

## **8 Anhang**

### **Bedienungsanleitung der Münchner Pin-on-Disk-Maschine**

**1.a.)** Sich vergewissern, daß alle 5 Kabel der Pin-on-disk-Maschine ordnungsgerecht verbunden sind:

-2 Netzkabel

-Rechner schwarzer Stecker (für Zählerstand und Wegaufnehmer),

silberner Stecker (für Kraftmeßdose und Stromversorgung des Wegaufnehmers)

Diese Kabel bei Betrieb niemals ausstecken!

**b.)** Überprüfen, daß die Maschine „im Wasser“ steht (= waagrecht)

Die Rechten der drei Standbeine können mittels eines Gabelschlüssels (Größe 13) höhenverstellt werden. Die Einstellung sollte derart erfolgen, daß sich der Arm mit dem Gewicht weder nach vorne, noch nach hinten bewegt. Die Kraftmessung würde sonst verfälscht werden.

**2.** Rechner - Hauptschalter einschalten, grünen Schalter an der Pin-on-Disk-Maschine einschalten.

**3.** Normalerweise sollte sich nun das Programm automatisch einschalten, falls nicht, Paßwort „Tribo“ eingeben.

**4.** Es folgt das Einschleifen der Materialprobe. Dazu:

- den Auslegearm für den Wegaufnehmer wegnehmen bzw. abbauen

- das Gewicht anheben und den Schwenkarm zur Arretierung des Gewichts einschwenken (Cave, etwas schwer gängig)

- Probenhalter nach unten ziehen und entnehmen.

5. Reinigung der Grundfläche des Einschleif-Probenhalters (Messing) mit Alkohol, um maximale Ebenheit zu garantieren. Dazu frisches TP-Doppelklebeband (Fa. Tesa, wasserfest) anbringen und entlang der Kante ausschneiden (Die Kante dient als Führung für die Schere), so daß eine runde Klebefläche entsteht. Abziehfolie abziehen und Si-C-Nassschleifpapier der Fa. Leco (180 Grit) aufkleben und mit etwas Abstand so abschneiden, daß ein geringer Überstand über die Kante gelegt werden kann.

Nun den mit Schleifpapier versehenen Messinghalter anstelle des Degussit-Antagonistenhalters in die Maschine einschrauben. Dabei darauf achten, daß die Madenschraube auf die abgeschliffene plane Fläche trifft. (Der dazugehörige Imbusschlüssel befindet sich links an der POD in der Querverschiebung)

6. Die Arretierung an der Querverschiebung lösen und die Querverschiebung nach vorne ziehen, bis das Probenbecken freiliegt.

7. Probe einsetzen (Achtung! Die Mittenschraube am Probenhalter ist eine Spezialschraube, sie besitzt am Hals kein Gewinde, also nicht verlieren.)

Vorher Vorbereitung der Probe:

Grobe Planparallelität kann durch „Vordrehen“ in einer Drehbank gewährleistet werden. Dennoch verbleibt noch eine gewisse Unebenheit nach dem Festspannen des Imbusschlüssels, die durch den Planschleifvorgang in der Pin-on-Disk-Maschine eliminiert wird.

8. Die Querverschiebung bis auf Skala 12 mm zurückschieben und arretieren.

9. Gewicht absenken, bis die Schleifscheibe auf der Probe aufliegt.

10. Arretierschraube für den sogen. „Schleifanschlagsteller“ (enthält Kugellager) lösen, den Teller bis auf Anschlag nach oben schieben und ein wenig absenken (ca. 0,3 mm), daß zwischen den Flächen ein kleiner Spalt entsteht.

11. Destilliertes Wasser in das Probenbecken einfüllen (etwa zur Hälfte) und die Maschine starten (Geschwindigkeit auf etwa 130 U/min einstellen)

12. Die Probe wird nun so lange eingeschliffen, bis das Gewicht auf dem Anschlagsteller aufliegt (Spalt ist nun verschwunden und das Kugellager dreht sich mit) und auch nicht mehr zwischenzeitlich angehoben wird.

Dieser Einschleifvorgang dauert je nach Werkstoff  $\frac{1}{2}$  bis 1 Stunde.

Der gleiche Einschleifvorgang muß nun wiederholt werden, jedoch mit Schleifpapier jeweils feinerer Körnung (240Grit, 400 Grit)

Ist der Einschleifvorgang beendet, so muß vor Versuchsbeginn die Funktion des Tellers ausgeschaltet werden, d. h. Teller nach unten führen.

Cave! Bei jedem Schleifpapierwechsel muß stets das Wasserbad ausgetauscht werden, ebenso unmittelbar vor Versuchsbeginn !

Nach dem Einschleifvorgang sollte die Messingscheibe auf einem extra dafür vorgesehenen Halter (Querverschiebung) angebracht werden.

13. Antagonistenhalter einspannen und festschrauben, zuvor jedoch die Querverschiebung bis auf den Anschlag nach hinten schieben.

Der Pin wird in der FP-1-Fräsmaschine (Fa. Willytec) planparallel vorgeschliffen und auf die gewünschte Rauigkeit eingeschliffen.

14. Geschwindigkeit an der Pin-on-Disk-Maschine auf 60 U/min einstellen, Zählerstand auf „0“ stellen.

15. Nun das Gewicht vorsichtig auf die Probe absetzen, anschließend vorsichtig von oben Nachdruck ausüben.

16. Vorsichtig den Wegaufnehmer einschrauben.

Dabei darauf achten, daß die schwarze Kunststoffgabel um den Wegaufnehmer liegt.

Der Alu-Querträger sollte etwa mittig zwischen der Probenwanne und dem Übertragungsarm liegen (darf nicht schleifen, sonst Übertragungsfehler!).

17. Probenbecken mit aqua destillata auffüllen

18. Der Testlauf kann gestartet werden.

## 9 Danksagung

Ein Dankeswort an dieser Stelle kann natürlich niemals allen gerecht werden, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Dennoch möchte ich es nicht versäumen, mich bei den Menschen zu bedanken, die mich während der Jahre der Erstellung dieser Arbeit mit Rat und Tat unterstützt haben.

Allen voran möchte ich Herrn Prof. Dr. R. Hickel herzlich für die Überlassung des Dissertationsthemas und für die Durchsicht der Arbeit danken.

Für die Betreuung und Hilfe bei der Durchführung der Arbeit sowie für die wertvollen Anregungen danke ich insbesondere Herrn OA Dr. K.-H. Kunzelmann.

Desweiteren danke ich meinem lieben Mann Stephan für den Beistand in sämtlichen technischen Fragen.

Meinen Kollegen Frau Dr. Claudia Bauer, Herrn Hans-Peter Flessa sowie Herrn Dipl.-Ing. Thomas Obermeier danke ich für die wertvolle Unterstützung bei der Computerefassung der Arbeit, Frau Karin Schunn für die Unterstützung bei der Erstellung der Photos.

Der Firma Willytec sowie Herrn Dipl.-Ing. Gerhard Weber danke ich für die Unterstützung bei der technischen Entwicklungsarbeit.

Zum Schluß möchte ich nicht versäumen, mich bei meinen Eltern, denen ich diese Arbeit widmen möchte, für die mir zugekommene Ausbildung herzlich zu bedanken.

## 10 Lebenslauf

Geboren am 05. September 1965 in München als fünftes von sechs Kindern des Diplom-Ingenieurs Max Hartmannsgruber und der Apothekerin Brigitte Hartmannsgruber, geb. Eichner.

- |                   |  |
|-------------------|--|
| 1971 - 1975       | Grundschule Konrad-Widerholt-Schule in Kirchheim unter Teck.                                 |
| 1975 - 1982       | Ludwig-Uhland-Gymnasium Kirchheim unter Teck.  |
| 1982 - 1984       | "Heimschule Kloster Wald", Landkreis Sigmaringen   |
| 1984              | Allgemeine Hochschulreife  |
| 1985 - 1986       | Studium der Humanmedizin an der französischen Universität in Brüssel.                        |
| 1986 - 1987       | Studium der Zahnmedizin an der Semmelweis-Universität in Budapest.                           |
| 1987 - 1993       | Studium der Zahnmedizin an der Johannes-Gutenberg-Universität in Mainz.                      |
| Juni 1993         | Zahnärztliche Approbation  |
| seit Oktober 1993 | Assistenz-Zahnärztin an der Poliklinik für Zahnerhaltung und Parodontologie der LMU München. |
| Dezember 1995     | Eheschließung mit Diplom-Ingenieur Stephan Holzner.  |
| Mai 1996          | Geburt meiner Tochter Marie-Sophie Holzner   |