

2 LITERATURÜBERSICHT

2.1 Historische Entwicklung

Mit der raschen Entwicklung von Kunststoffen zum Ende des 19. Jahrhunderts hat sich die Anzahl der zahnärztlich anwendbaren Materialien vergrößert. Der schon seit langem in der Zahnheilkunde benutzte vulkanisierte Naturkautschuk wurde durch das 1868 von HATT entdeckte Celluloid sowie weitere Entwicklungen wie z.B. die Phenolplaste ergänzt. Diese Kunststoffe waren aber nicht ausreichend mundbeständig (155).

Erst in den 30er-Jahren wurde die Grundlage heutiger Füllungskunststoffe, das Methylmethacrylat (MMA), und die Synthese von Polymethylmethacrylat (PMMA) entdeckt (109). Eine nachhaltige Anwendung dieser Kunststoffe war jedoch aufgrund der großen Polymerisationsschrumpfung, der Pulpentoxizität und des thermischen Ausdehnungskoeffizienten nicht möglich (144). Zur Verbesserung der physikalischen Eigenschaften hat man in den 50er-Jahren die Kunststoffe mit mineralischen Füllstoffen versetzt. Diese Zusammensetzung verschiedener Materialien, das Composite, brachte aber wegen des mangelhaften Verbundes zwischen den Phasen nicht den gewünschten Erfolg (177).

Die Compositematerialien in der derzeit üblichen Struktur hat BOWEN 1962 entwickelt (18). Hierbei wurde als Haftvermittler Silan zum dauerhaften Verbund der organischen Kunststoffmatrix mit dem anorganischen Füllstoff eingesetzt sowie das neu entdeckte große Monomermolekül Bis-GMA, auch als „Bowen Resin“ oder „Bowen Monomer“ bezeichnet (15).

Die jüngere Forschung orientierte sich an einer Optimierung der beiden Compositebestandteile, einer verbesserten Haftung an dem Zahnschmelz, sowie einer vereinfachten Initiation der Polymerisation. BUONOCORE begründete die Schmelzätztechnik und entwickelte die Haftvermittler weiter, beides in der Füllungstechnik nicht mehr wegzudenkende Neuerungen (25, 24). Heute gibt es

eine Vielzahl von Hybrid-Composites und Haftvermittlern zur Schmelz- und Dentinhaftung. Weiterhin kommen heute Kombinationen von Composites mit Glasionomern, die Compomere und die Gruppe der Ormocere, zur Anwendung, wobei zwei grundlegende Eigenschaften der Composites, die Schrumpfung und Abrasion, ständig verbessert wurden.

Diese verbesserten Materialeigenschaften haben den für lange Zeit einzigen plastischen und zahnfarbenen Silikatzement komplett verdrängt (48).

2.2 Zusammensetzung des Composites

Unter dem Begriff Composites versteht man eine Kombination von mindestens zwei Stoffen, die sich in ihren Eigenschaften von denen der reinen Komponenten unterscheiden (23), sowie eine klar abgrenzbare Verbundschicht haben (151). Durch die Kombination der Einzelbestandteile sollen Composites bessere Materialeigenschaften aufweisen als die Einzelbestandteile (38). Ein Composite besteht aus

- der organischen Phase (Matrix),
- der anorganischen Phase (Füllstoff, angelsächsischer Begriff „filler“),
- sowie der Verbundphase zwischen Matrix und Füllstoff (165).

Je nach Compositeart kommen noch Comonomere, Akzeleratoren, UV-Stabilisatoren, Inhibitoren, (Foto-)Initiatoren und Pigmente zur Steuerung der Lagerbarkeit, Härtung und Farbgebung hinzu (155).

In der Regel beträgt der Anteil der Füllstoffe zwischen 65 und 80 Gew.% bzw. zwischen 50 und 60 Vol.% (195).

2.2.1 Matrix

Die Kunststoffmatrix besteht im wesentlichen aus Makromolekülen (Polymere), die aus Monomeren mit mindestens zwei oder mehr funktionellen und reaktionsfähigen Gruppen, wobei die Struktur der Monomere sich hauptsächlich von

der Methacrylsäure ableitet. Durch Verbindung der Monomoleküle entstehen die Polymere. Mit Veränderung der Monomerkettenlänge wird das Verhältnis des Molekulargewichts zur Anzahl reaktiver Doppelbindungen variiert. Die Polymerisationsschrumpfung und die Wasseraufnahme verhalten sich dabei umgekehrt proportional zur Längenänderung.

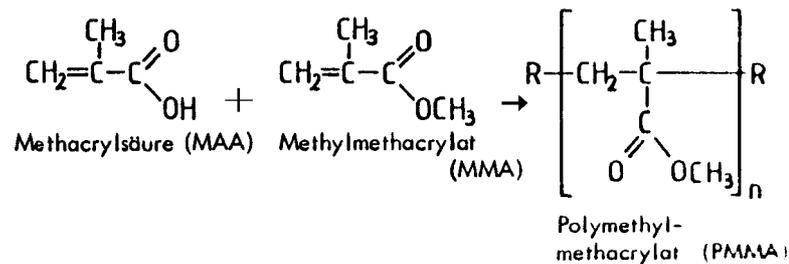


Abb. 2-1: Methacrylsäure (MAA), Methylmethacrylat (MMA), Polymethylmethacrylat (PMMA)

BOWEN entwickelte das bis heute gebräuchliche Glycidylmethacrylat (Bis-GMA), auch „BOWEN-Resin“ genannt. Die bei der Addition gebildeten Hydroxyl-Gruppen (-OH) geben dem Monomer wie dem Kunststoff eine merkliche Hydrophilie, welche zu einer erhöhten Wasseraufnahme und Verschlechterung der Materialeigenschaften führt. Diese Nachteile förderten Bestrebungen, die Hydroxyl-Gruppen zu entfernen, in deren Verlauf das Urethandimethacrylat (UDMA) entwickelt wurde (76).

Aufgrund des hohen Molekulargewichts dieser beiden Monomere ist die Viskosität so hoch, dass eine ausreichende Beimischung von Füllstoffen nicht mehr erreicht werden kann. Deshalb werden niedermolekulare Verdünnermonomere (Comonomere), z.B. das Triethylenglycoldimethacrylat (TEGDMA) zugesetzt, um einen hohen Füllstoffanteil bei akzeptabler Konsistenz zu gewährleisten. Diese Comonomere copolymerisieren mit den Monomeren und werden in das Composites eingebaut. Außer einer Viskositätserniedrigung wird das Molekulargewicht der Makromoleküle, die Vernetzungsdichte, der Restmonomergehalt und die Morphologie des Composites beeinflusst (171). Die Addition kurzkettiger Harze ist ein ständiger Kompromiss zwischen der Verarbeitungsmöglichkeit einerseits und der Aushärtungskontraktion von Compositesmaterialien anderer-

seits (20, 85). Die Matrix hat deshalb eine wesentliche Bedeutung für die materialtechnischen Eigenschaften (101).

2.2.2 Füllstoffe

Grundsätzliches Ziel einer Kombination von Monomeren mit Füllstoffen ist die Dispersionsverstärkung. Damit ist eine gesteigerte Verschleißfestigkeit und geringere Polymerisationsschrumpfung des Werkstoffes verbunden (16, 98, 129). Die Füllstoffe bestimmen in hohem Maße die Werkstoffeigenschaft der Composites (76, 89, 138). Deshalb werden der organischen Matrix anorganische Füllstoffe beigemischt, um die nachteiligen Eigenschaften der Composites wie Schrumpfung, Wasseraufnahme, hoher thermischer Ausdehnungskoeffizient, geringe Steifigkeit und geringe Abrasionswiderstand zu beseitigen. Daher darf der Füllstoff nicht diese Eigenschaften haben und muss sich den benötigten Farben anpassen (195). Der Füllungsgrad eines Composites erlaubt keine sichere Voraussage der Materialeigenschaften. Nach einer Studie von SETZ (181) bleibt trotz hoher Füllstoffanteile die Matrix für die Eigenschaften von Composites entscheidend.

Ein Zusammenhang besteht jedoch sowohl zwischen dem Füllstoff als auch der Partikelgröße und anderen Eigenschaften. LI et al. stellen fest, dass kleinere Partikel Druckfestigkeit und Wasserlöslichkeit erniedrigen, während ein höherer Füllstoffgehalt Härte, Druckfestigkeit und Steifigkeit erhöht (118). Untersuchungen von CHUNG et al. bestätigen die Ergebnisse bezüglich Füllstoffgehalt und Härte (33). In erster Linie reduziert die Beigabe von Füllstoffen die Polymerisationsschrumpfung und erniedrigt den thermischen Ausdehnungskoeffizienten (136). GEIS-GERSTORFER et al. haben allerdings bei hoch gefüllten Composites keine geringere Schrumpfung und Wasseraufnahme festgestellt (73).

Die physikalischen Eigenschaften des Composites werden durch die Form, die Korngröße und die Korngrößenverteilung der Füllstoffpartikel geprägt. Die

Füllstoffe in Form von Kugeln, Stäbchen, Splittern oder Kristallen werden in drei Korngrößengruppen eingeteilt.

Konventioneller Makrofüllstoff

Konventionelle Makrofüllstoffe werden durch Mahl- und Brechprozesse aus größeren anorganischen Stücken von Quarz, Glas, Borsilikate und Keramik gewonnen. Sie sind in der Regel splitterförmig und liegen in einem Größenbereich von 0,1 - 100 µm. Optimierte Makrofüllstoffe haben Partikeldurchmesser von 2 - 5 µm (76, 124). Durch Dotieren der Gläser mit Schwermetallen wie Barium, Strontium oder Zink wird den Verbundstoffen ein röntgenpositiver Charakter verliehen (90).

Mikrofüllstoff

Mikrofüllstoffe werden durch Hydrolyse von Siliciumtetrachlorid in der Knallgasflasche bei 900 °C erzeugt (121). Bei dieser chemischen Synthese entsteht hochdisperses, pyrogenes Siliziumdioxid (SiO_2) mit einem Teilchendurchmesser von 0,01 - 0,04 µm, das als additiver oder alleiniger Füllstoff verwendet wird (175). Pyrogenes Siliziumdioxid hat aufgrund der kleinen Partikel einen großen Verdickungseffekt. Diese viskositätssteigernde Wirkung verhindert, dass die Monomere ausreichend hoch gefüllt werden können. Solche mikrogefüllten Composites sind hoch viskös, klebrig und schwer zu verarbeiten (124).

Zur Lösung dafür, einen höheren Füllstoffgehalt ohne Einbußen bei der Verarbeitungsqualität zu erzielen und den Anforderungen der internationalen Norm zu entsprechen, werden die Mikrofüllstoffkomplexe verwandt.

Mikrofüllstoff-Komplexe

Nach LUTZ et al. lassen sich die Mikrofüllstoffkomplexe in drei Arten einteilen (124):

a. Splitterförmige, vorpolymerisierte Mikrofüllstoffkomplexe:

Splitterförmige, vorpolymerisierte Mikrofüllstoffkomplexe werden durch Beifügen von pyrogenem Siliziumdioxid zu einer organischen Matrix hergestellt; die dar-

aus entstehende Paste wird durch Hitze erhärtet und anschließend in Teilchengrößen zwischen 1 - 200 µm mechanisch zerkleinert.

b. Kugelförmige, vorpolymerisierte Mikrofüllstoffkomplexe:

Die Herstellung erfolgt durch das Einbringen von pyrogenem Siliziumdioxid in unvollständig ausgehärtete Polymerkugeln. Der Durchmesser der Partikel beträgt zwischen 10 und 30 µm. Durch eine abgestimmte Größenverteilung sind sehr dichte Kugelpackungen möglich.

c. Agglomerierte Mikrofüllstoffkomplexe:

Pyrogenes Siliziumdioxid wird künstlich agglomeriert, die Primärpartikel verkleben zu Sekundärpartikeln mit einer Größe von 1 - 25 µm. Im Gegensatz zu den anderen Komplexen ist dieses Produkt nahezu anorganisch.

Andere Methoden werden zur Verstärkung der organischen Matrix, Fasern aus Carbonegraphit, Fiberglas oder Seide, in Betracht gezogen (71).

2.2.3 Verbundphase

Damit der mechanisch festere Füllstoff eine verstärkende Wirkung auf das Verbundsystem ausüben kann, muss eine möglichst vollständige Übertragung der auf das Harz einwirkenden Kräfte auf diesen anorganischen Füllstoff stattfinden. Der feste Verbund muss durch eine spezielle Oberflächenbehandlung des Füllstoffs erzeugt werden, wobei die Silanisierung die wirksamste Methode zur Konditionierung von Gläsern ist (90).

Die Verbundphase ist kein eigentlicher Baustein des Systems Composite, sondern eine der Füllstoffphase aufgelagerte Zwischenschicht, die zu einer dauerhaften Kopplung zwischen Füllpartikeln und der organischen Matrix führt. Sie wird daher Haftvermittler (engl. Bonding Agent, S. 34) genannt. Die Beschichtung erfolgt mit einem Silan, in der Regel 3-Methacryloxy-propyl-trimethoxysilan. Silane haben einen Zwittercharakter, d.h. sie haben sowohl einen organischen

als auch einen anorganischen Molekülanteil (89) und können so mit der organischen Matrix copolymerisieren.

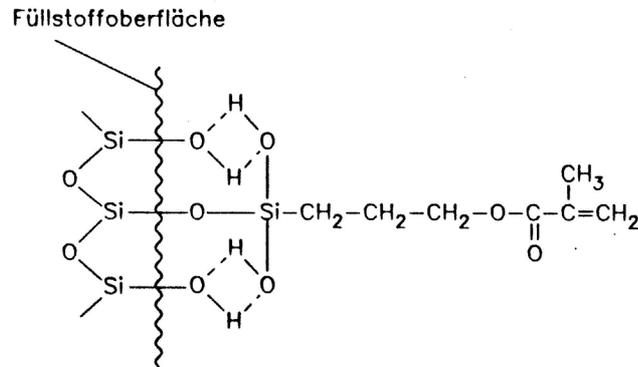


Abb. 2-2: Schematische Darstellung der Verbindung eines Füllstoffes mit der Kunststoffmatrix über 3-Methacryl-oxyp-propyltrimethoxysilan

Die Silanisierung verbessert die Werkstoffeigenschaften des Composites, dennoch bietet die Grenzstelle einen Angriffspunkt auf das System und ist weiterhin die Schwachstelle der Compositematerialien, da sie im Mundmilieu zur Desintegration neigt. Strukturbedingt kann sie leicht hydrolysiert werden und trägt entscheidend zur Schwächung von Composites bei (20, 124).

2.3 Klassifikation

Anhand der beschriebenen Füllstofftypen lassen sich die Composites nach LUTZ et al. in die folgenden vier Systeme einteilen (124):

Konventionelle Composites:

Bereits 1956 wurden die konventionellen Composites durch BOWEN als erste Compositematerialien eingeführt. Die konventionellen Composites bestehen aus Makrofüllstoffen, die in der organischen Matrix eingebunden sind. Der Härteunterschied zwischen Füllstoff und Matrix sowie den groben Füllkörpern erschwert eine Feinausarbeitung und Politur.

Die Oberflächenbeschaffenheit wird durch den raschen Verschleiß der Matrix rau, was zu einer Plaqueakkumulation und verstärkter Verfärbung führt (113).

Moderne konventionelle Composites enthalten vermehrt rundliche und weichere Makrofüllstoff mit einer angemessenen Größenverteilung. Die Langzeitergebnisse sind aber auch nicht befriedigend (124, 113). Günstig sind hingegen die hohe Biegefestigkeit und der geringe thermische Ausdehnungskoeffizient (139, 97, 196). Die konventionellen Composites werden aufgrund ihres Oberflächenverhaltens und der geringen Verschleißfähigkeit heute kaum noch verwendet (20, 124, 89). Die Entwicklung führte daher zu den homogenen Mikrofüllstoffcomposites.

Homogene Mikrofüllstoffcomposites:

Diese Composites sind Mischungen aus Matrixmonomer und direkt beigefügten Mikrofüllstoffen. Durch die Verwendung von Füllstoffen, die kleiner sind als die Wellenlänge des sichtbaren Lichtes, entsteht eine sehr einheitliche, hochglanzpolierbare Struktur, die auch dem Verschleiß wenig Angriffsfläche bietet (89, 124, 151). Der Erhalt des Oberflächenglanzes über Jahre konnte nur bei dieser Gruppe beobachtet werden (121). Ein hoher Füllstoffgehalt führt jedoch bei diesen Materialien, bedingt durch die große Gesamtoberfläche der sehr kleinen Füllstoffpartikel, zu einer extremen Viskositätssteigerung bei der Verarbeitung. Deshalb kann nur eine begrenzte, nicht immer ausreichende Menge an Füllstoff zugefügt werden, ohne dass man eine zu visköse Paste erhält (114). Aus diesem Grund ist der anorganische Füllstoffgehalt gering, wodurch schlechte physikalische Eigenschaften in Bezug auf die Polymerisationsschrumpfung und den thermischen Ausdehnungskoeffizienten entstehen (175).

Ziel war es deshalb, einen höheren Füllstoffgehalt ohne Einbußen bei der Oberflächenrauigkeit und der Verarbeitungsqualität zu erzielen.

Inhomogene Mikrofüllstoffcomposites:

Inhomogene Mikrofüllstoffcomposites sind Kombinationen aus einer organischen Matrix, Mikrofüllstoffen und Mikrofüllstoffkomplexen. Eine weitere Unterteilung erfolgt nach den verwendeten Vorpolymerisaten (splitterförmige Vorpolymerisate, kugelförmige Vorpolymerisate, Mikrofüllstoff-Agglomerate). Durch die Beimengung der Vorpolymerisate kann der anorganische Füllstoffge-

halt erhöht werden, ohne dass die Viskosität extrem zunimmt. Diese Compositonstruktion weist durchaus vergleichbare Eigenschaften zu den homogenen Mikrofüllstoffcomposites auf, wie eine sehr gute Polierbarkeit mit dauerhaften Oberflächenglanz, gute Ästhetik und eine gute Verschleißfestigkeit (97). Der Gehalt an Mikrofüllstoffen sowie deren Verteilung in der Matrix und im Vorpolymerisat muss gleich sein, damit eine gute Homogenität erzielt wird. Weiterhin muss der Verbund zwischen Matrix und den Komplexen in den einzelnen Phasen gleich stark sein (124). Die Verkleinerung der Korngröße führt zu einer erheblichen Vergrößerung der Oberfläche und zu einem vermehrten Verbundphasenanteil im Werkstoff (99). Dies mag auch ein Grund dafür sein, warum die inhomogenen Mikrofüllstoffcomposites gegenüber den konventionellen und Hybrid-Composites eine größere Polymerisationsschrumpfung aufweisen.

Hybrid-Composites:

Durch eine Kombination von Makro- und Mikrofüllstoffen zu den Hybrid-Composites sollten die Vorteile beider Compositearten vereint werden. Gegenüber den konventionellen Composites zeichnen sie sich durch eine bessere Oberflächenglätte und Verschleißfestigkeit bei gleichem Randverhalten aus (102, 103). Im Hinblick auf Seitenzahnrestorationen werden sie als Alternative zum Amalgam angesehen (32).

Der aktuelle internationale Standard ISO 4049 und die gleichlautende Europäische Norm DIN EN ISO 4049 unterscheidet den Typ 1 (Materialien für okklusale Flächen ohne kariespräventiven Charakter) und den Typ 2 für die übrigen Materialien mit einer weiteren Untergliederung nach chemisch-, licht- oder dualhärtend (50). Die American Dental Association (ADA) spezifiziert zwei Kategorien von direkten Composites (4). Weiterhin haben eine Reihe von Autoren folgende Klassifikationen aufgestellt:

- ROULET (165): Einteilung der Composites nach der Größe der Füllstoffpartikel (konventionelle Composite, Hybrid-Composite, homogene Mikrofüller-Composite, inhomogene Mikrofüller-Composite).

- CRAIG (38): Einteilung der Composites nach der Größe der Füllstoffpartikel, Typ 1 (Makropartikel, Minipartikel, Mikropartikel, Mischung aller drei) und Typ 2 (Makropartikel aus Mischung Mikropartikel/Polymere, Mischung aus Typ 1 und Mikropartikel/Polymere).
- LEINFELDER (117): Einteilung der Composites nach der Größe der Füllstoffe in die fünf Kategorien konventionelle Composites mit Makrofüllstoffen, mittelgefüllte Composites mit einer Partikelgröße von 1 - 5 μm , feingefüllte Composites mit einer Partikelgröße von 0,1 - 1 μm , mikrogefüllte Composites und Hybrid-Composites.
- MARSHALL et al. (128): Klassifizierung der Composites unter anderem nach der Menge der Füllstoffe anhand von Gewicht und Volumen und der Füllstoffgröße.
- WILLEMS et al. (197) unterscheiden die Composites nach durchschnittlicher Füllstoffgröße, -verteilung und -gehalt sowie nach beeinflussenden werkstoffkundlichen Parametern. Hieraus ergeben sich die fünf Gruppen dichtgepackte Composites, mikrofeingefüllte Composites, gemischtgefüllte Composites, konventionelle Composites und faserverstärkte Composites.
- KULLMANN (109) orientiert sich bei der Einteilung an der Oberflächenrauigkeit der Composites mit den Unterscheidungen Feinst-Composites (Mittelrauwert $< 0,1 \mu\text{m}$), Fein-Composites (Mittelrauwert $< 0,2 \mu\text{m}$) und Grob-Composites (Mittelrauwert $> 0,2 \mu\text{m}$).

2.3.1 Polymerisation

Die Polymerisationsreaktion wird durch geeignete Startermoleküle (Initiatoren) oder Katalysatoren ausgelöst und durchläuft prinzipiell die drei Phasen Kettenstart, -wachstum und -abbruch. Die als Initiatoren verwendeten Moleküle sind bei Energieeinwirkung (z.B. Wärme, Licht, chemische Energie) in der Lage, Radikale zu bilden. Die Radikale öffnen leicht die ungesättigte Doppelbindung des Monomermoleküls und übertragen ein freies Elektron. Dieses aktivierte Molekül reagiert als Radikal mit anderen Monomeren, wobei die Verkettung erst

abbricht, wenn zwei Radikale miteinander reagieren. Ein Abbruch erfolgt aber auch, wenn keine weiteren Monomermoleküle mehr vorhanden sind oder deren Konzentration zu niedrig ist, wobei die nicht umgesetzten Moleküle als Restmonomere verbleiben (90, 109).

Die Hitzehärtung durch Wärmezufuhr ist der chemischen und Lichthärtung überlegen (99, 193). Die Art der Aushärtung beeinflusst die Anzahl der gespaltenen Doppelbindungen und folglich den Polymerisationsgrad, wobei nur bei der Heißpolymerisation Umsatzraten bis zu 90 % möglich sind und chemisch- oder lichtinitiierte Polymerisationsreaktionen dagegen einen Restdoppelbindungsgehalt zwischen 18 % und 32 % aufweisen (156, 163). Weiterhin ist der Restmonomergehalt auch abhängig von Füllstoffart, -gehalt und Pigmentfarbe (56).

Alle Materialkomponenten haben einen Einfluss auf die intraorale Prognose eines Composites und korrelieren eng mit den bekannten klinischen Problemen wie mangelnder marginaler Adaptation, ungenügender Verschleißfestigkeit, schwacher Röntgenopazität etc. (165). Eine niedrige Umsatzrate verschlechtert die mechanischen und chemischen Eigenschaften, deshalb muss der Polymerisationsgrad optimiert werden. Eine hohe Umsatzrate führt jedoch auch zu einer erhöhten Schrumpfung (172).

Als Aktivierungsenergie kommt für die Behandlung von Patienten nur die chemische Härtung oder die Lichthärtung in Frage, wobei auch eine Kombination beider Systeme angewandt wird (89).

2.3.2 Chemische Härtung - Autopolymerisate

Die Matrix enthält in einem 2-Komponenten-System einen Initiator, meistens Dibenzoylperoxid und als Akzelerator ein tertiäres aromatisches Amin. Beim Anmischvorgang kommen die beiden Moleküle miteinander in Berührung und bilden freie Radikale (155, 195). Initiator und Akzelerator bedingen im wesentlichen die Nachteile der Autopolymerisate; Amine führen zu einer endogenen

Farbveränderung der Füllung, da sie unter Wärmeeinwirkung in Reaktionsprodukte zerfallen, die eine Gelbfärbung des Materials hervorrufen (91). Chemisch härtende Composites weisen, trotz ihres aufgrund von Porositäten theoretisch günstigeren Polymerisationsprofils, schlechtere Materialeigenschaften als lichthärtende Produkte auf (63).

2.3.3 Lichthärtung - Photopolymerisate

Photopolymerisierende Composites besitzen kein übliches Initiator-Akzelerator-System sondern ein Fotoinitiator-System, das durch Einwirkung von UV-A-Strahlung oder sichtbarem Licht im blauen Bereich (420 - 460 nm) Radikale für den Polymerisationsstart freisetzt. Es besteht deshalb keine Notwendigkeit mehr, zwei Komponenten zu verwenden (89, 155). Als Fotoaktivator wird meist Kampherchinon benutzt. Im Vergleich zu der chemischen Härtung entfällt ein Anmischen und die damit einhergehende Einarbeitung von Porositäten.

2.4 Materialeigenschaften

Der Wunsch, das klinische Verhalten von zahnärztlichen Werkstoffen aufgrund ihrer mechanischen und physikalischen Daten vorauszusagen, ist so alt wie die zahnärztliche Werkstoffkunde selbst (37). Die klassischen werkstoffkundlichen Parameter (Druckfestigkeit, Zugfestigkeit, Elastizitätsmodul, Dimensionsverhalten und Härte), welche unter idealen, standardisierten Bedingungen hergestellt werden, sind als Maximalwerte zu betrachten. Letztendlich sind nur klinische Tests in der Lage, über die Qualität von Füllungsmaterialien und -techniken Auskunft zu geben (167).

2.4.1 Viskosität und Konsistenz

Die Viskosität und Konsistenz eines Composites wird von den Materialkomponenten beeinflusst. Ein hoher Füllstoffanteil führt zu einer größeren Steifigkeit des Materials und bewirkt eine geringere Polymerisationsschrumpfung (99,

124). Dieser Weg wird beschrieben, um stopfbare, mechanisch belastbare Seitenzahncomposites zu erhalten.

2.4.2 Dimensionsverhalten

2.4.2.1 Polymerisationsschrumpfung

Composites erfahren während der Polymerisation eine Volumenschrumpfung, die zu Spannungen im Verbundsystem Zahn-Füllung führen und schließlich maßgeblich zur Bildung von Randspalten beitragen kann (47). Die Volumenkontraktion erreicht das dreifache der linearen Schrumpfung (60). Die lineare Polymerisationsschrumpfung liegt zwischen 0,2 - 1,9 %, volumetrisch 1,2 - 4,5 % (112). Bei der Kontraktion des Composites können kalkulatorisch Spannungen bis 32,2 MPa auftreten (41), was zu Porenbildung, Abriss von der Kavität wand oder kohäsiven Brüchen führen kann (7, 19, 47, 195). Übersteigen die Polymerisationskräfte die Adhäsions- oder Kohäsionskräfte des verbindenden Unterfüllungsmaterials, so sind Defekte im Verbundsystem zu befürchten (130). Die Polymerisationsschrumpfung ist somit der wichtigste Faktor bei der Entstehung von Randspalten (59) und der daraus resultierenden Sekundärkariesbildung. Einen Einfluss auf das Volumen und den Schrumpfungsverlauf haben dabei Faktoren wie das Monomersystem, die Art und Konzentration des Initiatorsystems, der Füllstofftyp und -gehalt und die Qualität und Oberfläche der Verbundphase.

Die Abbindegeschwindigkeit unterscheidet sich zwischen den chemisch härtenden und lichthärtenden Composites. Die Polymerisationskontraktion läuft bei den lichthärtenden Composites sehr schnell ab. Bei KULLMANN findet die Polymerisationskontraktion größtenteils innerhalb der ersten 20 Sekunden statt (107), während FEILZER et al. nach 5 Minuten erst ca. 80 % der Gesamtschrumpfung messen (59, 58). Höhere Temperaturen beschleunigen und intensivieren den Abbindprozess. Nach 24 Stunden ist kein Unterschied in der

Volumenschrumpfung zwischen den auto- und lichthärtenden Composites feststellbar (59, 107).

Charakteristisch für die Photopolymerisation ist, dass die Reaktion rasch einsetzt und die Vektoren zur Strahlungsquelle hingerrichtet sind (47). Diese Vektoren hängen entscheidend vom Härtungsmechanismus ab, denn die Verteilung der freien Radikale des Aktivatorsystems, die als „Polymerisationskeime“ fungieren, bestimmen die Richtung des Volumenverlustes. Folglich schrumpft ein chemisch initiiertes Composites auf sein Massezentrum und ein fotoaktiviertes auf die Lichtquelle zu. REINHARDT kann allerdings keinen generellen Einfluss einer zur Lichtquelle hin gerichteten Schrumpfung nachweisen (160).

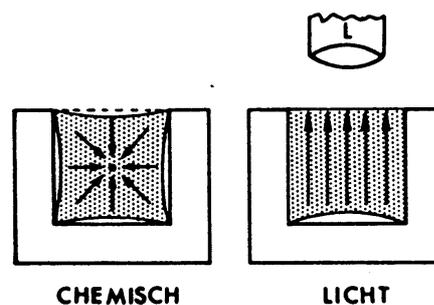


Abb. 2-3: Schematische Darstellung der Schrumpfung bei chemisch und lichtaktivierter Polymerisation (aus 96).

Die Höhe der Polymerisationskontraktion zeigt keine Abhängigkeit zum gewichtsmäßigen Gehalt an anorganischen Füllstoffen (107). Gegensätzliche Beobachtungen machen IGA et al. (87). Bei einer Messung von 22 Composites stellen sie eine negative Korrelation zwischen dem anorganischen Füllstoffgehalt und der volumetrischen Kontraktion fest. Eine Ausnahme hierbei sind fünf Composites mit vorpolymerisierten Füllstoffen, unter anderem auch Visio-Dispers und Durafill (beide Fa. Espe).

Eine Messung der axialen Kontraktion (Wall-to-Wall, WTW) von MUNKSGAARD et al. an Dentinkavitäten ergibt, dass ein höherer Füllstoffanteil bei Mikrofüllstoffen keinen Effekt hat, während Makrofüllstoffe und organische

Füllstoffe eine geringere WTW-Schrumpfung hervorrufen (137). FEILZER et al. führen eine Messung der axialen Kontraktion während der Aushärtung bei verschiedenen C-Faktoren (Maß der gebundenen zur freien Oberfläche, siehe auch Kap. 2.7.2) mit unterschiedlichen Materialien durch (60). Unter anderem folgern sie, dass das Aktivierungssystem keinen Einfluss auf die Kontraktion hat, gefüllte Composites eine geringere Tendenz zum Flow haben und der enge Zementierungsspalt bei Kronen und Inlays, entsprechend einer großen gebundenen Oberfläche, zu hohen Spannungen und postoperativen Beschwerden führen kann.

Da sich Volumenänderungen und Verschiebungen negativ auf die Grenzfläche zwischen Zahnhartsubstanz und Composites auswirken, wäre die Entwicklung eines schrumpfungsfreien oder expandierenden Composites wünschenswert (60, 80, 99). BYERLEY untersuchen in diesem Rahmen Polymere mit einer geringen Expansion als Grundlage für eine Matrix; die volumetrische Expansion beträgt ca. 3,5 % (27).

Ein hoher Polymerisationsgrad und eine minimale Schrumpfung sind normalerweise gegensätzliche Ziele, da eine hohe Umwandlung des Monomers ausnahmslos zu gesteigerter Polymerisationsschrumpfung führt (172). Beide Parameter sind notwendig für eine optimale Composite-Restoration. Die Polymerisationsschrumpfung ist ein zeitabhängiges Phänomen, welche normalerweise in zwei Schritten verläuft: Kontraktion vor und nach der Aushärtung. UNTERBRINK und MUESSNER zeigen, dass bei einer Härtung mit einer hochintensiven Lichtquelle die Randschlussqualität sinkt (187). Durch die Anwendung eines gepulsten XeCl-Lasers mit 468 nm wurde jedoch gegenüber einer regulären Polymerisationslampe eine gesteigerte Umsetzung des Monomers sowie eine verringerte Schrumpfung erreicht (183).

Die folgende Übersicht gibt den Umfang der Bestrebungen zur Reduzierung der Polymerisationsschrumpfung wieder:

- I. Veränderung der Materialeigenschaften:
 - a. Veränderung der Matrix: ASMUSEN, BYERLY et al., EICK et al. (7, 27, 54)
 - b. Veränderung des Füllstoffs: MUNKSGARD et al. (137)
 - c. Veränderung des Härtungsmechanismus: ALSTER et al., FEILZER et al. (1, 63)
 - d. Zusatz ungebundener Mikrofüllstoffe: CONDON et al. (35)
- II. Veränderungen an der Ausführungstechnik:
 - a. Modifizierte Füllungstechniken: KEMP-SCHOLTE und DAVIDSON (94), KREICI et al. (98, 123), KULLMANN (104, 106), BOLAND (14), CHRISTENSEN (32), JORDAN (91)
 - b. Sandwichrestauration mit Glasionomer-Unterfüllungen: DAVIDSON (43)
 - c. Compositeinlay: LIBERMAN et al. (119).
 - d. Kontrollierte Lichtzufuhr: FEILZER et al. (64), DAVIDSON und DAVIDSON-KABAN, UNTERBRINK und MUESSNER (39, 183, 187), KANCA (93).
 - e. Niedrig visköse Zwischenschichten: KEMP-SCHOLTE und DAVIDSON (95)

Tabelle 2-1: Übersicht der Möglichkeiten zur Beeinflussung der Polymerisations-schrumpfung

2.4.2.2 Thermischer Ausdehnungskoeffizient

Composites haben im Vergleich zu der Zahnhartsubstanz einen relativ hohen thermischen Ausdehnungskoeffizient (s. Tabelle 2-2). Der thermische Ausdehnungskoeffizient gibt an, um wie viele Bruchteile seiner Länge ein Körper sich ausdehnt, wenn er um 1 °C erwärmt bzw. abgekühlt wird.

Diese abweichenden Ausdehnungskoeffizienten führen bei gefüllten Zähnen dazu, dass bei thermischen Belastungen durch kalte oder warme Speisen (0 bis 60 °C) entweder die Füllung im Zahn arbeitet oder bei ausreichender

Haftung an den Kavitätenwänden innere Spannungen auftreten (195, 201). Eine Spaltbildung und die Veränderung der Spaltbreite wird als Pumpeffekt oder Perkolation bezeichnet. KULLMANN ermittelt eine stark negative Korrelation des thermischen Ausdehnungskoeffizienten zum Volumengehalt an den Füllstoffen bzw. der Kunststoffgrundsubstanz, wobei der Art der Kunststoffmatrix eine wesentliche Bedeutung zukommt (101). DULIK et al. kann für die Compositegrundsubstanzen mit mehreren Verdünnungsmonomeren Unterschiede im Wärmeausdehnungsverhalten feststellen, wobei der Ausdehnungskoeffizient bei steigendem Molekulargewicht ansteigt (53).

Umstritten ist aber, ob diesem Koeffizienten eine praktische Bedeutung bei Füllungsrandproblemen zukommt (6, 193). Nach ASMUSSEN wird bei einer relativ kleinen Wall-to-Wall Polymerisationskontraktion und entsprechender hygroskopischer Ausdehnung die marginale Passgenauigkeit nicht aufgrund von Temperaturschwankungen beeinflusst. Daraus folgt er, dass der thermische Ausdehnungskoeffizient kein Faktor von klinischer Bedeutung ist (5).

2.4.2.3 Wasseraufnahme und Löslichkeit

Durch die Wasseraufnahme der Composites aufgrund eines Diffusionsprozesses, vorwiegend in die Matrix, kann es zu einer erhöhten Löslichkeit, zu verminderter Festigkeit und zu Verfärbungen kommen (126, 195). Eine an sich unerwünschte Eigenschaft, die Quellung bzw. Expansion durch die Wasseraufnahme, wird als Möglichkeit gesehen, die Polymerisationsschrumpfung auszugleichen. Bei den meisten Materialien kann die hygroskopische Expansion jedoch nicht die Polymerisationsschrumpfung kompensieren (17, 61, 133). Die hygroskopische Expansion ist bei einigen Composites vom reinen Volumenwert her in der Lage, das Schrumpfungsvolumen auszugleichen (155), verläuft aber über einen wesentlich längeren Zeitraum und hat somit auf die initiale Restaurationshaftung keinen Einfluss (17). Die Expansion des verarbeiteten Composites verläuft etwas komplexer, da nicht alle Flächen mit Wasser benetzt werden und die Kavitätenränder eine Begrenzung bilden (62).

Die Löslichkeit lichthärtender Composites erhöht sich bei kürzeren Bestrahlungszeiten (191).

2.4.2.4 Viskoelastisches Verhalten

Als plastische Materialien zeigen Composites die Tendenz, unter Belastung zu fließen und sich dauerhaft zu verformen. Die von den Amalgamen bekannten Begriffe Flow und Creep beschreiben die Viskoelastizität, welche auch bei den Composites vorkommt und den Mechanismus einer zeitlich verzögerten molekularen Relaxation bezeichnen (23, 167).

Bei Polymeren bewirkt das viskoelastische Verhalten eine Abnahme der Spannung bei gleichbleibender Dehnung (173). Dieses auch bei Compositematerialien vorhandene Fließverhalten, das zum Abbau der maximalen Polymerisationskontraktionsspannung führt, vermindert signifikant die Kontraktionskräfte während der Monomerverkettung. Die Fließfähigkeit wird durch den Füllstoffgehalt mitbestimmt, so dass hochgefüllte, wenig schrumpfende Materialien nicht generell besser sein müssen (16, 41, 60). Ein hoher Füllstoffanteil führt zu einer größeren Steifigkeit des Materials (99, 124). Composites mit niedriger Festigkeit können durch die günstigeren Fließeigenschaften die initiale Polymerisationsschrumpfung teilweise ausgleichen und eignen sich besser zur Herstellung eines guten Randschlusses (95, 197).

2.4.3 Porosität

Aufgrund der industriellen Fertigung sind die lichthärtenden Materialien homogen und porenfrei. Porositäten sind bei den heute verwendeten Composites typisch für chemisch härtende Werkstoffe, da sie als 2-Pasten-Systeme maschinell oder manuell anzumischen sind. Durch diesen Mischvorgang werden Luft einschüsse eingearbeitet, welche als freie Oberfläche angesehen werden können. Diese Inhomogenität verschlechtert die physikalischen Eigenschaften.

Bei Untersuchungen stellen ALSTER et al. fest, dass die durch die Polymerisationsschrumpfung verursachte Spannung mit dem Verhältnis von freier zu nicht freier Oberfläche steigt (1).

FEILZER et al. beobachten, dass während der Aushärtung die Photopolymerisate eine höhere Schrumpfungsspannung zeigen, eine höhere kohäsive Kraft dieser Spannung entgegensetzen und einen niedrigeren Flow als die chemisch härtenden Composites haben (63). Dies ist auf die Sauerstoffinhibition und die Erhöhung der ungebundenen Oberfläche zurückzuführen.

2.4.4 Verbundfestigkeit

Jeder Füllwerkstoff muss in ausreichendem Maß den in vivo auftretenden Kräften widerstehen. Entsprechend werden Messungen zur Prüfung der Verbundfestigkeit durchgeführt. Die Verbundfestigkeit wird nach SCHWICKERATH durch die Kraft bestimmt, welche zur Trennung der Verbindung aufgewandt werden muss. Die Festigkeit beruht auf Molekularkohäsion (180). Beim Einwirken einer äußeren Kraft wird die Kohäsionskraft aufgehoben, wobei die Richtung der einwirkenden Kraft die Art der Festigkeit angibt (Druck-, Zug-, Biege-, Schub-, Torsionsfestigkeit). Festigkeit ist die querschnittsabhängige maximale Tragkraft; sie wird als Spannung (σ) bezeichnet und als Kraft pro Fläche (MPa) definiert (67).

2.4.4.1 Härte

Die Härte eines Materials kann definiert werden als Widerstand des Materials gegenüber einer lokalen plastischen Verformung in Form einer Indentation. Da alle Härteangaben abhängig vom Prüfverfahren sind, gibt es kein allgemein gültiges Testverfahren (37). Die bekanntesten Verfahren sind die Mikrohärt nach VICKERS und KNOOP, bei welchen unter standardisierten Bedingungen die Materialien mit Diamant-Pyramiden belastet werden. Unter einem Messmikroskop wird der Durchmesser des Eindrucks bestimmt. Auf Grund der bekann-

ten Form lässt sich die Eindringtiefe bestimmen, bzw. eine Härtezahl errechnen (167). Vom Grundsatz her könnte die Härte zur Vorhersage für den Verschleiß herangezogen werden. Da der Verschleiß aber ein sehr komplexes Phänomen ist, spielen auch Faktoren wie Struktur, Ermüdung usw., eine große Rolle (166).

Trotzdem wird in klinischen Beobachtungen festgestellt, dass füllstofffreies PMMA gegenüber Composites die niedrigsten Härtewerte aufweist. Da die Härte-Messung ein zerstörungsfreies Prüfverfahren ist, können an einer Probe mehrere Messungen durchgeführt werden oder ein zeitlicher Härteverlauf verfolgt werden (195).

2.4.4.2 Druck- und Zugfestigkeit

Bei der Untersuchung auf Druckfestigkeit werden die Probenkörper zunehmender Druckbelastung ausgesetzt, bis sie zerspringen. In der Regel wird eine zylinderförmige Probe mit planparallelen Enden zwischen zwei Platten einer Prüfmaschine gelegt und unter Druckbelastung gestaucht. Die maximal ertragene Kraft pro Fläche hängt unter anderem von der Geschwindigkeit der Druckzunahme ab.

Die Zugfestigkeit ist als jene Zugkraft pro Fläche definiert, bei welcher die Probe reißt. Nach DIN EN 10002 (vormals DIN 50 145) wird eine stabförmige Probe in einer Prüfapparatur zügig verlängert, wobei Belastung und Verlängerung kontinuierlich gemessen werden (49). Bei duktilen oder elastischen Materialien (z.B. Metallen) ist dieses Verfahren relativ einfach durchzuführen. Bei spröden Füllungsmaterialien führt eine reine Zugbelastungsprüfung nicht immer zu reproduzierbaren Werten (67, 167).

2.4.4.3 Biegefestigkeit

Die Biegeprüfung beansprucht eine Probe mit Zug- und Druckkräften. Die Biegefestigkeit stellt eine kombinierte Zug-Druck-Prüfung dar (194), die auch in der

Norm ISO 4049 angewendet wird (50). Die Bruchfestigkeit ist durch die Festigkeit des schwächsten Teils gegeben und ist sowohl von der Festigkeit der organischen Matrix, der Verbundphase zwischen Matrix und Füllstoff als auch von der Füllstoffbeschaffenheit selbst abhängig. Füllstoffe erhöhen daher nur den Elastizitätsmodul und nicht die Biegefestigkeit, da der Kunststoff bzw. der Verbund der schwächste Teil ist (195).

2.4.4.4 Elastizitätsmodul

Klinisch bedeutsam ist nicht nur die Biegefestigkeit, sondern auch die bereits vor dem Bruch stattfindende reversible Verformung. Je geringer der Elastizitätsmodul (E-Modul), desto stärker ist die Verformung. Solange das Material sich elastisch verhält, wird eine zunehmende Belastung (Spannung) zunehmende, aber reversible Dehnungen im Material verursachen. Der Elastizitätsmodul eines Materials ist immer gleich, unabhängig davon, ob es auf Zug oder Druck belastet wird. Das ist eine grundlegende Eigenschaft des Materials, welche im wesentlichen die Größe der intermolekularen Abstoßungs- und Anziehungskräfte widerspiegelt (167). Die Festigkeit von Composites kann durchaus größer als die von Amalgam sein, Unterschiede sind jedoch bei der Steifigkeit vorhanden (195).

2.4.5 Übersicht der werkstoffkundlichen Parameter

Physikalische Daten	Material	Composite	Schmelz	Dentin
Druckfestigkeit	[MPa]	150-350	100-400	200-350
Zugfestigkeit	[MPa]	40-55	10	50
E-Modul	[GPa]	5-25	50-85	18,5
Abbindeschrumpfung	[vol.%]	1,2 – 4,5	./.	./.
Thermische Expansionskoeffizient	[ppm/°C]	20-70	12	8
Härte	[KNH]	30-50	350	70
Haftwert zu Mikrofüllstoff-composites	[MPa]	-	18-25	12-25

Tabelle 2-2: Allgemeine physikalische Parameter von Composite, Schmelz und Dentin (nach: 90, 100, 112, 167, 190, 195)

2.5 Haftung der Compositematerialien an den Zahnhartsubstanzen

Die Haftung von Werkstoffen an Oberflächen und der Verbund von Werkstoffen lassen sich auf physikalische und chemische Grundlagen zurückführen. In der Mundhöhle sind bei Anwendung von Adhäsiven oder Klebern weiterhin biologische Faktoren von übergeordneter Bedeutung. Die Funktion eines überwiegenden Teils der Schmelzadhäsive und –kleber beruht in erster Linie auf einer mikromechanischen Verankerung innerhalb des durch Säuren angeätzten Hydroxylapatits des Schmelzprismengefüges. Darüber hinaus kann eine chemische Haftung zwischen Composites und Calcium des Hydroxylapatits aufgrund einer Ionenbindung oder einer Chelatkomplexes stattfinden (108).

2.5.1 Haftungsmechanismen

Grundsätzlich wird zwischen der mikromechanischen und chemischen Haftung unterschieden, wobei die Haftungsmechanismen zwischen dem Composite und dem Schmelz bzw. Dentin unterschiedlich sind. Durch eine Kombination geo-

metrischer und rheologischer Effekte zwischen dem Zahn und dem Composite beim Füllen wird nach der Polymerisation ein mechanischer Halt erreicht. Als Adhäsion bezeichnet man die molekulare Anziehungskraft im Kontaktbereich ungleicher fester Phasen. Es gibt physikalische (Dipolbildungen, Van-der-Waals-Kräfte) und chemische (kovalente Bindungen) Adhäsionskräfte, wobei durch die chemische Adhäsion eine wesentlich höhere Haftung erreicht wird (26, 126).

Haftung

Der Zahnschmelz ist im ausgereiften Stadium ein azelluläres, zu 95 Vol. % kristallines Gefüge, das als einziges kalzifiziertes Gewebe des Organismus rein epithelialen Ursprungs ist. Organische Komponenten wie Proteine und Lipide haben einen Anteil von weniger als 1 Vol. %. Die restlichen vier Prozent entfallen hauptsächlich auf das Wasser der Kristallhydratationsschicht und in geringen Mengen auf freies Wasser. Mikromorphologisch lassen sich Schmelzprismen erkennen, die sich aus Prismenscheide, Prismenstab und interprismatischem Schmelz zusammensetzen.

Die Funktion eines überwiegenden Teils der Schmelzadhäsive und -kleber beruht in erster Linie auf einer mikromechanischen Verankerung innerhalb des durch Säuren angeätzten Hydroxylapatits des Schmelzprismengefüges. Darüber hinaus kann eine chemische Haftung zwischen Composites und dem Calcium des Hydroxylapatits aufgrund einer Ionenbindung oder eines Chelatkomplexes stattfinden (108).

Technik

BUONOCORE führt 1955 als einfache Technik zur Steigerung der Retention von Akrylatfüllungsmaterialien die Phosphorsäureätzung des Zahnschmelzes in die Zahnheilkunde ein, da mit dieser Technik größere Haftwerte am Zahnschmelz zu erzielen sind (25). Hauptbestandteil dieser Technik ist die Schmelzätzung. Dazu wird Phosphorsäure auf den Zahnschmelz appliziert und damit ein Ätzmuster erzeugt, das sowohl zwischen verschiedenen Zähnen als auch

Zahnflächen variiert und deshalb in der Struktur nicht sicher vorherbestimmt werden kann (178). Ein Zusammenhang zwischen Ätzmustertyp, beziehungsweise zwischen Porositäentiefe und Haftkraft, ist allerdings nicht nachgewiesen, obwohl ein rein mechanistisches Verständnis die Vermutung nahe legen würde (78).

Dentin

Im Gegensatz zur überwiegend kristallinen Struktur ausgereiften Zahnschmelzes ist die Hartschubstanz Dentin heterogen aufgebaut, zeichnet sich durch einen höheren Wassergehalt (22 - 25 Vol.%) und einen beträchtlichen Anteil organischer Matrix (30 - 33 Vol.%) aus. Das Dentin wird zwischen Pulpaperipherie und Schmelz-Dentin-Grenze von kleinen Kanälchen (Dentintubuli) durchzogen, in denen die Odontoblastenfortsätze, welche sich bis in den äußeren Dentinmantel erstrecken, liegen. Der periodontoblastische Raum ist mit extrazellulärer Gewebeflüssigkeit (Dentiniquor) und kollagenen Fasern ausgefüllt (178).

Analog zur Haftung des Composites am Zahnschmelz kann man bei der Dentinhaftung rein mikromechanische von chemisch-adhäsiven Verbundmechanismen unterscheiden. Chemische Wechselwirkungen sind dabei einerseits mit den anorganischen Dentinbestandteilen und andererseits mit organischem Kollagen vorstellbar und könnten mit bifunktionalen Monomeren erzielt werden (10). Die gleichzeitige Verwendung von Schmelz- und Dentinarealen als Adhäsivflächen bei Compositesversorgungen („total bonding“) verspricht eine bessere Haftung der Restaurationen an den Zahnhartschubstanzen (125). Die Haftkraft von Haftvermittlern zum Dentin wird allerdings durch die Ätztechnik nicht verbessert (164), sondern sogar gegenüber dem unbehandelten Dentin verschlechtert (200).

2.5.2 Haftvermittler

Ohne eine Konditionierung der Schmelzoberfläche ist gegenüber den Glasio-merzementen kein ausreichender Verbund zwischen Composites und

Schmelz möglich. NOLDEN misst zwischen nicht konditioniertem Schmelz und Composites eine Verbundfestigkeit von nur 0,06 - 0,2 MPa, teilweise lösten sich die Materialien spontan vom Prüfkörper (140). Den intensivsten Verbund zwischen Composites und dem Schmelz, hier über 9 MPa, erreicht man durch eine Schmelzätzung und Anwendung eines Primers (140). Beeindruckend ist die Vervielfachung der Verbundfestigkeit durch Anwendung der Säure-Ätz-Technik, die teilweise mehr als das 20-fache gegenüber dem nicht angeätzten Zustand beträgt. Eine Verbesserung der Haftvermittler löst nicht das Problem, dass die extreme Schrumpfungsspannung zu kohäsiven Brüchen im Schmelz oder Restaurationsmaterial führen kann (123). Jedenfalls erreicht man mit einem Haftverbund zwischen der Zahnhartsubstanz und dem Restaurationsmaterial eine erhebliche Verbesserung der Steifheit wie bei einem gesunden Zahn (135). Hierbei können aber auch mit Haftvermittlern gelegte Amalgamfüllungen nicht dentinunterstützte Schmelzbereiche genauso gut stärken wie Compositefüllungen (70).

2.6 Compositematerialien und ihre Verarbeitung

2.6.1 Kavitätenpräparation und -größe

Die von BLACK definierten Präparationsregeln wurden für einen mechanischen Halt der Füllung in der Kavität und für die Lage der Füllungsrän­der im habituell sauberen Bereich entwickelt. Die spezifischen Haftungseigenschaften der Composites führten in den siebziger Jahren zu einer Revision der BLACKSchen Präparationsregeln. In Verbindung mit den Möglichkeiten der Adhäsivtechnik ist die makromechanische Retention der Restaurationsmaterialien nicht mehr zwingend, so dass die Aufmerksamkeit auf zahnhartsubstanzschonendere Präparationsformen gerichtet werden kann (126, 198). Dies ist wichtig, da ausgedehnte intrakoronale Restaurationen Risse im Dentin verursachen können. Erreicht der Bruchspalt das Pulpenkavum, ist in den Anfängen der pulpiti-schen Reaktionen die Infraktion als Ursache gewöhnlich nicht erkennbar (100).

Weil die Materialeigenschaften von Composites sich nicht mit der herkömmlichen Präparationstechnik im Seitenzahnbereich vertragen, werden Konzepte zum korrekten Einsatz von Compositematerialien entwickelt (123, 150). Diese stehen unter dem Grundsatz, dass die Kavitätenränder immer im Schmelz verlaufen. LUTZ et al. definieren Prinzipien der „adhäsiven Restauration“, wobei die konsequente Anwendung der Schmelz-Ätz-Technik unabdinglich ist, die Kavitätenausdehnung auf die Entfernung der kariösen Bereiche beschränkt wird und abschließend die Schmelzränder breit angeschrägt werden. Mit dieser Technik lässt sich die beste Randqualität erreichen, was man auf die verminderte Kavitätengröße, die Randgestaltung und die runde Kavitätenform zurückführt (57, 123, 125, 126).

Im Hinblick auf die marginale Adaptation von Composites wurden verschiedene Formen der Kavitätenrandgestaltung diskutiert. Die schräge Ausrichtung der Schmelzprismen im Zervikalbereich führt die Forschung zu Kavitäten mit angeschrägten Rändern, damit auch unter Zuhilfenahme der Ätzstrukturen eine gute marginale Adaptation erreicht wird (125, 143). Je größer die Abschrägung des Füllungsrandes ist, desto weniger Schmelzfrakturen entstehen bei der Füllung mit Composites (143). Eine Anchrägung an den okklusalen Füllungsrandern bewirkt jedoch auch eine deutliche Erhöhung der Dichtigkeit (134). Eine Untersuchung über die Dichtigkeit von Füllungen mit verschiedenen Kavitätenrandgestaltungen zeigt, dass die unterschiedlichen Randgestaltungen nur unwesentlich und die Anätzung entscheidend die Dichtigkeit erhöht (84). Anderer Ansicht ist hier MÖRMANN (136), der eine zervikale Kavitätenrandschrägung und Schmelzätztechnik bei eingeklebten, heißpolymerisierten MOD-Compositereinlays für verzichtbar hält.

Eine Möglichkeit, die Polymerisationsspannung zu steuern, ist nach FEILZER et al. abhängig von der gebunden zur freien Oberfläche der Füllung. Verhältnismäßig große freie Oberflächenareale bieten die Möglichkeit, die Spannung über das Fließen des Composites teilweise zu kompensieren (58).

Demzufolge ist ein exakter Randschluss bei Klasse-V-Füllungen schwerer als bei Schneidekantenaufbauten zu erzielen.

2.6.2 Applikationstechniken

Solange es keine schrumpfungsärmeren Composites gibt und die Dentinhafung der überwiegenden Zahl der Haftvermittler zu gering ist, um den Schrumpfkraften der Composites widerstehen zu können (42), sollte eine entsprechend anspruchsvolle Applikationstechnik angewendet werden (123).

Weil die Schrumpfungs-Vektoren zur Strahlungsquelle gerichtet sind (47), bietet der Einsatz von lateral reflektierenden Leuchtkeilen bei approximalen Kavitäten die Möglichkeit, die Vektororientierung auszunutzen und eine zervikale Randintegrität herzustellen. Eine Lichtapplikation nur auf die Okklusalfäche würde meist zum Verlust der zervikalen Haftung führen (123).

Um die bei der Polymerisation von Composites einhergehende Schrumpfung zu kompensieren, sollten vorzugsweise lichthärtbare Werkstoffe eingesetzt werden, die in Schichten von maximal 2 mm aufgetragen und ausreichend bestrahlt werden (104, 106, 108). Hiermit ist es außerdem möglich, die freie Oberfläche der Inkremente im Verhältnis zur Verbundfläche groß zu halten, was die Kontraktionsspannung wesentlich mildert (41, 58). Mit der „Inkrementtechnik mit gezielter Lichtumhärtung“ ist man in der Lage, die Randqualität von Klasse II Compositefüllungen zu verbessern, indem der approximale Kasten in drei Schritten gefüllt wird (123). DONLY et al. (52) konnten mit Dehnungsmessungen an den Höckerwänden nachweisen, dass durch eine inkrementelle bukkolinguale Füllungstechnik die Höckerauslenkung um fast die Hälfte gegenüber einer einphasigen Aushärtung reduziert wird.

Eine exzellente Randadaptation, Widerstandsfähigkeit und Festigkeit des Haftverbundes verhält sich gegensätzlich proportional zu der Eigenspannung. Des-

halb haben vorpolymerisierte Füllungen eine gut Randspaltqualität und geringe Zugkrafteinwirkung auf die Höcker (122).

Für REINHARDT und VAHL kann der Quotient aus Elastizitätsmodul und Abbindezeit eine verlässliche Aussage über die zu erwartende Randspaltbildung wiedergeben. Eine kurze Abbindezeit führt zu einem hohen Quotienten und korreliert mit einem mangelhaften Randschluss (159).

2.6.3 Lichthärtung

Die heute übliche Polymerisation durch Bestrahlung erfolgt mit sichtbarem Licht, weil es besser als UV-Strahlung durch die Zahnhartsubstanz und tiefer in die Composites dringt (158). Ein optimaler Anteil der Polymerisation und eine minimale Schrumpfung sind normalerweise gegensätzliche Ziele, da eine gesteigerte Umwandlung des Monomers ausnahmslos zu gesteigerter Polymerisationsschrumpfung führt. Beide Parameter sind jedoch notwendig für eine dauerhafte Composite-Restauration.

Mit üblichen Bestrahlungsgeräten und Bestrahlzeiten von 40 Sekunden können Schichtdicken bis zu 4,5 mm ausgehärtet werden (187). RUEGGERBERG hält eine Lichtintensität von 400 mW bei einer Bestrahlungsdauer von 60 Sekunden und einer maximalen Schichtdicke von 2 mm für notwendig (169).

Oberflächenhärte und Scherfestigkeit sind nicht direkt linear an die Belichtungszeit mit einer oberen Grenze gebunden. Eine Untersuchung von BAHARAV et al. (11) über den Einfluss der Bestrahlungszeit auf die Steifigkeit und Härte zeigt, dass die Scherfestigkeit durch eine längere Bestrahlungszeit von über 20 Sekunden nicht wesentlich erhöht wird. Die Bestrahlungszeit zur Erreichung optimaler materialtechnischer Werte schwankt zwischen den Produkten. Die kürzeste Bestrahlungszeit bringt nicht immer die besten materialtechnischen Werte. Da dieser Versuch unter optimalen Laborbedingungen stattfand, wird für die Praxis eine längere Bestrahlungszeit von 60 Sekunden empfohlen.

Für UNO et al. hängt die Festigkeit allerdings direkt von der Lichtmenge ab (185).

Die in den ersten Sekunden der Bestrahlung extrem hohe Umsatzrate stoppt erst, wenn die irreversible Polymerisationsschrumpfung aufgrund einer weiteren Energiezufuhr unterbrochen wird oder keine Doppelbindungen mehr vorhanden sind (65). Lichthärtende Composites zeigen eine signifikant erhöhte Löslichkeit bei kürzeren Bestrahlungszeiten (191).

Durch die Anwendung eines gepulsten XeCl-Lasers mit 468 nm wird gegenüber einer regulären Polymerisationslampe eine gesteigerte Umsetzung des Monomers sowie eine verringerte Schrumpfung erreicht (183). Nach REINHARDT et al. steigt der Elastizitätsmodul mit zunehmender Intensität der Lichtquelle (157). Eine Verbesserung der mechanischen Eigenschaften kann durch verlängerte Bestrahlung erfolgen.

KANCA (93) beobachtet, dass eine zeitliche gestreckte und nur kurzfristige Bestrahlung an Klasse I Füllungen keinen negativen Einfluss auf die Härte hat, aber im Farbstoffpenetrationsverfahren eine sehr geringere Durchlässigkeit an den Füllungsändern bewirkt. GENTE und SOMMER erreichen mit einer selektiven Bestrahlungstechnik eine 30 - 50 %ige Reduktion der linearen Schrumpfung (74).

2.6.4 Einfluss der Füllungsmaterialien auf die Zahnschmelze

Bei der Dauerhaftigkeit von Restaurationen sind die maximalen Kaukräfte von Bedeutung, welche durchaus lokal bis zu 200 N betragen können (120). Eine Reduzierung der Zahnhartsubstanz, meist aufgrund kariöser Defekte, führt zu einer höheren Flexibilität, geringeren Bruchfestigkeit und destabilisiert den Zahn (127). Bei Belastung der Kavität wird die Zahnhartsubstanz deformiert und die Kavitätengröße hat dabei einen bedeutenden Einfluss auf die Verformung gefüllter Zähne (77). Die Verformung einer Restauration unter Belastung wird

auch von den physikalischen Eigenschaften des Füllungsmaterials bestimmt. Bei Eingliederung in präparierte Zähne sind diese Merkmale allerdings nicht ausreichend, um das Verhalten zu beschreiben. Hier spielt auch die Geometrie der Kavität und die Vektoren der Polymerisationsschrumpfung eine Rolle (167, 194).

Die Versorgung von Zahndefekten mit adhäsiv befestigten Composites oder Einlagefüllungen stabilisieren den geschädigten Zahn und die Höcker bei Kaubelastungen gegenüber einem ungefüllten Zustand (116, 131, 135). Gegenüber einem präpariertem, ungefüllten Prämolaren erhöhen adhäsive Materialien, abhängig von der Fülltechnik, die Frakturfestigkeit um das 2 - 6-fache (131).

JØRGENSEN et al. untersuchen die Deformationen von verschiedenen Kavitäten bei axialer Belastung. Bei Belastungen mit max. 157 N (entsprechend 16 kg) sind Deformationen von 0,98 - 9,8 $\mu\text{m}/\text{N}$ (0,1 - 1,0 $\mu\text{m}/\text{kg}$) in axialer Richtung der Kavität üblich (92). Die Deformation von der Zahnhartsubstanz durch die Schrumpfung des Befestigungszements ist beträchtlich, wird aber auch von der Dehnbarkeit der Zahnhartsubstanz stark beeinflusst. So ist die Spannung bei einem im Dentin zementierten Klasse V Compositeinlay signifikant geringer gegenüber einem zementierten Keramikinlay (66).

LUTZ et al. finden in ihren Untersuchungen heraus, dass 40 min nach dem Legen der Füllung sich die Höckerspitzen je nach Variante um 11,5 - 37,5 μm annähern (122). Bis zu einer Kraft von 40 N, entsprechend der Probenfläche eine Spannung von 1 MPa, nähern sich die Höcker um 20 μm linear der Kraftzunahme an. Aufgrund der nachfolgenden Randspaltuntersuchungen schließen sie, dass eine exzellente Randadaptation, Widerstandsfähigkeit und Festigkeit des Haftverbundes sich gegensätzlich proportional zu der Eigenspannung verhält.

LANG et al. untersuchen die Verformung bei verschiedenen Füllungsmaterialien mit der 3D-Speckle-Interferometrie und finden heraus, dass Veränderungen am Füllungsrand bei großen Kavitäten ausgeprägter sind (116). Elastische Materialien werden am Ort der Lastaufnahme verformt, die übrigen Anteile der Füllung unterliegen keiner messbaren Formveränderung. Starre Materialien werden körperlich in die Restauration verlagert und es kommt zu einer Verwindung der Zahnhartsubstanz mit Randspaltbildung. Das Maß der Verformung belasteter Zähne ist hierbei wesentlich von der verbliebenen Zahnhartsubstanz abhängig, die Art der Formveränderung von der Restauration (116). Bei Compositefüllungen kommt es im Gegensatz zu Inlays nicht zu einer Höckeraufbiegung, sondern zu Deformationen am Füllungsmaterial (115).

Unter Zuhilfenahme der dreidimensionalen Finite-Elemente-Methode (FEM) an gefüllten Prämolaren werden im Höckerspitzenbereich aufgrund der Expansion von Amalgam eine Druckspannung von 30 MPa und bei der Schrumpfung vom Composites eine Kontraktionsspannung vom 3 MPa errechnet (184).

2.7 Kräftemessung bei Polymerisationsschrumpfung an Composites

2.7.1 Einleitung

Die Polymerisationsschrumpfung des an Kavitätenwänden gebundenen Composites führt zu einer Zugbelastung, welche das Restaurationsmaterial, die Verbundschicht sowie die Zahnhartsubstanz belastet. In einer adhäsiv befestigten Füllung wird das Composite zum Ausgleich der Kontraktion gedehnt und Spannung auf den Zahn ausgeübt. Die Einwirkung der Kraft führt zu einer Dimensionsänderung von Füllung und Zahn.

Nicht nur Schrumpfung, sondern auch Temperaturschwankungen und Kaubelastungen wirken auf den Zahn ein. Bei Überschreitung der adhäsiven oder kohäsiven Festigkeit kommt es zu Brüchen. Da die Polymerisations-

schrumpfung gegenüber der mastikatorischen Funktion nicht nachlässt, muss für die praktische Anwendung besonders diese reduziert werden. Die destruktive Spannung beginnt schon mit dem Polymerisieren der Füllung und schreitet fort, wenn mechanische Einwirkungen die Struktur des Composites schwächen.

Seit Einführung der Composites ist die Forschung enttäuscht über den widrigen Effekt dieser Schrumpfkraft auf das Composite sowie auf deren Auswirkung auf die Integrität der Zahnhartsubstanz (2). Für eine Reihe von materialtechnischen Eigenschaften gibt es standardisierte Prüfmethode, nicht aber für die Kräftemessung während der Polymerisation.

Erste Kraftmessungen während der Polymerisationsschrumpfung veröffentlichte BOWEN schon 1967 (19). In den 70'er Jahren führten HEGDAHL und GJERDT (83) Messungen durch, aber erst seit den 80'er Jahren sind umfassende Veröffentlichungen von ALSTER (1), BOWEN (16, 19), DAVIDSON (40, 42, 41), FEILZER et al. (58, 60, 61, 63), KUNZELMANN (111) und CHEN (28) vorhanden.

2.7.2 Beeinflussende Faktoren der Kräftemessung

Kavitätengeometrie:

Ein Hauptgrund für die Kontraktionsspannung ist das Verhältnis der gebundenen zur freien Oberfläche des Composite-Prüfkörpers (19, 41). FEILZER et al. führen umfangreiche Untersuchungen zum Fließverhalten von Composites in Bezug auf die Kontraktionsspannung durch (58, 60, 61). Dabei stellen Sie fest, dass das Restorationsvolumen, mit Ausnahme sehr dünner Schichten, praktisch keinen Einfluss auf die Spannungsentwicklung hat, während das Verhältnis gebundener Oberfläche zu freier Oberfläche („configuration factor“ oder C-Faktor) einen Orientierungswert ergibt, der zu den Haftwerten zwischen Zahnhartsubstanz und Composites in Korrelation gesetzt werden kann. Im allgemeinen steht eine Steigerung der Schrumpfungsspannung im Zusammenhang mit einem hohen C-Faktor.

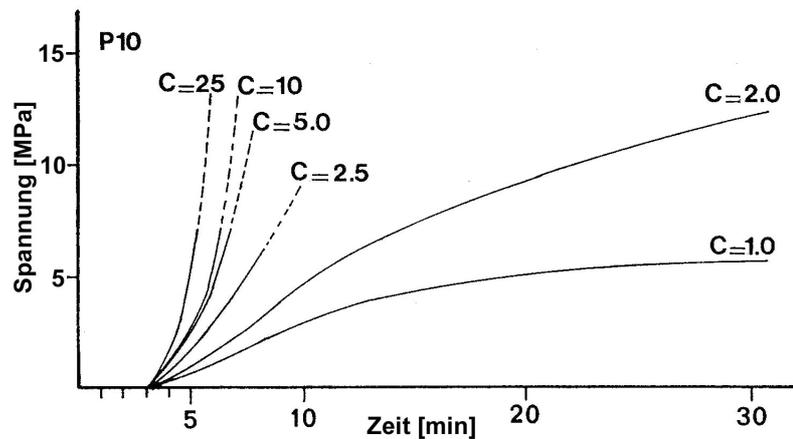


Abb. 2-4: Verhältnis C-Faktor zu Spannung bei dem Material P10 (Fa. 3M) (nach: FEILZER et al. 58)

FEILZER et al. führen diese axialen Spannungsmessungen mit Autopolymerisaten unter Berücksichtigung der Auslenkung der Messeinrichtung während der Aushärtung durch. In der Studie werden verschiedene zylindrische Formen in unterschiedlichen Dimensionen untersucht. Die Berechnung des C-Faktors, das Verhältnis der gebundenen zur freien Oberfläche für einen Zylinder, erfolgt nach folgender Formel:

$$C = \frac{\text{Kreisflächen}}{\text{Zylinderwandfläche}} = \frac{2\pi \left(\frac{1}{2}d\right)^2}{2\pi \frac{1}{2}dh} = \frac{d}{2h}$$

Abb. 2-5: Formel zur Berechnung des C-Faktors.

Hieraus ergeben sich die korrespondierenden C-Faktoren von rechtwinkligen und zylindrischen Prüfkörpern zu den Füllungsklassen:

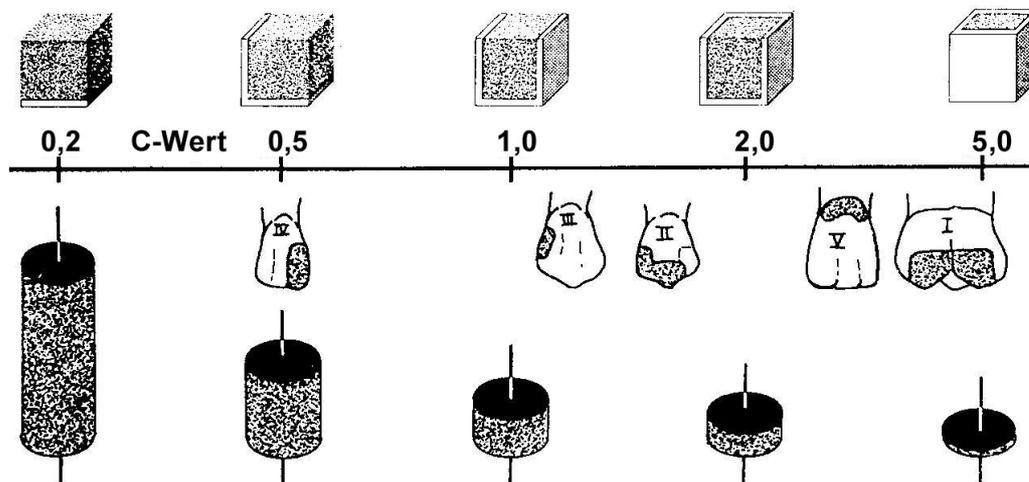


Abb. 2-6: Schematische Darstellung korrespondierender C-Faktoren von rechtwinkligen und zylindrischen Prüfkörpern sowie den Füllungsklassen I-V (58).

Bei späteren vergleichenden *in vivo* Untersuchungen an Molaren konnte kein Zusammenhang zwischen der Größe des C-Faktors und der Spaltbreite bei einer Nutzung von Compomeren festgestellt werden, sehr wohl allerdings bei Composites (186).

Beeinflussung der Spannung durch das Fließverhalten

In gewissem Umfang kann die Polymerisationsschrumpfung durch die Auswahl der Materialien und die Handhabung kontrolliert werden. Sofern das Füllungs-material noch fließfähig ist und ungehindert schrumpfen kann, ist die Spannung gering. Die größte Verformung findet vor der Aushärtung statt. Das aushärtende Material überlebt die Schrumpfkraft nur, weil es nach der Festigung selbst steif und fest ist. Der Füllstoffgehalt bestimmt jedoch auch die Fließfähigkeit; hochgefüllte und wenig schrumpfende Materialien müssen nicht generell besser sein (16, 41, 60). Die Form und die Lage sind spannungsbeeinflussende Faktoren (42, 58).

Bevorzugt soll während der Aushärtung die Fließfähigkeit ab- und die Härte zunehmen. Je länger dieser Härtungszustand dauert, desto besser kann die Füllung die Schrumpfung kompensieren. Deshalb leiden Autopolymerisate gegenüber den Photopolymerisaten weniger unter der Schrumpfungsspannung.

Beeinflussung der Spannung durch eine erhöhte Elastizität

Bei gleicher Dehnung verursachen starre Composites eine höhere Spannung als elastische Materialien. Weichere Composites können durch die günstigeren Fließeigenschaften die initiale Polymerisationsschrumpfung teilweise ausgleichen und eignen sich besser zur Herstellung eines guten Randschlusses (95, 197). Diese Eigenschaften machen auch NOORT et al. verantwortlich für die bessere initiale Randadaptation der Composites (188). KEMP-SCHOLTE und DAVIDSON bestätigen dies an Klasse V Composites mit niedriger Festigkeit (95). Sie stellen fest, dass sich mikrogefüllte Composites gegenüber starren Hybrid-Composites besser zur Herstellung eines guten marginalen Randschlusses eignen.

Sofern kaustabile Composites benötigt werden, ist es besser, eine adhäsive Schicht einzuführen. Diese Schicht (Liner) soll durch bessere viskoelastische Eigenschaften der initialen Polymerisationsschrumpfung entgegenwirken (41, 95). Dieses Schichtmaterial sollte nicht nur flexibel sein, sondern auch die Fähigkeit haben, genug Dehnung zu kompensieren.

Die Schichtdicke der Haftvermittler hängt von der Zusammensetzung und Struktur ab. Große Moleküle und ein hoher Anteil an Füllstoffen führt zu einer hohen Viskosität, wodurch nur eine unzureichende Benetzung der Mikroporen im Dentin möglich ist. Ein zweistufiges System mit einem dünnfließenden Haftvermittler sowie einer aufragenden Schicht ist deshalb notwendig (174).

Porosität:

ALSTER et al. stellen fest, dass Porositäten innerhalb eines Befestigungscomposites die maximale Spannung ungeachtet der Aktivierungsmethode vermin-

dern (1). FEILZER et al. führen die geringere Schrumpfungsspannung von chemisch härtenden Composites auf die beim Mischvorgang eingearbeiteten Porositäten zurück (63). Die Porositäten in dem Befestigungsmaterial können hier als freie Oberfläche, entsprechend einem kleinen C-Faktor, angesehen werden. Wegen der fehlenden molekularen Bindungen kann Gas gut expandiert oder komprimiert werden, feste Strukturen erlauben aber keine solchen isothermalen Volumenänderungen. Wenn jedoch Poren in die Strukturen eingearbeitet sind, kann dem Haftvermittler oder Composites eine Ausdehnung ermöglicht werden. Dies ist möglicherweise eine Erklärung für die Beobachtung von GARBEROGLIO et al., dass zwischen Haftvermittler und Photopolymerisat appliziertes Autopolymerisat die Randschlussqualität steigert (72).

Beeinflussung der Spannung durch unterschiedliche Lichtintensitäten

Lichthärtende Composites haben in der Praxis erhebliche Vorteile. Der Polymerisationsgrad wird jedoch beeinträchtigt durch unzureichende Lichtzufuhr, zu kurze Bestrahlzeiten oder Absorption des Lichts in dem Füllungsmaterial oder der Umgebung.

Eine Verlangsamung der Polymerisationsumsatzrate durch veränderte Lichtintensitäten ist eine Möglichkeit, die initiale Schrumpfungsspannung zu reduzieren. Durch eine verringerte Lichtintensität wird die Polymerisationsreaktion verlangsamt, nicht aber notwendigerweise die endgültige Polymerisationsumsatzrate (64) und die damit verbundene erhöhte Schrumpfung (172). UNTERBRINK und MUESSNER weisen nach, dass unterschiedliche Bestrahlungsintensitäten keinen signifikanten Effekt auf die Schrumpfung oder Härte bis auf eine Tiefe von 4,5 mm zweier Composites haben. Unterschiede gibt es jedoch bei den physikalischen Eigenschaften und der marginale Spalt erhöht sich mit höherer Lichtintensität (187).

Beeinflussung der Spannung durch die Temperatur:

Höhere Temperaturen beschleunigen und intensivieren den Abbindeprozess (59). Umstritten ist, ob der thermische Ausdehnungskoeffizient eine prakti-

sche Bedeutung bei Füllungsrandproblemen hat (6, 193). BOWEN erwärmt in einem Versuch nachträglich Autopolymerisate auf die Aushärtungstemperatur, wobei keine auch nur näherungsweise Reduzierung der Schrumpfkraft auf 0 erreicht wird (19). Bestätigt wird dies von ASMUSSEN, der aufgrund einer relativ kleinen Wall-to-Wall Polymerisationskontraktion und entsprechender hygroskopischer Ausdehnung die marginale Passgenauigkeit bei Temperaturschwankungen nicht beeinträchtigt sieht. Der thermische Ausdehnungskoeffizient ist deshalb für ASMUSSEN kein Faktor von klinischer Bedeutung (5).

Beeinflussung der Spannung durch Wasser:

Die hygroskopische Expansion bei einigen Composites ist vom reinen Volumenwert her in der Lage, das Schrumpfvolumen auszugleichen. Sie verläuft aber über einen wesentlich längeren Zeitraum und hat somit auf die initiale Restaurationshaftung keinen Einfluss (siehe Kapitel 2.4.2.3).

2.7.3 Messeinrichtungen

Bei den vorliegenden Versuchen zur Kraft- und Spannungsmessung während der Polymerisationsschrumpfung werden verschiedene Aufbauten an einer Universalprüfmaschine verwendet, wobei in der Regel Versuche an zylindrischen Prüfkörpern vorgenommen werden.

Die Befestigung der Composites an den Lastaufnahmen erfolgt anfangs makromechanisch (16, 19, 41, 83), später mithilfe silanisierter Metallflächen (1, 2, 3, 28, 29, 30, 31, 58, 110) oder Glasflächen (63) zu der Messapparatur.

Die Messeinrichtungen mit dem Lastaufnehmer und Adapter sind nicht total starr sondern geben bei einer Lasteinwirkung der Schrumpfung des Prüfkörpers nach. Diese durch die Polymerisationskontraktion bedingte Längenänderung vermindert die gemessene Schrumpfkraft gegenüber einem vollkommen unnachgiebigen Aufbau. Infolgedessen gibt es zwei verschiedene Ansätze bei der Messung der Kontraktionskraft – mit (1, 3, 16, 19, 31, 58, 63) bzw. ohne

(28, 29, 30, 40, 41, 83, 110, 111) Korrektur einer lastbedingten Längenänderung, welches eine unterschiedliche Ergebnisverteilung und fehlende Vergleichbarkeit zur Folge hat. Eine zur Korrektur der lastbedingten Längenänderung ausgeübte Zugkraft bewirkt bei den kleinen Proben eine größere Schrumpfungskraft und Spannung gegenüber den größeren Proben (2, 41).

Daneben beschäftigen sich die Untersuchungen auch mit dem Einfluss der freien zur gebundenen Oberfläche (19, 58), dem Einfluss der Schichtdicke des Haftvermittlers auf den Verbund (31), dem Einfluss der verschiedenen Härtungsmethoden (58, 110) und den materialtechnischen Auswirkungen bei einer Aushärtung im belasteten Zustand (41). Ebenso unterschiedlich werden die Untersuchungsergebnisse entweder in Spannung (MPa) oder Kraft (N) dargestellt.

Erste Spannungsmessungen führt BOWEN 1967 an verschiedenen Materialien sowie Composites unter fünf verschiedenen Bedingungen durch (19). Die Kontraktionsspannung nimmt vom Composites über Silikate, Phosphate, Zinkoxideugenol zum Amalgam hin ab. Folgende grundsätzlichen Tendenzen in Bezug auf die Beschaffenheit der Probekörper sowie der Messeinrichtung zeigt BOWEN hier auf, welche in den späteren Untersuchungen meist bestätigt werden:

- Längere Probe bewirken, sofern die lastbedingte Längenänderung des Prüfaufbaus nicht berücksichtigt wird, eine höhere Spannung (Spannungsmaximum 2,1 MPa).
- Im Gegensatz dazu bewirken bei einer Korrektur der lastbedingten Längenänderung des Prüfaufbaus, die ursprüngliche Länge der Proben wird also konstant gehalten, kürzere Proben eine höhere Spannung (Spannungsmaximum 8,7 MPa).
- Eine geringe freie Oberfläche des Prüfkörpers, entsprechend FEILZER ein hoher C-Faktor, führt zu den höchsten Spannungen (Spannungsmaximum 13,1 MPa).

- Luft einschließen und Sauerstoffkontakt bewirken eine verzögerte Spannungsentwicklung.
- Es kann nicht davon ausgegangen werden, dass eine exotherm bedingte Schrumpfung für diese Spannungsentwicklungen ursächlich ist.
- Geringste Verformungen der Kavitätenwände vermindern die Spannung erheblich.

Die Korrektur dieser Längenänderung des Prüfaufbaus erfolgt bei BOWEN mit einer Justierungsgenauigkeit von $0,5 \mu\text{m}$ (16, 19).

BOWEN et al. messen 1983 bei autopolymerisierenden Composites Kräfte von 2,3 - 7,6 MPa (16). Aufgrund des schnellen Spannungsanstieges postuliert BOWEN, dass die Verbundfestigkeit eines Haftvermittlers zu jeder Zeit größer sein muss als die Zugspannung der Composites. Ein Einfluss unterschiedlicher Füllstoffgehalte ist nicht feststellbar und dies wird auf die besseren viskoelastischen Eigenschaften von ungefüllten Composites zurückgeführt.

Die Gruppe ALSTER, DAVIDSON, DE GEE und FEILZER aus Amsterdam beschäftigen sich in den letzten beiden Dekaden mit der Spannungsmessung. FEILZER et al. untersuchen 1987 verschiedene Kavitätengrößen und -formen in Bezug auf die Schrumpfungsspannung. Während der Mess- und Aushärtungsdauer kommt es bei den Prüfkörpern mit einem C-Faktor > 1 zu häufigen und bei einem C-Faktor bis 2 regelmäßig zu kohäsiven Frakturen, bei einem C-Faktor > 2 brechen alle Objekte. Für große C-Faktoren, wie sie bei Inlay-Systemen auftreten, sind hohe Spannungen zu erwarten. Die Schrumpfungsspannung wird kontinuierlich gemessen und die durch die Schrumpfung hervorgerufene Längenänderung an der Messdose kann mit einem Dehnungsmesser und einer Genauigkeit von $0,2 \mu\text{m}$ ausgeglichen werden. 1993 wird die Schrumpfung von Licht und Autopolymerisaten in Beziehung zu dem C-Faktor untersucht. Während der Aushärtung zeigen die Photopolymerisate eine höhere Schrumpfungsspannung, können dieser Spannung eine höhere kohäsive Kraft entgegensetzen und haben einen niedrigeren Flow als die chemisch härtenden

Composites. Das Einmischen von Porositäten verlangsamt und senkt die Schrumpfungsspannung. Dies ist auf die Sauerstoffinhibition und die Erhöhung der ungebundenen Oberfläche zurückzuführen. Chemisch härtende Composites weisen trotz ihres theoretisch günstigeren Polymerisationsprofils aufgrund von Porositäten schlechtere Materialeigenschaften als lighthärtende Produkte auf (1, 63).

Bei der Nutzung von Composites als Befestigungswerkstoff entsteht die Frage, ob das spannungsbeeinflussende ungünstige Verhältnis freier zu gebundener Oberfläche (hoher C-Faktor) durch eine Dehnbarkeit des Trägermaterials ausgeglichen wird. ALSTER et al. messen an der gesamten Messeinrichtung mit verschiedenen Sensor- und Verschraubungsarten eine Dehnbarkeit von 152 - 785 N/ μm (3). Daraus schließen die Autoren, dass gerade bei dünnen Schichten die Dehnbarkeit der Messeinrichtung einen erheblichen Einfluss auf das Messergebnis hat.

Bei Schichtdickenmessungen wird beobachtet, dass die Kontraktionsspannung mit zunehmender Schichtdicke deutlich abnimmt und 2,7 mm große Proben eine Kontraktionsspannung von 5,2 MPa, umgerechnet auf die Probengröße 116 N, bewirken (2). Die Autoren führen diesen Effekt auf die Korrektur der lastbedingten Längenänderung des Prüfaufbaus zurück.

HEGDAHL und GJERDT messen ohne Berücksichtigung der lastbedingten Längenänderung des Prüfaufbaus bei einem C-Faktor der Probe von 0,4 Spannungen bis zu 1,9 MPa, umgerechnet auf die Probengröße 24 N (83). Sie stellen eine Auslenkung der Messdose von 11 - 12 μm / 24 N fest und gehen, ebenso wie BOWEN (19), davon aus, dass die Spannung abhängig von der Resilienz bzw. Elastizität und der damit gefüllten Struktur ist.

DAVIDSON und DE GEE legen 1984 dar, dass die Schrumpfungsspannung durch den Flow und nicht aufgrund interner Brüche kompensiert wird (41). Ihre Untersuchung über die Festigkeit zweier Materialien (Silar, Concise) findet

während der Aushärtung mit und ohne Freiheitsgraden der Messeinrichtung statt, ohne dass die lastbedingte Längenänderung berücksichtigt wird. Die gemessenen Schrumpfungsspannungen betragen 2,8 - 3,9 MPa, die kalkulatorische Spannung liegt jedoch zwischen 32 - 68 MPa (41). DAVIDSON und DE GEE vergleichen diese Werte mit denen von HEGDAHL und GJERDT (83) sowie BOWEN (19) und führen die Unterschiede auf den unterschiedlichen Aufbau der Messeinrichtung, mit und ohne Kompensation der Längenänderung, zurück, ohne dabei aber die Freiheitsgrade des Prüfkörpers zu berücksichtigen. Fraglich bleibt noch, ob die Haftkraft zu dem Dentin ausreicht. DAVIDSON et al. messen in einem folgenden Versuch gleichzeitig die Schrumpfungsspannung sowie den Verbund zum Dentin (40). Die Schrumpfungsspannung ist zu allen Zeitpunkten der Härtung niedriger als die Haftkraft zum Dentin. Bei einer großen gebundenen Oberfläche wächst die Schrumpfungsspannung stark an und zerstört den Verbund zum Dentin.

KUNZELMANN und HICKEL demonstrieren, dass ohne Berücksichtigung der lastbedingten Längenänderung des Prüfaufbaus man in Bezug auf das Schichtdicken-Kraftverhältnis gegenteilige Ergebnisse erhält (111). Größere Spaltbreiten verursachen hier eine größere Spannung (bis 2 MPa) und die Zugkräfte (bis 16 N) der verschiedenen Probendurchmesser unterscheiden sich nur gering, die Zugspannung nimmt dementsprechend mit steigendem Durchmesser ab. Hieraus schließen die Autoren, dass im Gegensatz zu FEILZER et al. (58) weder das Volumen noch das Verhältnis von freier zu gebundener Oberfläche Einfluss auf die Schrumpfungskräfte haben.

CHEN et al. (28, 29, 30) messen bei 4 x 4 x 2 mm großen Proben (C-Faktor 0,3) in dem neu entwickelten „Strain-Stress-Analyzer“ Kräfte bzw. Spannungen zwischen 20 - 30 N (2,5 - 3,7 MPa), 1,4 - 4 MPa (11 - 32 N) und 1,9 - 4,1 MPa (15 - 33 N).

In der klinischen Anwendung wird regelmäßig ein Haftvermittler benutzt. CHOI et al. (31) bestimmen den Einfluss verschiedener Schichtdicken eines Haftvermittler auf die Kontraktionsspannung bei der Polymerisation von Com-

posite. Durch die Anwendung eines Haftvermittlers messen die Autoren eine Reduzierung der Kontraktionsspannung von 17 – 25 %, größere Schichtdicken des Haftvermittlers vermindern die Kontraktionsspannung weiter und erhöhen die Randdichtigkeit.

2.7.4 Belastungsanalysen und Finite-Elemente-Methode

Die Untersuchung verschiedener Kavitätenformen und Materialien ist zur deren Weiterentwicklung notwendig. Die Belastungen an den verschiedenen Kavitätenflächen sollte nicht nur experimentell bestimmbar sondern auch berechenbar sein.

Bereits 1930 stellt BRONNER Präparationsformen mit dem Ziel zur Spannungsminimierung vor (22) und die ersten Studien über optimale Kavitätenformen mithilfe von zweidimensionalen photoelastische Belastungsanalysen führt NOONAN 1949 durch (142). Dreidimensionale photoelastischen Belastungsanalysen mit verschiedenen Präparationsformen hat DAVIDSON 1964 (46) veröffentlicht. Mithilfe der EDV konnte in den 70'er Jahren erstmals die Finite-Elemente-Methode (FEM) für biomechanische Analysen angewendet werden (21), wobei zuerst nur die zweidimensionale FEM (146, 188, 199, 202) und später die dreidimensionale FEM (168, 184) eingesetzt werden.

VAN NOORT verdeutlicht anhand seiner zweidimensionalen FEM-Belastungsanalysen, dass mit steigendem Elastizitätsmodul die Zugspannungen im Grenzflächenbereich zwischen Schmelz und Composites ansteigen und schließt daraus, dass ein adhäsiver Bruch bei höher gefüllten Composites wahrscheinlicher ist (188). Bei Amalgamrestorationen treten teilweise höhere innere Spannungen gegenüber der Belastung auf.

TOPARLI et al. analysieren das Spannungsverhalten an gefüllten Prämolaren unter Zuhilfenahme einer dreidimensionalen FEM-Methode nicht nur im Belastungszustand, sondern auch die Auswirkungen während der Härtung einer

Amalgam- und Compositefüllung (184). Aufgrund der Abbindeexpansion vom Amalgam entsteht eine Druckspannung von 30 MPa und bei Composites durch die Schrumpfung eine Zugspannung von 3 MPa im Höckerspitzenbereich. Composites bewirken bei Belastung eine höhere Zugspannung im Schmelz als Amalgam. Obwohl hohe Druckspannungen im Schmelz auftreten, sind diese gegenüber der Druckfestigkeit relativ gering. Aufgrund der spröden Struktur sind die Zug- und Scherspannungen wesentlich wichtiger für die Integrität der Zahnhartsubstanz.

Wenngleich sich die FEM in der industriellen Forschung durchgesetzt hat und auch sehr detaillierte biomechanische Modelle entwickelt wurden, ist eine genaue Aussage aufgrund der großen Variabilität der physiologischen Strukturen zwischen den Individuen nur unzureichend möglich. Es kann nur das allgemeine Verhalten bei biologischen Strukturen beschrieben werden (135).

