

## **5 DISKUSSION**

### **5.1 Methodik**

#### **5.1.1 Fragestellung**

Der Polymerisationsschrumpfung von Composites übt eine Zugkraft auf die füllungsbegrenzenden Kavitätenwände aus. Eine Messung dieser Kräfte ist sinnvoll um abzuschätzen, ob material- oder substanzzerstörende Kräfte auftreten. Klinisch relevant ist die nach dem Übergang vom pastösen in den festen Zustand stattfindende Schrumpfung während der Aushärtung von Composites (13).

#### **5.1.2 Material und Probenlänge**

In dem vorliegenden Schrifttum werden vorwiegend Autopolymerisate (2, 3, 19, 16, 83) und Compositekleber (111) oder das Zusammenwirken von Composites mit Haftvermittlern (31) untersucht. Photopolymerisierende Composites werden in der Praxis am häufigsten verwendet, so dass eine Konzentration auf diese Produktart angemessen ist. Zur Untersuchung werden Composites aus dem Standardprogramm dreier großer Hersteller herangezogen.

Die sich verdoppelte Probenlänge sollte zum einen das Volumen sowie den C-Faktor von Molarenfüllungen nachbilden und auch die Extremsituation bei der 8 mm großen Probe darstellen. Anhand von drei Probenlängen ist auch eine Tendenz der Kraftentwicklung abschätzbar.

#### **5.1.3 Versuchsaufbau**

##### Verfahren

Für die Werkstoffprüfung gibt es verschiedene normierte Verfahren, nicht jedoch für die statische Messung der Kräfte während der Polymerisations-

schrumpfung. In den Veröffentlichungen zur Kraft- und Spannungsmessung bei der Polymerisationsschrumpfung erfolgen alle Messungen, mit Ausnahme von CHEN (28, 29, 30), mit einer Universalprüfmaschine (2, 3, 19, 16, 31, 40, 41, 58, 63, 83, 94, 111). Der Einsatzbereich dieser Maschinen ist aufgrund des modularen Aufbaus sehr groß und auch für die hier gemessenen Kräfte geeignet. Wichtig ist, dass eine Eigenbeweglichkeit des Aufbaus vermieden wird, damit die statischen Messungen nicht durch Wegänderungen beeinflusst werden.

Der Fehler der Messdose liegt unter einem Prozent, konstruktionsbedingt unterliegt der Lastaufnehmer einer linearen Längenänderung von 0,07 mm bei der Volllast von 100 N (87). Die Dehnung des restlichen Versuchsaufbaus unter einer Zugeinwirkung ist am stärksten abhängig vom schwächsten Glied, den Stahlstempeln mit dem geringen Querschnitt. Kalkulatorisch beträgt die Längenänderung der Stahlstempel  $1,8 \mu\text{m}$  bei einer Last von 100 N, mithin 2,5 % der Beweglichkeit des Lastaufnehmers.

Üblicherweise werden Messungen an der Universalprüfmaschine bei einer entsprechenden Bewegungsrichtung der Traverse vorgenommen und eine Auslenkung der Messdose oder der anderen Verbindungselemente hat dann keinen Einfluss auf die Messung. Bei stehender Traverse führt die durch die Schrumpfung der Probe herbeigeführte Auslenkung der Messdose und des Versuchsaufbaus zu unterschiedlichen Ergebnissen gegenüber einem Aufbau mit automatischer Korrektur der Längenänderung. Ein auch noch so geringes Nachgeben des Messaufbaus führt zu einer deutlichen Reduzierung und unterschiedlichen Entwicklung der gemessenen Kraft bei verschiedenen Probenlängen.

Sofern die lastbedingte Längenänderung des Prüfaufbaus nicht berücksichtigt wird, bewirken längere Proben eine höhere Spannung. Gegensätzliche Werte erhält man, wenn die ursprüngliche Länge der Proben konstant gehalten wird (3). Kürzere Proben erreichen dann, gegenüber dem Ergebnis dieser

Untersuchung, eine höhere Schrumpfkraft bzw. -spannung als längere Proben (siehe Kap. 2.7.3).

Die Ergebnisse dieser Untersuchung könnte man, sofern die wesentlichen längenbeeinflussenden Merkmale des Versuchsaufbaus wertmäßig bestimmt sind, um die lastbedingte Längenänderung kalkulatorisch korrigieren. Bei der Probe VD8 errechnet sich hierdurch eine kalkulatorische Schrumpfkraft von rund 1 kN (entsprechend 36 MPa). Diese kalkulatorische Schrumpfungsspannung deckt sich auch mit den von DAVIDSON und DE GEE errechneten Werten (41). Eine weitere Betrachtung dieser kalkulierten Werte erscheint, unabhängig von der anzunehmenden Ungenauigkeit gegenüber einer automatischen Korrektur der Längenänderung des Versuchsaufbaus, wegen den fehlenden Vergleichbarkeit zu anderen Studien als nicht zweckmäßig.

Bei den von den Autoren verwendeten Versuchsaufbauten werden geometrisch unterschiedliche Probenkörper, verschiedene Applikationsformen und Messeinheiten (N, MPa) sowie Messverfahren verwendet. Eine objektive Betrachtung der Untersuchungsergebnisse lässt sich nur innerhalb eines normierten Versuchsaufbaus ermitteln. Ein quantitativer Vergleich ist aus diesem Grund mit den Messwerten der in Kapitel 2.7.3 erwähnten Arbeiten nicht möglich.

Die Diskussion der Ergebnisse beschränkt sich daher auf eine Betrachtung der in dieser Untersuchung ermittelten Werten sowie einer qualitativen Bewertung der Messwerte der ohne Korrektur der lastbedingten Längenänderung durchgeführten Untersuchungen.

#### Verarbeitung und Durchführung

Die Kraft- und Spannungsmessung während der Polymerisationsschrumpfung wird bei nahezu allen Veröffentlichungen an zylindrischen Prüfkörpern mit unterschiedlichen Durchmessern (3 - 8 mm) und Längen (50  $\mu$ m - 13 mm) ausgeführt (2, 3, 19, 16, 31, 58, 63, 111). Diese zylindrische Probenform ist

geometrisch einfach herzustellen und gut reproduzierbar. Die Probenlänge lässt sich mit der Wegangabe der Universalprüfmaschine auf 1 µm genau einstellen.

Bei Probenlängen über 2 mm wird mithilfe einer Manschette aus Polyethylen das Untersuchungsmaterial in Form gehalten. In den Vorversuchen wurde gezeigt, dass dieser Versuchsaufbau keinen Einfluss auf die Messergebnisse hat und die Composites keine Verbindung mit dem Polyethylen eingehen. Dies trifft auch für die Materialien zu, die in den Hauptversuchen verwendet werden.

Bei der Herstellung der 8 mm Proben zeigte sich, dass die Polyethylenmanschette bei dem Applizieren der Composites minimal ausgebeult wurde. Die Genauigkeit der Messungen wird dadurch nicht beeinträchtigt, da die Streuung der größeren Proben, mit Ausnahme von Visio-Dispers und Charisma, gegenüber den kleineren Proben niedriger liegt. Eine Auswirkung auf die Messwerte erscheint aber nur geringfügig möglich. Ein Anzeichen hierfür könnte sein, dass die prozentuale Steigerung der Kraft zu der vorhergehenden Probenlänge (4 zu 2 mm, 8 zu 4 mm) bei den 8 mm Proben größer ist. Die Erarbeitung einer stabilen Form im Rahmen eines einheitlichen Prüfverfahrens erscheint sinnvoll.

Mit der Anwendung des Rocatec-System ist nach PFEIFFER et al. ein adhäsiver Verbund von mindestens 9 MPa möglich (148, 149). Bezogen auf die Haftfläche der Probenstempel entspricht dies 254 N. Damit liegt die Haftfestigkeit oberhalb des aus den Vorversuchen bekannten und zu erwartenden Messbereichs.

Die Härtung der Proben erfolgt mit den üblichen Polymerisationsgeräten. Die Literatur bestätigt, dass Schichtdicken bis zu 4,5 mm in 40 Sekunden ausreichend ausgehärtet werden (187). Außerhalb der labortechnischen Bedingungen wird für die Praxis eine längere Bestrahlungszeit von 60 Sekunden empfohlen (11). Um eine im Versuch möglichst hohe Polymerisationsumsatzrate zu erreichen, erfolgt die Lichthärtung mit zwei um 180° versetzt angeordneten Polymerisationsgeräten über einen Zeitraum von 60 Sekunden. Eine reprodu-

zierbare Positionierung der Polymerisationsgeräte ist durch den Aufbau gegeben.

Eine Untersuchung von KULLMANN hat gezeigt, dass die Polymerisationskontraktion größtenteils innerhalb der ersten 20 Sekunden nachweisbar ist und danach nur noch unwesentliche Änderungen stattfinden (107). DAVIDSON et al. messen aber zu diesem Zeitpunkt erst 21 % der Schrumpfungsspannung gegenüber der nach 5 Minuten erreichten Spannung (40). Dies deckt sich auch eher mit eigenen Ergebnissen. Hier beträgt nach 20 Sekunden die Schrumpfungskraft zwischen 25 – 66 % des Endwertes. Ein 6-minütiger Beobachtungszeitraum erscheint ausreichend.

Die durch Polymerisation und Absorption der Lichtmenge im Probenkörper entstehende Wärme kann wegen der thermischen Expansion das Messergebnis verfälschen. Bei einem für Composites üblichen thermischen Expansionskoeffizienten von 20 - 70 ppm/°C verändert sich eine 2 mm große Probe bei einer Temperaturdifferenz von 20 °C um 0,04 - 0,14 %, mithin 0,08 – 0,28 µm. Die übliche Polymerisationskontraktion mit 1,2 - 4,5 % (s. Tabelle 2-2) übersteigt bei weitem die thermische Expansion. Nach dem Ende der Bestrahlungszeit ist der Probenkörper erwärmt, der Messzeitraum bietet aber genug Zeit für eine Abkühlung und Anpassung der Temperatur des Probenkörpers an die Umgebungstemperatur. Dieser vorübergehende thermische Einfluss ist anhand der kurzfristigen Kraftsteigerung in dem Diagramm von Durafill VS (Abb. 4-7) erkennbar.

Neben diesem lokalen Wärmegeschehen können auch Temperaturschwankungen die Versuchsdaten durch thermisch anfällige Bestandteile des Messaufbaus verfälschen. Zum einen finden die Experimente in einem klimatisierten Raum statt, zum anderen wirken langsame Temperaturänderungen gleichmäßig auf alle Bestandteile der Messeinrichtung ein. Anhand der Diagramme sind keine auffälligen Schwankungen erkennbar.

Manuelle Ungenauigkeiten und materialbedingte Schwankungen können, trotz sorgfältigen Arbeitens, nicht vollständig ausgeschlossen werden. Deshalb muss mit einer gewissen Streuung der Messwerte von vornherein gerechnet werden. Bei einem Vergleich der Variationskoeffizienten fällt die große Streuung der Materialien Visio-Dispers und Dyract ( $V$  5,2 - 14) im Gegensatz zu Durafill und Charisma ( $V$  1,6-3,5) auf. Hier ist kein Zusammenhang in der Reihenfolge der Prüfungen mit den ggf. zu Beginn der Messungen streuenderen Ergebnissen zu sehen. Zuerst wurden an dem Material Dyract Messungen vorgenommen; die Streuung liegt im oberen Bereich. Die beiden anschließend untersuchten Materialien Spectrum TPH und Visio-Molar sowie das zuletzt untersuchte Charisma F weisen eine durchschnittliche Streuung auf. Die Streuung der von CHEN et al. untersuchten Materialien Durafill und Charisma liegen im unteren und mittleren Bereich (28). Dies entspricht den Ergebnissen dieser Untersuchung. Ungenauigkeiten bei den ersten Messungen aufgrund fehlender Routine sind deshalb unwahrscheinlich und es können reproduzierbare Ergebnisse gemessen werden.

Ob sich die untersuchten Messreihen in ihren Werten tatsächlich unterscheiden oder ob die gemessenen Unterschiede auf zufälligen Fehlern beruhen, wird mithilfe der Prüfstatistik untersucht. Die Prüfung der Signifikanz erfolgt durch den verteilungsfreien U-Test nach Mann und Whitney.

## **5.2 Ergebnisse**

### **5.2.1 Unterschiedliche Probenlängen**

Zwischen den verschiedenen Probenlängen von 2, 4 und 8 mm sind die Unterschiede in der Zugkraftzunahme in jeder Materialgruppe hoch signifikant.

Die Kraftzunahme verläuft nicht linear, sondern steigt von der Größe 2 mm zu 4 mm um 20 – 27 % an. Diese Zunahme liegt bei dem Vergleich der Probenlängen 4 mm zu 8 mm zwischen 29 – 42 %.

Die Schrumpfungsspannung hängt nach FEILZER et al. nur unwesentlich von der Probenlänge oder dem Volumen ab, sondern steht im Zusammenhang mit der Restaurationsform (58). Der C-Faktor nimmt entgegengesetzt der Probenlängen 2, 4 zu 8 mm von 1,5 über 0,75 auf 0,38 ab. Die Zugkraft steigt in dieser Untersuchung jedoch nicht linear. Sie nimmt bei vierfacher Probenlänge bzw. einem Viertel des C-Faktors nicht um den Faktor vier zu, sondern steigt nur zwischen 63 - 80 % (Charisma, Visio-Molar). Dies entspricht auch der von BOWEN (19) beobachteten Tendenz, eine direkte Vergleichbarkeit ist dort wegen der unterschiedlichen Probengrößen in statistisch unrelevanter Anzahl nicht gegeben. Die gemessenen Spannungen liegen bei BOWEN zwischen 0,6 und 2,1 MPa, entsprechend 18 bis 60 N, und stimmen mit den in der vorliegenden Untersuchung gefundenen Werten überein. Bei der Spannungsmessung kommen KUNZELMANN und HICKEL (111) zu ähnlichen Ergebnissen, die Probenlänge beträgt aber nur 300  $\mu\text{m}$ .

Dieser Verlauf stimmt nicht mit der Beobachtung einiger anderer Autoren (3, 19, 63) sowie dem Schema (s. Abb. 2-4) von FEILZER et al. (58) überein, welche bei größeren Proben eine niedrigere Spannung, und somit eine geringere Kraft messen. Eine Erklärung hierfür liegt in dem verwendeten Versuchsaufbau unter Berücksichtigung und Gegensteuerung der lastbedingten Längenänderung des Prüfaufbaus (s. Kap. 2.7.3), welche in dieser Untersuchung nicht erfolgte.

Die Kraftzunahme zwischen den Probenlängen bei dem Compomer Dyract liegt im mittleren Bereich. Im Unterschied zu den Versuchen von UNO et al. (186) verhält sich Dyract in dieser Untersuchung eher wie ein Composite, die formstabilisierende Wirkung des Glasionomeranteils ist anscheinend vernachlässigbar.

### 5.2.2 Unterschiede zwischen den Materialien

Dyract und Visio-Molar bewirken die geringste Schrumpfungskraft bei der Polymerisation, während Visio-Dispers und Spectrum TPH die doppelte Schrumpfungskraft aufweisen. Die Unterschiede sind hoch signifikant.

Innerhalb der Materialgruppen weist Visio-Molar die geringste volumetrische Schrumpfung von 1,1 % bei einer geringen Schrumpfungskraft ( $\bar{x}$  2. Rang) auf, während Dyract mit einer volumetrischen Schrumpfung von 3 % die geringste Schrumpfungskraft ( $\bar{x}$  1. Rang) ausübt. Visio-Dispers bewirkt mit einer hohen volumetrischen Schrumpfung von 3,1 % eine erhebliche Schrumpfungskraft ( $\bar{x}$  7. Rang). Eine geringere volumetrische Schrumpfung scheint nicht unbedingt eine reduzierte Schrumpfungskraft auszuüben.

Dyract und Visio-Molar haben einen hohen Füllstoffgehalt (72 % und 87 %) und verursachen die niedrigste Schrumpfungskraft. Durafill mit dem geringsten Füllstoffgehalt von 57 % bewirkt jedoch auch nur eine geringe Zugkraft. Die Ursache hierfür kann in dem niedrigen Elastizitätsmodul von Dyract liegen. Andererseits passt dies nicht zu der hohen Schrumpfungskraft von Visio-Dispers bei ebenfalls niedrigem Füllstoffanteil und Elastizitätsmodul.

Eine einheitliche Tendenz zwischen Füllstoffgehalt und Schrumpfungskraft ist nicht feststellbar. Diese Beobachtung deckt sich mit der Studie von KULLMANN (107), MUNJSGAARD et al. (137) und SETZ (181). BOWEN et al. konnten selbst bei einem ungefüllten Composites (5,7 MPa) keinen Unterschied zu einem hoch gefüllten Composites (5,5 MPa) messen (16). Somit ist die Beobachtung eines wahrscheinlich fehlenden Zusammenganges zwischen Schrumpfungskraft, der volumetrischen Schrumpfung sowie dem Füllstoffgehalt nicht verwunderlich.

Die Aussage von SETZ et al., der Füllungsgrad eines Composites erlaube keine sichere Voraussage der Materialeigenschaften, scheint sich hier zu bestätigen (181).

Der Elastizitätsmodul ist keine feste Größe und kann durch die Intensität der Lichtquelle verändert werden. Eine Verbesserung der mechanischen Eigenschaften kann durch eine verlängerte Bestrahlung mit geringerer Intensität erreicht werden (157). Ein niedriger Elastizitätsmodul bewirkt durch die günstigeren Fließeigenschaften eine bessere initiale Randadaptation sowie eine geringere Polymerisationsspannung (94, 188).

In dieser Untersuchung bewirkt Visio-Molar ( $\bar{x}$  2. Rang) mit dem hohen Elastizitätsmodul von über 13 GPa gegenüber dem herstellergleichen Visio-Dispers ( $\bar{x}$  7. Rang) mit rund 7,4 GPa eine deutlich niedrigere Schrumpfkraft. Diese gegensätzlichen Eigenschaften sind auch bei Durafill ( $\bar{x}$  3. Rang bei 6,1 GPa) und Dyract ( $\bar{x}$  1. Rang bei 7,5 GPa) erkennbar. Aufgrund des Elastizitätsmoduls kann tendenziell nicht auf die Kontraktionskraft geschlossen werden, auch wenn hiervon gegebenenfalls eine bessere initiale Randadaptation abhängt.

KEMP-SCHOLTE und DAVIDSON gehen davon aus, dass sich mikrogefüllte Composites durch die günstigeren Fließeigenschaften besser zur Herstellung eines guten marginalen Randschlusses statt der starren Hybrid-Composites eignen (95). Rückschlüsse auf die Schrumpfkraft können hieraus aber nicht gezogen werden, da das elastischere mikrogefüllte Composites Visio-Dispers eine größere Kraft gegenüber dem Hybrid-Composites Spectrum TPH erzeugt.

Die Konsistenz der Materialien hat auch keinen Einfluss auf die Messergebnisse. Aufgrund der steifen Konsistenz von Visio-Dispers könnte man auf eine große Schrumpfkraft und einen großen Variationskoeffizienten schließen.

Die Betrachtung der weicheren Materialien gegenüber der gemessenen Polymerisationskraft deckt diese Annahme nicht.

CHEN et al. (28, 30) messen an einem gegenüber dieser Untersuchung etwas kleineren Probenkörper mit einem C-Faktor von 0,33 bei dem Material Dyract eine Schrumpfkraft 10 N und bei den Materialien Charisma und Durafill 20 N. Die hier gemessene Schrumpfkraft der größtmäßig vergleichbaren 4 mm Proben von Dyract und Charisma (s. Tabelle 4-1) liegt deutlich über den Messungen von CHEN et al. Wenn man den C-Faktor bei fehlender lastbedingter Längenänderung des Prüfaufbaus (S. 47) als Vergleichsgröße für die verschiedenen Probenformen heranzieht, liegen die vom C-Faktor vergleichbaren 8 mm Proben Dyract, Charisma und Durafill deutlich über den Messungen von CHEN et al. Mögliche Ursache der Abweichungen können die verschiedenen Versuchsaufbauten sein.

Insgesamt sind zwischen den Materialeigenschaften und der Schrumpfkraft zu wenig Gemeinsamkeiten vorhanden, so dass kein Zusammenhang bei der Kraftentwicklung während der Polymerisation erkennbar wird. Dies gilt auch unter Berücksichtigung der abweichenden Materialeigenschaften (siehe Kap. 3.2).

Bei der Krafteinwirkung zwischen den verschiedenen Materialien können hier nur Tendenzen dargestellt werden. Für eine sichere Aussage wäre allerdings die Untersuchung von wesentlich mehr Materialien notwendig.