

Aus dem Universitätsklinikum
der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster
Poliklinik für Zahnerhaltung
Direktor: Univ.-Prof. Dr. K. H. R. Ott

Glanz dentaler Nano-Komposite in Abhängigkeit von der Politur

INAUGURAL-DISSERTATION
zur
Erlangung des doctor medicinae dentium
der Medizinischen Fakultät
der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster

vorgelegt von
Heo, Hanno
aus Bochum

2009

Gedruckt mit Genehmigung der
Medizinischen Fakultät der
Westfälischen Wilhelms-Universität Münster

Dekan: Univ.-Prof. Dr. W. Schmitz
1. Berichterstatter: Univ.-Prof. Dr. K. H. R. Ott
2. Berichterstatter: Univ.-Prof. Dr. Dr. L. Figgener
Tag der mündlichen Prüfung: 26.10.2009

**Aus dem Universitätsklinikum
der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster
Poliklinik für Zahnerhaltung**

Direktor: Univ.-Prof. Dr. med. dent. K. H. R. Ott
Referent: Univ.-Prof. Dr. med. dent. K. H. R. Ott
Korreferent: Univ.-Prof. Dr. Dr. L. Figgener

Zusammenfassung

Glanz dentaler Nano-Komposite in Abhängigkeit von der Politur Hanno Heo

Der Glanz ist ein wichtiger Parameter zur Beurteilung einer Füllungsoberfläche und trägt somit wesentlich zu seinem äußeren Erscheinungsbild bei. Nur wenn es gelingt, eine Restauration farblich und glanztechnisch unauffällig in eine Kavität einzufügen – dies gilt vor allem für den Frontzahnbereich –, kann die optische Wirkung eines natürlichen Zahnes nachgeahmt werden. Laut Herstellerangaben verfügen viele Nano-Komposite über eine bessere Polierbarkeit gegenüber herkömmlichen Kompositen; klinisch sind jedoch auffallende Unterschiede in der Qualität unter ähnlichen Polierbedingungen festzustellen. Daher war es Ziel dieser Untersuchung, den Glanz von 8 auf dem deutschen Markt erhältlichen Nano-(Hybrid-)Kompositen, nach Bearbeitung mit einer zuvor festgelegten Poliermethode, zu ermitteln und zu vergleichen. Zur quantitativen Bestimmung dieser Eigenschaft wurde ein Reflektometer verwendet, welches die Oberflächenreflexion in drei unterschiedlichen Messwinkeln erfasst und das Ergebnis als so genannten Reflektometerwert in Glanzeinheiten (GE) wiedergibt. Mit Ausnahme des einzigen reinen Nano-Komposits wiesen alle übrigen getesteten Nano-Hybrid-Komposite nach der Politur signifikante Unterschiede ihrer Glanzwerte auf.

Zusammenfassend kann man sagen, dass die alleinige Zugabe von Nanofüllern zur Kompositmatrix nicht zwangsläufig zu einer besseren Polierbarkeit gegenüber herkömmlichen Kompositen führt, da weitere Faktoren, wie beispielsweise der Füllergehalt, die Art der übrigen enthaltenen Füllkörper und ihre Partikelgrößen, ebenfalls Einfluss auf das Polierergebnis und folglich auf den Glanz haben.

Tag der mündlichen Prüfung: 26.10.2009

Diese Dissertation ist in Dankbarkeit meiner Familie gewidmet.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Problemstellung.....	1
2	Grundlagen	2
2.1	Ästhetik.....	2
2.2	Glanz.....	3
2.3	Physikalische Grundlagen.....	5
2.3.1	Reflexion	5
2.3.2	Remission	6
2.3.3	Absorption	7
2.3.4	Farbe.....	8
2.3.5	Materialbedingte Eigenschaften.....	8
2.3.6	Oberflächenstruktur/Textur	10
2.3.7	Glanzschleier.....	10
2.4	Subjektive Glanzwahrnehmung.....	11
2.5	Zusammenfassung der physikalischen Grundlagen.....	11
2.6	Glanzmessung/Reflektometer	12
2.6.1	Messprinzip.....	12
2.6.2	Normierung	15
2.6.3	Glanzgrad/DIN 67530	16
2.7	Komposite	16
2.7.1	Klassifikation.....	17
2.7.2	Einteilung nach der Rheologie.....	21
2.8	Chemie der Komposite	22
2.8.1	Monomermatrix	22
2.8.2	Anorganische Füllkörper und deren Verbund	23
2.8.3	Weitere Zusätze.....	24
2.8.4	Aushärtungsreaktion und Polymerisationsschrumpfung.....	25
2.9	Werkstoffkundliche Parameter von Kompositmaterialien	27

2.9.1	Biegefestigkeit und E-Modul	28
2.9.2	Polymerisationstiefe und Härte	29
2.9.3	Ausarbeiten und Polierbarkeit	30
3	Eigene Untersuchungen	31
3.1	Materialien (Zusammensetzung nach Angaben der Hersteller)	31
3.2	Probenherstellung.....	34
3.3	Probenbearbeitung.....	37
3.4	Glanzmessung vor und nach der Bearbeitung	39
3.5	Datentransfer und Dokumentation der Messergebnisse.....	41
3.6	Vorversuche.....	41
3.6.1	Zum Glanz vor der Politur.....	41
3.6.2	Zur Festlegung der Bearbeitungsmodalitäten.....	46
4	Hauptuntersuchungen.....	51
5	Ergebnisse	52
5.1	Unbearbeitete Proben (gegen Glas polymerisiert).....	52
5.2	Messung nach Bearbeitung	58
5.3	Statistische Analyse	63
5.3.1	Varianzanalyse.....	63
5.3.2	t-Test.....	66
6	Diskussion.....	68
6.1	Diskussion der Fehlermöglichkeiten.....	68
6.1.1	Probenherstellung.....	68
6.1.2	Probenbearbeitung.....	69
6.1.3	Glanzmessung	70
6.2	Diskussion der Ergebnisse.....	71
6.2.1	Hochglanzpolierbarkeit von Nano-Kompositen.....	71
6.2.2	Klinische Relevanz	72
6.2.3	Glanz in Abhängigkeit von der Füllkörpergröße	73
7	Zusammenfassung.....	75
8	Literaturverzeichnis	76

9	Verzeichnis der im Text verwendeten Abbildungen.....	87
10	Verzeichnis der im Text verwendeten Tabellen.....	89
11	Lebenslauf	90
12	Danksagung.....	92
13	Anhang	I
13.1	Herstellernachweis	I
13.1.1	Probenmaterial.....	I
13.1.2	Vermessen und Bearbeiten	III
13.2	Wertetabellen	VI
13.2.1	Messwerte vor der Bearbeitung.....	VI
13.2.2	Messwerte nach der Bearbeitung	XII

1 Einleitung und Problemstellung

Laut Angaben vieler marktführender Komposithersteller zeichnen sich deren Neuentwicklungen, die so genannten Nano-Komposite, durch eine Vielzahl verbesserter physikalischer und klinischer Eigenschaften aus.

Eine wesentliche Weiterentwicklung soll unter anderem die überlegene Polierbarkeit der Nano-Komposite gegenüber herkömmlichen Kompositen darstellen. So werden zur Beschreibung eines Polierergebnisses nicht selten abstrakte Begriffe wie „Ästhetik“ oder „Glanz“ verwendet, wobei deren Interpretation sehr unterschiedlich zu sein scheint.

Die direkte Auswirkung von Polituren auf den messbaren Glanz dieser Füllungswerkstoffe wurde bisher aber nur vereinzelt überprüft [16; 79].

Dennoch werben viele Hersteller dentaler Komposite mit der Hochglanzpolierbarkeit ihrer Restaurationswerkstoffe, obwohl klinisch auffallende Unterschiede in der Qualität der Politur unter ähnlichen Bedingungen festzustellen sind.

Ziel dieser Untersuchung war es daher, den maximal zu erzielenden Glanz von 8 unterschiedlichen Nano-(Hybrid-)Kompositen, vor und nach der Bearbeitung mit einer festgelegten Poliermethode, zu ermitteln und miteinander zu vergleichen.

Um den Zusammenhang zwischen Polierbarkeit, Oberflächenbeschaffenheit und dem äußeren Erscheinungsbild von Kompositen besser verstehen zu können, werden nachfolgend zunächst die physikalischen Grundlagen zum Thema „Glanz“ erklärt.

2 Grundlagen

2.1 Ästhetik

Der Begriff „Ästhetik“ wird in vielen Bereichen unseres täglichen Lebens – so auch in der Zahnmedizin – verwendet. Massenmedien und Werbeindustrie vermitteln seit Jahren gewisse Schönheitsideale, in denen vor allem Wert auf das äußere Erscheinungsbild gelegt wird. Auf die Zahnmedizin bezogen gehört zu einem attraktiven Gesicht ein perfektes Lächeln mit weißen Zähnen. So wird der Wunsch der Patienten nach schönen und natürlich aussehenden Zähnen immer größer. Verständlicherweise werben viele Komposithersteller mit innovativen Produkten, die dem ästhetischen Anspruch des Patienten gerecht werden sollen.

Vor allem bei Restaurationen im Frontzahnbereich spielen nicht nur die üblichen Qualitätskriterien, wie beispielsweise Gewebeverträglichkeit, Abriebfestigkeit oder Randspaltbildung eine Rolle, sondern auch die natürliche Gestaltung.

Der Terminus „Ästhetik“ hat eine lange philosophische Tradition und wird immer häufiger in der Zahnmedizin verwendet. Da dieser jedoch nicht objektivierbar oder messbar ist, fällt eine einheitliche Beurteilung schwer. So kann eine Frontzahnrestauration auf den Zahnarzt völlig anders wirken als auf den Patienten.

Das Erscheinungsbild wird hinsichtlich der Ästhetik von drei Parametern bestimmt:

- von der Zahnform einschließlich Größe und Stellung,
- von der Zahnfarbe und der Transluzenz
- und von der Textur (Oberflächenstruktur).

Die Zahnform und die Harmonie der Proportionen orientieren sich an der Symmetrie und dem Einfügen in die Mundpartie des Gesichts allgemein; daher ist dieser erste

Parameter absolut individuell festzulegen. Die Zahnfarbe lässt sich anhand von definierten Farbskalen bestimmen und ist somit ein Wert, der mehr oder minder direkt durch die Zahnfarbe des zu behandelnden Zahnes und der benachbarten Zähne vorgegeben wird. Darüber hinaus kann die äußerliche Wirkung eines Objektes auch über die Textur beeinflusst werden. Der Begriff Textur (lat. *textura* „Gewebe“) bezeichnet allgemein die Beschaffenheit, die Struktur oder die Zusammensetzung von Dingen und schließt somit die Oberflächenbeschaffenheit mit ein.

2.2 Glanz

Der Begriff „Glanz“ ist nicht allgemein anerkannt definiert, sondern wird in der Literatur sehr unterschiedlich interpretiert. So wird der Glanz in einem Lexikon von 1961 [74] als das Verhältnis zwischen gerichtet und diffus reflektiertem Licht beschrieben, wobei weitere Einflussfaktoren des Glanzes unberücksichtigt bleiben. Fest steht jedoch, dass es sich bei der Eigenschaft „Glanz“ um das Zusammenwirken von Licht und physikalischen Oberflächeneigenschaften handelt. Der Glanz ist ein optischer Effekt, der in erster Linie durch Lichtbrechung und Reflexion erzeugt wird. Er ist eine sehr stark materialabhängige Eigenschaft [14] und wird durch die Oberflächenbeschaffenheit eines Objekts wesentlich beeinflusst. Oberflächen haben daher je nach ihrem Aufbau und ihrer Zusammensetzung viel, weniger oder keinen Glanz [58]. Er entsteht durch Helligkeitsdifferenzen auf Oberflächen und ist umso stärker, je höher der Anteil des reflektierten Lichts ist [58]. Voraussetzung hierfür ist jedoch eine möglichst glatte Oberfläche, die eine nahezu ausschließlich gerichtete Reflexion ermöglicht. Eine raue Oberfläche zerstreut die Lichtstrahlen in verschiedenste Richtungen, und man spricht dann von diffuser Reflexion. Somit nimmt der Glanz oder Schimmer einer Oberfläche ebenso zu wie der Anteil des Streulichts abnimmt [58]. Reduziert sich die Streuung auf eine

Reflexion, wie es bei einem polierten Metall der Fall ist, weist ein grauer Körper einen charakteristischen metallischen Glanz auf [82].

Da der Glanz eine visuelle Wahrnehmung beim Betrachten von Oberflächen ist, fließen zusätzlich auch subjektive Bewertungsmaßstäbe des Betrachters mit ein. All diese Komponenten gemeinsam tragen – ganz individuell gewichtet – zum Erscheinungsbild bei. Dabei ist der subjektive Sinneseindruck von unterschiedlichen Faktoren abhängig und wird nachfolgend noch näher erläutert.

Objektiv betrachtet ist die Glanzwahrnehmung umso ausgeprägter, je gerichteteter und vollständiger das Licht reflektiert wird. Nach dem Reflexionsgesetz entspricht der Einfallswinkel dem Ausfallswinkel des Lichts. Wird also mehr Licht in die Hauptreflexionsrichtung gebrochen, so glänzt ein Objekt stärker. Umgekehrt bedeutet dies: je mehr das Licht gestreut wird und je größer die Absorption ist, desto geringer ist die Intensität der gerichteten Komponente und umso matter erscheint eine Oberfläche.

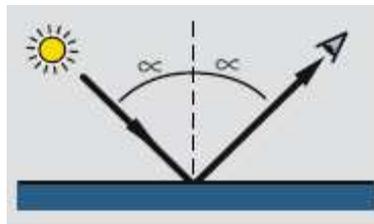


Abbildung 1: Prinzip der Reflexion

Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass jede Oberfläche eines Objekts einen mehr oder weniger großen Anteil an gerichteter Reflexion aufweist. Zusätzlich gilt es aber, die subjektiven Bewertungsmaßstäbe des Betrachters hinsichtlich der Wahrnehmung von Glanz zu berücksichtigen. Hier sind nicht nur Sehvermögen und erfahrungsbedingte Unterschiede in der Bewertung eines Beobachters zu nennen, sondern auch seine derzeitige Stimmung. Sogar die Fokussierung des Auges ist ein entscheidender Faktor für den individuellen Eindruck eines jeden Beobachters.

2.3 Physikalische Grundlagen

Das auf die Oberfläche eines Objektes treffende Licht kann von dieser entweder zurückgeworfen, durchgelassen oder verschluckt werden. In der Physik spricht man dann von der Reflexion, der Remission oder der Absorption. Dabei ist die Reflexionsart von der Wellenlänge des Lichts abhängig, weshalb auch über das sichtbare Wellenspektrum von 400 - 750 nm hinaus vermessen werden muss [122].

2.3.1 Reflexion

Der Glanz von Oberflächen hängt von deren Beschaffenheit ab, da diese wiederum die Reflexionseigenschaft bestimmt [12]. Die den Glanz erzeugende Art von Reflexion erscheint umso intensiver, je mehr der Blickwinkel dem Einfallswinkel des Lichtes nahe kommt und je glatter die zu beurteilende Oberfläche ist. Bei polierten Oberflächen spricht man beispielsweise von einer gerichteten Reflexion, auch wenn dies nur anteilig der Fall ist: Ein Teil des zurückgeworfenen Lichts wird immer diffus reflektiert oder gebrochen. So ergibt sich die unten abgebildete Glanzzwiebel, wenn der Hauptanteil des reflektierten Lichtes in Reflexionsrichtung gebrochen und ein kleinerer Anteil diffus gestreut wird.

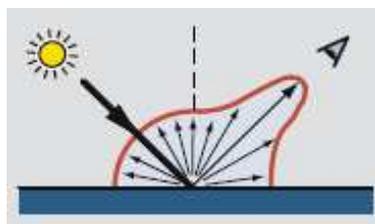


Abbildung 2: Glanzzwiebel

Bei der „gerichteten Reflexion“ entspricht der Einfallswinkel dem Ausfallswinkel des gebrochenen Lichtes, wodurch Glanz und Spiegelung entstehen [4]. Man spricht

daher auch von der spiegelnden Reflexion, die entgegengesetzt zu der diffusen Reflexion wirkt [104]. Die „diffuse Reflexion“ entsteht – anders als bei der gerichteten Reflexion – an rauen Oberflächen [4].

Allerdings haben neben der Oberflächenbeschaffenheit auch materialbedingte Eigenschaften großen Einfluss auf den Glanz. So reflektieren metallische Oberflächen das Licht immer stärker als Materialien, die den Strom nicht leiten, da das Vorhandensein von Elektronenwolken die Glanzeigenschaften maßgeblich beeinflusst. Bei den in der Zahnmedizin verwendeten Kompositmaterialien ist folglich nicht nur das Maß der Politur ausschlaggebend für den zu erzielenden Glanz. Die nach Bearbeitung maximal erreichbare Glättung der Oberfläche hängt daneben auch mit der Füllkörpergröße und ihrer Dichte zusammen [16]. Zusätzlich beeinflussen weitere Faktoren, wie z. B. die Art der verwendeten Kompositmatrix, die Reflexionseigenschaften der in ihr eingebetten, unterschiedlichen Füllkörper und der Füllergehalt das Glanzergebnis.

2.3.2 Remission

Das Gegenteil einer gerichteten Reflexion ist die Remission an einer „ideal“ matten Oberfläche. Diese remittiert das Licht gleichmäßig in alle Richtungen, was bei den sog. Lambert-Reflektierern der Fall ist. Die auf der Beleuchtungsseite auftretende diffuse Remission setzt sich aus drei Anteilen zusammen [57]; diese sind:

- die eigentliche Reflexion an der Oberfläche,
- die Streuung an oberflächennahen Teilchen und
- die Streuung aus dem Volumeninnern.

Bei gleich bleibenden Materialeigenschaften unterscheidet man also die Reflexion bei glatten Oberflächen mit hohem Glanz, die gestreute (gemischte) Reflexion an Oberflächen mit geringer Rauigkeit und mittlerem Glanz sowie die diffuse (in großen Anteilen gestreute) Reflexion / Remission an rauen, matten Oberflächen [33].

2.3.3 Absorption

Nicht nur die Art der Reflexion, ob gerichtet oder diffus, ist ausschlaggebend für den erzielten Glanz, sondern auch die Menge des zurückgeworfenen Lichtes. Absorption bezeichnet den Teil des Lichts, welcher im Inneren des Mediums ausgelöscht wird. Die Auslöschung beruht beim sichtbaren Licht zum größten Teil auf Umwandlung in Wärme oder evtl. in eine andere Energieform, z. B. chemische Energie. Diese Art der Intensitätsverringerung bezeichnet man als Absorption [74]. Das Lambertsche Absorptionsgesetz wie auch das Lambert-Beersche Gesetz befassen sich mit dem Anteil des zerstreuten und ausgelöschten Lichts. Wird ein Großteil des Lichts absorbiert, so hat dies direkte Auswirkungen auf die Wahrnehmung des Glanzes, unabhängig davon, ob in Hauptreflexionsrichtung gespiegelt wird oder nicht. Außerdem ist die Intensität des reflektierten Lichts von dem Winkel abhängig, in welchem das Licht auf eine Oberfläche trifft. Der sog. Einstrahlwinkel bestimmt die Eindringtiefe und damit, je nach Farbe, die Absorption und die Größe des gebrochenen oder diffus gestreuten Anteils und somit auch die Intensität der sich ergebenden Reflexion [16].

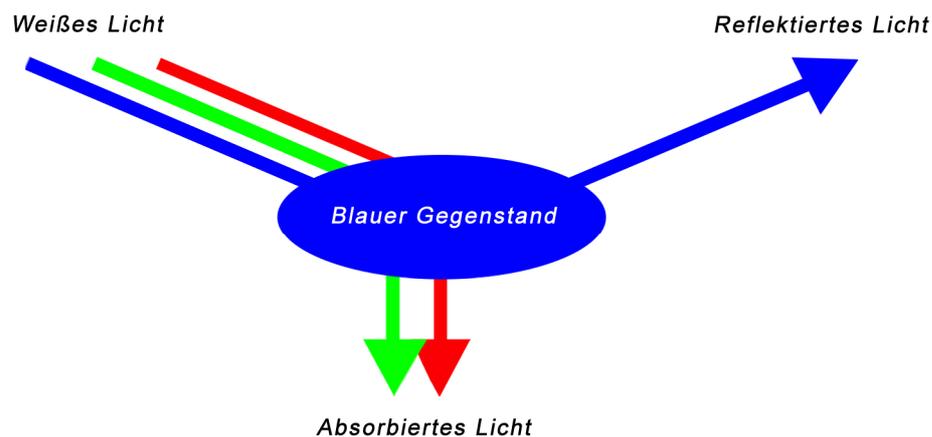


Abbildung 3: Absorption

2.3.4 Farbe

Farbeffekte entstehen teilweise durch Absorption und teilweise durch Reflexion bzw. Remission der einfallenden Lichtwellen an einer Oberfläche. Je nach Streuung und Reflexion des Lichts werden so unterschiedliche Farbeindrücke erzeugt [128].

Nasse Farboberflächen weisen einen höheren Glanz auf, da die optimal glatte Oberfläche der Flüssigkeit das Licht entscheidend besser reflektiert als die trockene Oberfläche [56]; somit ergeben sich bei derselben Farbe unterschiedliche Messergebnisse.

Sowohl Unterschiede im Glanz als auch in der Oberflächenstruktur können zu Farbdifferenzen führen [84]. So erscheinen spiegelnde bzw. hochglänzende Oberflächen farblich intensiver als matte; strukturierte oder aufgeraute Oberflächen wirken hingegen heller als glatte und polierte [56]. Da das Licht bei rauer Oberfläche zwar reflektiert wird, allerdings der diffuse Anteil dem glänzenden Objekt gegenüber erhöht ist, erscheint die Oberfläche heller.

Die Farbe ist wie auch der Glanz nicht nur eine physiologisch, sondern auch eine psychologisch beeinflusste Größe und somit von subjektiven Bewertungsmaßstäben des Betrachters abhängig.

2.3.5 Materialbedingte Eigenschaften

In der Chemie wird der Glanz als ein Parameter für die einfache Methode zur Stofferkennung herangezogen, was zeigt, dass Glanz nicht nur von der Oberfläche abhängt, sondern auch eine materialspezifische Eigenschaft darstellt. Für die Unterscheidung verschiedener Materialien ist der Glanz von der Beweglichkeit freier Elektronen abhängig. In diesem Punkt sind sich die untersuchten Komposite verhältnismäßig ähnlich. Trotzdem sind die Wahl des Matrixmaterials wie auch die Eigenschaften der verwendeten Füllkörper entscheidend für den schlussendlich entstehenden Glanz. Außerdem sind in einem inhomogenen Material wie dem

dentalen Komposit die verwendeten Partikel wichtig. Die Verteilung des einfallenden Lichtes durch ein Partikel ist nach Kunzelmann von folgenden Faktoren abhängig:

- Größe des Partikels,
- Form des Partikels,
- Wellenlänge des einfallenden Lichtes.

Das Verhältnis zwischen der Größe des Partikels und der Wellenlänge des einfallenden Lichts λ ist dabei der wesentliche Faktor, der die Art der Lichtstreuung beeinflusst. Wenn der Durchmesser der streuenden Partikel $0,1 \lambda$ nicht übersteigt, wird das einfallende Licht nach der von Lord Rayleigh (Rayleigh-Streuung) entdeckten Gesetzmäßigkeit gestreut. In dieser Gleichung wird die Streuung elektromagnetischer Wellen an sehr kleinen, kugelförmigen Teilchen beschrieben [34].

$$\frac{I_0 - I}{I_0} = a_{R\lambda} = \frac{8\pi^3(n_\lambda^2 - 1)^2}{3\lambda^4 N}$$

Berechnung der Rayleigh-Streuung

Dabei wird die Intensität des einfallenden Lichtes als I_0 bezeichnet, die Intensität des Restlichts nach der Streuung als I und der Streukoeffizient als $a_{R\lambda}$, der lichtwellenlängenabhängige Brechungsindex des optischen Mediums als n_λ . N bezeichnet die Anzahl der Teilchen pro cm^3 .

Da die Wellenlänge des eingestreuerten Lichts mit λ^4 in die Formel eingeht, wird das blaue Licht mit einer Wellenlänge von 400 nm im Vergleich zum roten Licht mit 700 nm rund 10 mal so stark gestreut. Der Streukoeffizient ist nach O'Brien (1986) linear zur Füllerkonzentration [79]. Das bedeutet, dass das einfallende Licht umso stärker gestreut wird, je höher ein Komposit gefüllt ist. Durch diese für das jeweilige

Komposit charakteristischen Eigenschaften entstehen unterschiedliche Reflexionspektren, wodurch Farbe, Transluzenz und Glanz beeinflusst werden.

2.3.6 Oberflächenstruktur/Textur

Technische Werkstoffoberflächen weisen immer ein gewisses Maß an Rauigkeit auf. Daher wird bei der Glanzmessung an rauen, strukturierten Oberflächen vorwiegend die diffuse und weniger die gerichtete Reflexion des einfallenden Lichts erfasst. Eine gerichtete Reflexion erfolgt eher an glatten Oberflächen und lässt diese dann visuell glänzend erscheinen [57]. Die Füllkörpergröße und ihre Verankerung innerhalb der Kompositmatrix begrenzt die minimale Rauigkeit der Oberfläche, da das Freilegen oder das Herausbrechen bei der Bearbeitung nicht verhindert werden kann.

2.3.7 Glanzschleier

Oberflächen, die subjektiv einen sehr unterschiedlichen Glanz aufweisen, bei einer Glanzmessung unter einem Winkel jedoch ähnliche Werte erzielen, verfügen über einen Glanzschleier. Derartige Proben werden gemäß ASTM D 40319 (Definition der American Society for Testing and Materials) unter 60° und 20° gemessen. Zur Glanzschleierbestimmung wird der Unterschied der beiden Messungen miteinander verglichen. Ein Glanzschleier äußert sich in Streulicht geringer Intensität nahe der Hauptreflexion. Das Spiegelbild ist hier nicht verzerrt, wie etwa beim Orangenhauteffekt, sondern von einem diffusen Lichthof umgeben. Bei der Spiegelung erscheinen die Kanten dunkler Bereiche dadurch leicht erhellt. Weiterhin können sich die gespiegelt dargestellten Kantenbegrenzungen scharf oder verschwommen darstellen. Der Glanzschleier wird nahe der Hauptrichtung der Reflexion in einem Winkelabstand von $\pm 0,9^\circ$ gemessen.

2.4 Subjektive Glanzwahrnehmung

Der Glanz eines Objekts ist nicht nur physikalisch objektiv, sondern auch subjektiv zu bewerten [12], da es sich um eine visuelle Wahrnehmung handelt, die bei der Betrachtung von Oberflächen entsteht [84]. Das gesunde menschliche Auge kann sehr wohl Unterschiede im Glanz oder der Farbe erkennen. Dennoch ist die visuelle Oberflächenprüfung unzureichend, da meist keine definierten Abmusterungsbedingungen vorliegen und verschiedene Prüfer unterschiedlich sehen und bewerten. Voraussetzung für die Beurteilung ist eine gerichtete Beleuchtung. Bei diffuser Beleuchtung ist auch die Reflexion diffus und der Glanzeindruck vermindert. Wird die entstehende Reflexion zudem aus verschiedenen Betrachtungswinkeln beurteilt, so können sich unterschiedliche Intensitäten für den Glanz ergeben. Daneben spielt bei der visuellen Wahrnehmung das Sehvermögen des Beobachters eine Rolle [84].

Die subjektive Empfindung bzw. der Sinneseindruck des Betrachters steht demzufolge der messtechnischen Glanzermessung gegenüber und muss nicht zwangsläufig mit ihr übereinstimmen.

2.5 Zusammenfassung der physikalischen Grundlagen

Die Bewertung des Glanzes ist von objektiven und subjektiven Faktoren abhängig:

- Oberflächenstruktur, Streueigenschaften, Materialeigenschaften
- Krümmung und Planlage des Prüfkörpers
- Farbe und Transparenz des Prüfkörpers
- Farb-, Helligkeits- und Reflexionseigenschaften der Umgebung der zu prüfenden Oberfläche
- Intensität, spektrale und räumliche Verteilung des einfallenden Lichtstrahls
- Betrachtungswinkel und Entfernung, Sehvermögen und Stimmung des Betrachters

Eine all diese Faktoren berücksichtigende Prüfmethode gibt es jedoch nicht. Zur Beurteilung der objektiv messbaren Kriterien des Glanzes wird von der BAM (Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung) die Messung des Reflektometerwertes empfohlen.

2.6 Glanzmessung/Reflektometer

Die quantitative Bestimmung der Oberflächenreflexion wird mit einem Glanzmessgerät, welches die Reflexion bei unterschiedlichen Winkeln bzw. Messgeometrien erfasst [57], dem sog. Reflektometer, vorgenommen. Die Wahl der entsprechend einzustellenden Messgeometrie zur Erfassung des Glanzgrades erfolgt dabei zum einen in Abhängigkeit des Anwendungsbereichs (z. B. Kunststoff-, Keramik-, Metall-, Glasoberflächen), zum anderen abhängig von der Glanzeigenschaft des jeweiligen Materials (z. B. Hoch-, Mittel- oder Mattglanz).

2.6.1 Messprinzip

Das Prinzip des Reflektometers beruht auf der Messung der gerichteten Reflexion. Dazu wird die Intensität des reflektierten Lichts in einem schmalen Bereich des Reflexionswinkels gemessen. Die Intensität des reflektierten Lichts hängt vom Material und dem Einstrahlwinkel ab. Bei Nichtmetallen (z. B. Lack, Kunststoff) wird mit zunehmendem Einstrahlwinkel mehr Licht reflektiert. Der Rest des eingestrahnten Lichtes dringt ins Material ein und wird dort, je nach Farbton, zum Teil absorbiert oder diffus gestreut. Bei Metallen ist die Reflexion deutlich höher und nicht so stark winkelabhängig wie bei Nichtmetallen.

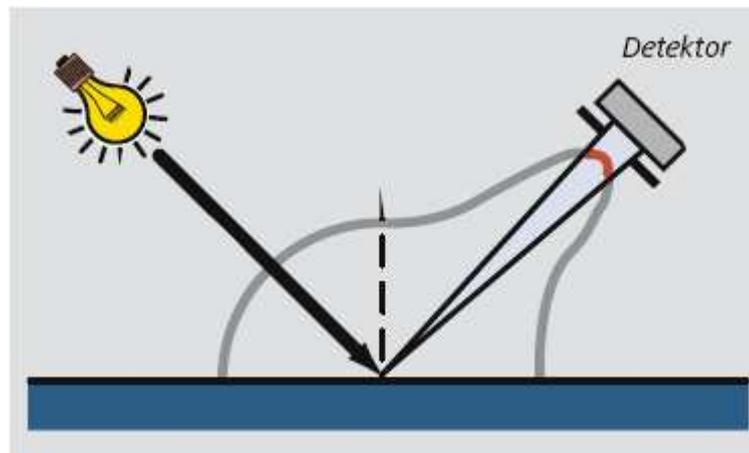


Abbildung 4: Messung der gerichteten Reflexion

Die Messergebnisse des Reflektometers werden nicht auf die eingestrahlte Lichtmenge bezogen, sondern auf einen schwarzen, polierten Glasstandard mit definiertem Brechungsindex von 1,567. Die gerichtete Reflexion trifft dabei auf einen Sensor, der sich in Hauptreflexionsrichtung befindet. Für diesen Standard wird der Messwert = 100 Glanzeinheiten gesetzt (Kalibrierung). Bei Materialien mit höherem Brechungsindex kann der Messwert durchaus größer als 100 Glanzeinheiten (GE) sein, z. B. bei Folien. Bei transparenten Materialien kann der Messwert durch Mehrfachreflexion im Material zusätzlich erhöht sein. Aufgrund der hohen Reflexion können bei Metallen sogar bis zu 2000 Glanzeinheiten gemessen werden. Hier ist es auch üblich, die Messung auf die eingestrahlte Lichtmenge zu beziehen und in % anzugeben.

Die visuelle Wahrnehmung und die vom Gerät ermittelten Werte stimmen allerdings nur in bestimmten Messbereichen überein. Aus diesem Grund misst man je nach Glanz mit unterschiedlichem Messwinkel (Abb. 5):

- Hochglanz bei 20°
- Mittelglanz bei 60°
- Mattglanz bei 85°

Um Glanzunterschiede besser differenzieren zu können, wird die Anwendung von Messgeräten empfohlen, die den Glanz in allen 3 Geometrien erfassen können.

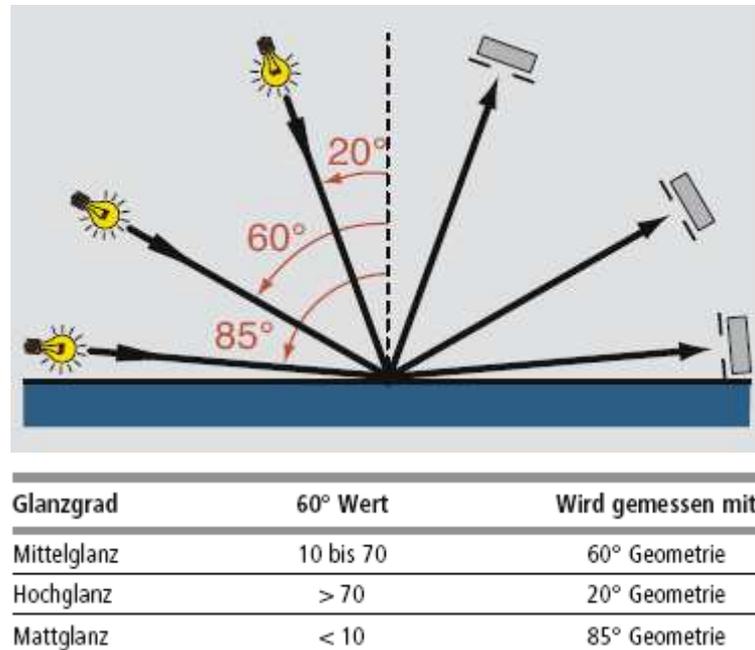


Abbildung 5: Messgeometrien

Für die Glanzmessung an Kompositoberflächen ist die 60°-Messgeometrie am geeignetsten, da die Kunststoffmatrix ein wesentlicher Bestandteil ist. Zusätzlich wird ein eventuell vorhandener Glanzschleier durch das Messen aus unterschiedlichen Winkeln berücksichtigt.

Der Glanz einer Oberfläche kann wie bereits beschrieben über deren Reflexionsverhalten spezifiziert werden, wobei die messtechnische Erfassung auf dem unterschiedlichen Streuverhalten des Lichts in Abhängigkeit von der Oberflächenstruktur und den materialbedingten Eigenschaften beruht [56]. Der Reflektometerwert stellt dabei die optische Kenngröße für den Glanz einer Oberfläche dar.

2.6.2 Normierung

In der Praxis arbeitet man derzeit weltweit mit einheitlichen Normen [84]. Nach Angaben der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) dient das Reflektometer als Hilfsmittel zur Glanzbeurteilung. Um vergleichbare Messergebnisse zu erhalten, wurden die Reflektometer und ihre Handhabung international genormt. Besonders stark beeinflusst der verwendete Einstrahlwinkel den Reflektometerwert. Um hochglänzende bis matte Oberflächen gut differenzieren zu können, wurden 5 Geometrien bzw. Messbereiche genormt, wobei die 45° Geometrie und die 75°-Geometrie nur bei speziellen Fragestellungen zur Anwendung kommen:

	20°	60°	85°	45°	75°
Anwendung	Lacke, Kunststoffe, sonstige			Keramik, Folien	Papier, Vinyl
	Hochglanz	Mittelglanz	Mattglanz	Mittelglanz	Mattglanz
DIN EN ISO 2813	■	■	■		
ASTM D 523	■	■	■		
ASTM D 2457	■	■	■	■	
DIN 67530	■	■	■		
JIS Z 8741	■	■	■	■	■
ASTM C 346				■	
Tappi T 480					■
	poliertes Metall				
EN ISO 7668	■	■	■	■	

Tabelle 1: Normierung

Nach heutigem Entwicklungsstand wird dieses Messverfahren nach DIN EN ISO 2813, ASTM D 523, ASTM D 2457, DIN 67530 und JIS Z 8741 weltweit einheitlich angewendet.

2.6.3 Glanzgrad/DIN 67530

Der subjektive Sinneseindruck, der allgemein durch die Reflexion von Licht an der Oberfläche entsteht, ist nach DIN 67530 der Glanzgrad. Er wird durch Faktoren wie z. B. Beschaffenheit der Oberfläche, Art der Beleuchtung und Betrachtungswinkel beeinflusst [42]. Die Norm DIN 67530 entspricht im Wesentlichen der von der ISO herausgegebenen Norm ISO 2813. Sie basiert auf z. T. größeren Toleranzen bei Einstrahlungs- und Bild-Aperaturwinkel als die ISO 2813.

Bei der Glanzmessung nach dem Reflektometerverfahren geht man von einer Glanzdefinition aus, die den Glanzgrad g als Verhältnis der Intensität des direkt von der Probe reflektierten Lichtes zur Intensität eines optischen Spiegels beschreibt [33; 80]. Die gemessenen Werte werden dabei wie bereits in Kapitel 2.6.1 beschrieben mit einem definierten Hochglanzstandard verglichen.

2.7 Komposite

Insbesondere im Hinblick auf die Ästhetik sind zahnfarbene Füllungsmaterialien gerade im Frontzahnbereich indiziert. Mit Hilfe der Arbeit von Bowen [11] gelang in den sechziger Jahren die Herstellung eines klinisch brauchbaren Füllungskunststoffs. Durch die Synthese eines hochmolekularen Monomers, dem Bisphenol-A-Glycidyl-Methakrylat (kurz: Bis-GMA), und einen über eine Verbundphase beigefügten Silikatpartikelanteil entstand ein neuartiger Werkstoff. Im Vergleich zu reinen Akrylaten wurden die Abrasionsfestigkeit erhöht und die Polymerisations-schrumpfung wie auch der Restmonomergehalt reduziert. Außerdem wurde der Temperaturanstieg – verursacht durch die exotherme Härtingsreaktion – minimiert, um eventuelle Pulpaschädigungen zu vermeiden. Basierend auf ihrer Zusammensetzung wurden die ersten gefüllten Kunststoffe, die so genannten „Komposite“ auf dem Markt eingeführt. Prinzipiell hat sich an der Zusammensetzung

dieser zahnärztlichen Werkstoffe, bestehend aus einer Kunststoffmatrix, einer Verbundphase und einem Füllkörpersystem nichts geändert.

2.7.1 Klassifikation

Komposite können nach der Art der verwendeten Füllkörper, der Kunststoffmatrix, der Indikation oder ihrem Verhalten eingeteilt werden. Da Größe, Form, Menge und Art der Füllstoffe wesentlichen Einfluss auf die Eigenschaften eines Kompositmaterials ausüben, orientieren sich die meisten Klassifikationssysteme an diesen Punkten. Die Klassifikation nach Lutz und Phillips [67] ist die bekannteste und auch eine Grundlage vieler weiterer Systeme. Sie unterteilt die Kompositmaterialien nach der Art des enthaltenen Füllstofftyps, der sog. charakterisierenden Komponente in Makrofüllerkomposite, homogene und inhomogene Mikrofüllerkomposite und Hybridkomposite [67].

2.7.1.1 Makrofüllerkomposite

Die ersten klinisch eingesetzten Komposite waren Makrofüllerkomposite, welche heute jedoch nur noch historische Bedeutung haben und nicht mehr verwendet werden [66]. Da die Füllkörper zu dieser Zeit noch gemahlen wurden, wurde die Füllkörpergröße durch die Produktionsabläufe bestimmt. Im Mittel handelte es sich um Größen zwischen 5 und 10 μm [23; 43]. Die guten physikalischen Eigenschaften wie zum Beispiel die hohe Biegefestigkeit wurden durch die verwendeten Füllstoffe aus Glas, Keramik und Quarz erreicht. Bedingt durch ihre Größe war ein Verlust dieser oftmals scharfkantigen Körper durch die Mastikation gleichbedeutend mit einem Bisshöhenverlust. Außerdem entstanden Verfärbungen und vermehrte Plaqueakkumulation durch die entstandene Oberflächenrauigkeit [36; 67].

2.7.1.2 Inhomogene Mikrofüllerkomposite

Um die Politureigenschaften zu verbessern und um eine größere Abrasionsstabilität zu erreichen, stützte sich die Entwicklung auf die notwendige Verkleinerung der Füllkörper. Die von Lutz und Phillips [67] in ihrer Klassifikation beschriebenen homogenen Mikrofüllerkomposite stellen lediglich eine theoretische Klasse dar und wurden in der Praxis nie angewendet. Die in flammenpyrolytischer Herstellung aus flüssigen organischen Siliziumverbindungen gefertigten hochdispersen Siliziumdioxidpartikel zeichnen Mikrofüller aus. Ihre deutlich reduzierte Größe von 0,01 µm bis 0,04 µm [19; 44; 45; 67; 89] ermöglichte eine verbesserte Polierbarkeit [132]. Die Schwächen liegen in den physikalischen Werten. Der Möglichkeit der Hochglanzpolitur stehen im Vergleich zu den Makrofüllerkompositen verringerte mechanische Eigenschaften, eine erhöhte Wasseraufnahme, eine größere Polymerisationsschrumpfung und eine Erhöhung des thermischen Expansionskoeffizienten gegenüber [23; 67; 97]. Nur die Druckfestigkeit ist höher einzustufen [44]. Eine Verbesserung der mechanischen Eigenschaften wurde durch den Zusatz von Vorpolymerisaten erzielt. Der akzeptable Füllstoffgehalt von 75 % wurde erreicht und führte zu einer Erhöhung der Abrasionsstabilität sowie der Reduktion der Polymerisationsschrumpfung. Der Preis dafür war die schlechtere Verarbeitbarkeit, da die Viskosität maßgeblich stieg. Die „inhomogenen Mikrofüllerkomposite“ enthalten also zusätzlich splitterförmige oder kugelförmige Vorpolymerisate als organische Füllkörper, welche auch in Kombination als Füllkörperagglomerate vorkommen können [62]. Diese Kompositklasse eignet sich entsprechend ihren Eigenschaften für Klasse-V-Kavitäten oder den Einsatz im Frontzahnbereich, wenn hohe Anforderungen an die Ästhetik gestellt werden [23].

2.7.1.3 Hybridkomposite

In dieser Gruppe werden die guten mechanischen Eigenschaften der Makrofüllerkomposite mit den Polier- und Abrasionseigenschaften der Mikrofüllerkomposite kombiniert. Als Füllstoffe werden hochdisperse Siliziumdioxidpartikel (Mikrofüller) gemeinsam mit Makrofüllstoffen verwendet. Trotz eines gegenüber den Makrofüllern deutlich verbesserten Politurverhaltens ist eine Hochglanzpolitur wie bei den Mikrofüllerkompositen nicht zu erreichen.

Die Klasse der Hybridkomposite wird zusätzlich nach der mittleren Größe der verwendeten Makrofüllkörper unterteilt. Während in einem „Hybridkomposit“ mittlere Füllkörpergrößen von bis zu 10 µm enthalten sind, weist ein „Feinpartikelhybridkomposit“ Füllkörper bis zu 5 µm Korngröße, ein „Feinstpartikelhybridkomposit“ bis zu 3 µm und ein „Submikrometerpartikelhybridkomposit“ eine mittlere Füllkörpergröße von unter 1 µm auf [22; 64]. Innerhalb der plastischen, zahnfarbenen Restaurationsmaterialien haben die Fein-, Feinst- und Submikrometerpartikel-Hybridkomposite deutlich den größten Anteil und werden heute häufig als universelle Komposite bezeichnet. Innerhalb dieser inhomogenen Gruppe lassen sich die Füllkörpersysteme weiter unterscheiden. Neben kompakten Füllkörpern werden auch poröse Füllkörper, ionenfreisetzende Füllkörper und Fasern verwendet. Die sechs Gruppen von Füllstoffsystemen werden nach Kunzelmann in nachfolgender Tabelle unterteilt [64]:

Füllkörpersystem	Beispiele
Quarz (SiO ₂)	Pertac II, (3M ESPE AG, Seefeld, D)
Kompakte Gläser + SiO ₂	TPH Spektrum, (Dentsply DeTrey GmbH, Konstanz, D) Charisma, (Heraeus Kulzer GmbH, Hanau, D)
Kompakte Gläser + SiO ₂ + sphärische, gesinterte Mischoxide	Tetric Ceram, (Ivoclar Vivadent AG, Schaan, FL)
Poröse Gläser + kompakte Gläser + SiO ₂	Solitaire, (Heraeus Kulzer GmbH, Hanau, D)
Fasern + kompakte Gläser + SiO ₂	Alert, (Jeneric Pentron GmbH, Kusterdingen, D)
Ionenfreisetzende Füllkörper + kompakte Gläser + SiO ₂	Ariston, (Ivoclar Vivadent AG, Schaan, FL)
Nanofiller-Primärpartikel + calcinierte Nanofiller-Agglomerate	Filtek Supreme (XT) (3M ESPE AG, Seefeld, D)
Nanofiller-Primärpartikel + kompakte Gläser	Grandio (VOCO GmbH, Cuxhaven, D)

Tabelle 2: Einteilung der Komposite anhand der Füllkörpersysteme nach Kunzelmann [64]

2.7.1.4 Nanofüllerkomposite

Die Entwicklung der Füllstoffe im Nanometerbereich stellt eine Ergänzung der Mikrofüllerkomposite dar. Vertreter dieser Materialgruppe sind beispielsweise Filtek™ Supreme (3M ESPE AG, Seefeld, D), Simile® (Jeneric Pentron GmbH, Kusterdingen, D) und Grandio® (VOCO GmbH, Cuxhaven, D). Allerdings muss zwischen nanohergestellten Kompositen und Kompositen mit Füllstoffen in Nanopartikelgröße unterschieden werden. In den in Nanotechnologie hergestellten Kompositen finden sich sog. Cluster, wie das Agglomerat von 5 - 20 nm großen Füllkörpern bezeichnet wird. Die aus Zirkonoxid- oder Siliziumdioxid bestehenden,

weintraubenartig zusammengefügt Komplexe erreichen eine Gesamtgröße von 0,6 µm bis 1,4 µm [24]. Zusätzlich werden feinstkörnige Siliziumdioxid-Füllkörper in die Kompositmatrix integriert, welche als „Nanomere“ bezeichnet werden. Die nicht agglomerierten Mikrofüllkörper in Größen um 20 nm [23; 24] befinden sich frei in der Matrix. Mit ihrer Hilfe wird der Füllstoffgehalt auf 71 - 75 % Massenanteil angehoben, wodurch er dem der Hybridkomposite entspricht [24; 70]. Im Vergleich zu einem konventionellen Mikrofüllerkomposit sorgt der deutlich erhöhte Füllstoffgehalt zu einer Verringerung der Polymerisationsschrumpfung und stellt folglich eine wesentliche Weiterentwicklung dar. Zusätzlich ist die Polierbarkeit verglichen mit Hybridkompositen maßgeblich verbessert.

2.7.2 Einteilung nach der Rheologie

Aufgrund verschiedener Anforderungen variieren Kompositmaterialien stark in ihrer Konsistenz. Allgemein nimmt die Viskosität mit dem Erhöhen des Füllstoffgehalts zu. Willems et al. schlagen eine Einteilung der Komposite vor, in welcher der Füllgrad berücksichtigt wird, obwohl zu diesem Zeitpunkt weder stopfbare noch fließfähige Komposite auf dem Markt erhältlich waren [130; 131]. Aus dieser Idee entstanden fünf Hauptgruppen mit entsprechenden Unterteilungen:

1. Dichtgepackte Komposite

a) durchschnittlich hochgefüllte Komposite (< 60 Vol.-%)

- ultrafeingefüllt (Partikelgröße < 3 µm)
- feingefüllt (Partikelgröße > 3 µm)

b) kompaktgefüllte Komposite (> 60 Vol.-%)

- ultrafeingefüllt (Partikelgröße < 3 µm)
- feingefüllt (Partikelgröße > 3 µm)

2. Mikrofeingefüllte Komposite
3. Gemischtgefüllte Komposite
4. Konventionelle Komposite
5. Faserverstärkte Komposite

Die neuen Materialgruppen werden in der Einteilung von Bayne et al. anhand der Viskositätsänderung bei zunehmendem Füllstoffgehalt klassifiziert [6]:

- Grübchen- und Fissurenversiegler, Mikrofüllerkomposite
- fließfähige Komposite (Flowables)
- Hybridkomposite
- stopfbare Komposite (Condensables)

Zusätzlich existieren diverse Klassifikationssysteme wie z. B. die Einteilung nach dem Matrixmaterial [64]. Allerdings erscheint die bereits angeführte Klassifikation nach dem Füllstoffgehalt als die gängigste und die für die vorliegende Arbeit sinnvollste.

2.8 Chemie der Komposite

2.8.1 Monomermatrix

Die Monomermatrix, in welche die Füllstoffe eingebettet sind, setzt sich aus verschiedenen Monomeren zusammen, welche bi-, tri- oder noch höher funktionell sein können. Bevorzugte Verwendung finden hochmolekulare, langkettige Dimethakrylate [89]. Die sogenannten Di- oder Triakrylate sind die entsprechenden Ester

der Methakrylsäure mit hochmolekularen Alkoholen [45; 89; 119]. Die wichtigsten und somit heutzutage am häufigsten verwendeten Monomere sind das von Bowen [10; 11] entwickelte Bis-GMA wie auch UEDMA, welches überwiegend in Abmischung mit Bis-GMA Verwendung findet [103]. Die Methakrylgruppe ermöglicht hierbei die Polymerisation, welche unter Volumenkontraktion – der sog. Polymerisationsschrumpfung – abläuft. Hier verflüchtigt sich nicht etwa ein Lösungsmittel wie z. B. bei der Polykondensation; die Kontraktion basiert auf dem geringeren Abstand zweier Kohlenstoffatome beim Entstehen einer Doppelbindung nach normaler kovalenter Einzelbindung [89; 118]. Durch das Verwenden der hochmolekularen Methakrylate nimmt die Volumenschrumpfung bei der Polymerisationsreaktion mit steigender Molekülkettenlänge ab, da sich die Relation des Molekulargewichts zur Anzahl der entstehenden Doppelbindungen erhöht [45]. Um die hohen Füllgrade mit anorganischen Füllstoffen bei verarbeitbarer Viskosität zu ermöglichen, müssen Verdünnermoleküle wie TEGDMA der Matrix beigefügt werden [45; 76]. Durch diese niedermolekularen Komonomere lässt sich der Füllstoffgehalt auf bis zu 85 % Massenanteil anheben [31]. Außerdem können die Polymereigenschaften durch Kopolymerisation mit Monomeren mit speziellen funktionellen Gruppen oder aliphatischen bzw. aromatischen Ringsystemen erheblich beeinflusst werden. So führt beispielsweise der Einbau der genannten Ringsysteme zu mechanisch sehr festen, starren Polymeren [44].

2.8.2 Anorganische Füllkörper und deren Verbund

Durch zugefügte anorganische Füllstoffe werden die mechanisch-physikalischen Eigenschaften optimiert und das Ausmaß der Polymerisationsschrumpfung erheblich verringert. Da der thermische Ausdehnungskoeffizient der Füllstoffe im Vergleich zur Matrix sehr gering ist, weisen hochgefüllte Komposite eine deutlich gesteigerte Dimensionsstabilität auf, ein Effekt, der in einem anderem Zusammenhang bereits 1953 von Paffenbarger beschrieben wurde [81]. Außerdem führt die Beimengung der

anorganischen Partikel zu verbesserter Festigkeit und vermindert die Wasseraufnahme [32; 63; 77; 83]. Verwendung finden pyrogenes Siliziumdioxid, mikrofeine Barium- oder Strontiumsilikatgläser, Zirkoniumdioxidgläser, feingemahlener Quarz und Yttrium- oder Ytterbiumtrifluorid [47; 48; 49]. Durch den Zusatz von Elementen mit hohen Atommassen erfüllt das Füllkörpersystem auch die klinische Anforderung an die Röntgenopazität. Überwiegend werden barium- oder strontiumhaltige Gläser wie auch Zirkoniumdioxid verwendet [61; 125]. Andere röntgenopake Zusatzstoffe stellen die Pigmente Ytterbium- und Yttriumtrifluorid dar [44]. Um die Eigenschaften der verwendeten Füllkörper auf das Komposit zu übertragen, muss ein stabiler Verbund zwischen Füllstoff und Matrixharz vorhanden sein. Diese Verbindung wird bei den Kompositen durch Silanisierung der anorganischen Füllkörperoberflächen erreicht. Silane setzen sich aus einem hydrophoben und einem hydrophilen Molekülanteil zusammen, welcher über eine hydrolysierbare Siliziumgruppe mit der Füllstoffoberfläche reagiert. Der hydrophobe Anteil des Haftsilans besteht chemisch aus einem organofunktionellen Rest, der den Verbund zur Matrix ermöglicht. Durch Anlagerung der Silanverbindung an die hydrophile Oberfläche der Füller wird deren Oberfläche hydrophob, und die Verbindung mit der ebenfalls hydrophoben Kunststoffmatrix kann erfolgen. Gängige Haftsilane sind Vinyltriethoxysilanol und Methakryloxypropyltrimethoxysilanol, welche am häufigsten Verwendung finden [43; 89]. Die Schichtdicke des aufgetragenen Silans liegt im Durchschnitt zwischen 5 und 20 nm [44].

2.8.3 Weitere Zusätze

Außerdem sind den modernen Kompositen Initiatoren zur Einleitung der Polymerisation [88], Inhibitoren, Pigmente und UV-Stabilisatoren zugesetzt. Inhibitoren, auch Stabilisatoren oder Antioxidantien genannt, unterbinden eine nicht gesteuerte, vorzeitige Polymerisation durch Inaktivierung reaktiver Moleküle. Sie werden in geringen Mengen von 300 - 1000 ppm hinzugefügt [46], da sonst auch die

erwünschte Aushärtung gehemmt wird. Häufig verwendete Stabilisatoren sind beispielsweise Hydrochinon, Hydrochinonmonomethylether sowie verschiedene Phenole, welche sich als wirkungsvoll und farbstabil erwiesen haben [121]. Eine Farbnuancierung wird durch den Zusatz von Pigmenten und optischen Aufhellern realisiert. Pigmente sind feste Teilchen organischen oder anorganischen Ursprungs mit einer Größe zwischen 0,01 und 1 μm [49]. Diese werden bei der Herstellung möglichst gleichmäßig in der Kunststoffmatrix verteilt. Sie müssen unlöslich, dauerhaft farbstabil und toxikologisch völlig unbedenklich sein. Größtenteils werden anorganische Farbstoffe wie Aluminiumoxid, Eisenoxid oder Titandioxid zugegeben. Um die Farbstabilität zu gewährleisten, werden UV-Stabilisatoren eingesetzt. Sie absorbieren hochenergetisches UV-Licht unterhalb einer Wellenlänge von 380 nm [46] und transformieren die Lichtenergie in Wärme. Der UV-Licht-bedingte Zerfallsprozess, der gelbe Verfärbungen hervorrufen würde, wird so verhindert [125].

2.8.4 Aushärtungsreaktion und Polymerisationsschrumpfung

Dentale Kompositmaterialien härten durch die Umsetzung der Monomere zu Polymerkomplexen in einer radikalischen Polymerisation aus [45; 49]. Alle modernen Füllungskomposite sind lichthärtend. Die ebenfalls enthaltenen Initiatoren reagieren auf Lichteinfall im Bereich von 380 - 500 nm. Kampherchinon, welches der am häufigsten verwendete Photoinitiator ist, weist ein Absorptionsmaximum bei einer Wellenlänge zwischen 460 nm und 470 nm auf [40; 49; 62]. Die im Durchschnitt mindestens benötigte Lichtintensität wird von 300 bis 400 mW/cm^2 angegeben [92]. Bei Verwendung herkömmlicher Halogenlampen sollte die Intensität allerdings bei 500 mW/cm^2 liegen, damit in einer Schichtstärke von 2 mm noch eine akzeptable Härte zu erreichen ist [85]. Nach früherer Vorstellung zeigt der Luftsauerstoff eine polymerisationshemmende Wirkung. Die dünne, klebrige, nicht erhärtende Materialsicht an der Oberfläche wird allerdings nicht mehr als Sauerstoffinhibitionsschicht, sondern treffender als Grenzflächeneffekt bezeichnet [87]. Diese

60 µm starke Schicht ermöglicht durch freie Bindungen den Verbund zwischen den Lagen bei der Inkrementtechnik. An der definitiven Füllungsoberfläche ist die Grenzflächenschicht durch erhöhten Restmonomergehalt nicht erwünscht, so dass eine abschließende Oberflächenbearbeitung erfolgen muss. Die bei Aushärtung zustande kommende Polymerisationsschrumpfung der Komposite wird in der Literatur mit einer Volumenverringerung zwischen 1,7 % und 6 % angegeben [37; 107]. Grundsätzlich ist diese Volumenänderung zwar immer gleich, kann jedoch durch Applikation mehrerer nacheinander ausgehärteter Inkremente maßgeblich verringert werden. Die letztlich zustande kommende absolute Polymerisations-schrumpfung hängt folglich von der pro Schicht polymerisierten Masse an Komposit ab [90]. Die zum Aushärten eingebrachte Schichtstärke sollte daher 2 mm nicht überschreiten [53; 55]. Bei der Polymerisationsreaktion kann das Material initial die Volumenschrumpfung durch Fließvorgänge ausgleichen. Ab dem so genannten „Gel-Punkt“ kommt es zu einer starken Zunahme der Polymerisationsgeschwindigkeit. Durch die damit einhergehende Viskositätssteigerung wird ein Nachfließen von Kunststoffmaterial zum Spannungsausgleich verhindert [73]. Im Post-Gel-Zustand entstehende Spannungen können zum Ablösen von den Kavitätenwänden und zur Spaltbildung führen oder das Material durch entstehende Volumendefekte schwächen [71]. Ein Randspalt kann das Eindringen von Flüssigkeiten und Bakterien ermöglichen [100] und so Hypersensibilitäten, Pulpairritationen und Sekundärkaries begünstigen [86]. Selbst eindringende Moleküle können solche Irritationen durch osmotische Effekte hervorrufen. Die während der Aushärtung auftretenden Schrumpfungsvorgänge stellen nach wie vor ein großes Problem der Kompositmaterialien dar [21; 95; 101]. Trotz intensiver Bemühungen konnte bei der Entwicklung schrumpfungsarmer Monomersysteme noch kein überzeugender Erfolg erzielt werden [8; 21; 105; 106]. Aus diesem Grund kompensiert man die Polymerisationsschrumpfung anteilig durch die Verwendung von Adhäsivsystemen [91], die Säure-Ätz-Technik [8; 15; 117], die Schichttechnik, stressauffangende Zwischenschichten [109; 114; 115; 117], über die Reduktion des Verhältnisses gebundener zu ungebundener Oberfläche, über den C-Faktor [26] oder Modulation

der Polymerisationskinetik unter Anwendung der Soft-Start-Polymerisation [27; 59; 72; 73; 124]. Die Soft-Start-Polymerisation ist allerdings als wissenschaftlich umstrittenes Verfahren anzusehen.

2.9 Werkstoffkundliche Parameter von Kompositmaterialien

Dentale Komposite müssen bestimmte materialwissenschaftliche Bedingungen erfüllen, um den physikalischen und chemischen Beanspruchungen in der Mundhöhle widerstehen zu können. Aussagekräftige Testergebnisse sind mit standardisierten Prüfverfahren und genau festgelegten Probekörperherstellungen und Probekörperdimensionen, Lagerungsbedingungen und Versuchsaufbauten zu erzielen [61; 119]. Zur Qualitätssicherung dienen nationale und internationale Normen. Die zur Zulassung notwendigen Mindestanforderungen sind in der EN ISO 4049 [18] beschrieben. Ein Universalhybridkomposit ist in der EN ISO 4049 als Typ I, Klasse 2, Gruppe 1 klassifiziert [18], also ein restaurativer, lichthärtender Kunststoff, den der Hersteller zur Wiederherstellung von Okklusalfächen als geeignet ansieht. Zu den wichtigen zu untersuchenden werkstoffkundlichen Kenndaten zählen Charakteristika wie Wasseraufnahme und Löslichkeit, Biegefestigkeit, Röntgenopazität sowie die Polymerisationstiefe. Außerdem wird zur weiteren Materialcharakterisierung von Füllungsmaterialien die Polierbarkeit als wichtiges Kriterium herangezogen. Allerdings erweist sich die Übertragung materialwissenschaftlicher Parameter auf die klinischen Eigenschaften der Werkstoffe als mitunter problematisch [88].

2.9.1 Biegefestigkeit und E-Modul

Festigkeitsuntersuchungen an Verbundwerkstoffen zeigen eine direkte Korrelation zum klinischen Verhalten der dentalen Füllungswerkstoffe [96; 120]. Bei der Messung der Biegefestigkeit treten Druck- wie auch Zugbelastungen auf, was klinisch relevante Rückschlüsse zulässt [102; 119; 120]. Ein lighthärtendes Füllungskomposit für Restaurationen im Front- und Seitenzahnbereich muss gemäß EN ISO 4049 [18] eine Mindestbiegefestigkeit von 80 MPa aufweisen. Der Elastizitätsmodul (E-Modul, Youngscher Modul) ist ein Materialkennwert, welcher den Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung bei der Verformung eines festen Körpers bei linear elastischem Verhalten beschreibt. Der Betrag des Zugmoduls ist umso größer, je mehr Widerstand ein Material seiner Verformung entgegensetzt. Bei Kraftereinwirkung auf ein dentales Komposit deformiert sich das Netzwerk des Polymers, wobei zuerst die sekundären Bindungen wie z. B. Wasserstoffbrückenbindungen beansprucht werden. Je höher aber der interne Vernetzungsgrad eines Polymers ist, desto größeren Einfluss haben die primären kovalenten Bindungen [1]. Allerdings wird der E-Modul in nicht unerheblichem Maße durch den Füllstoffgehalt beeinflusst. Mit steigendem Füllstoffgehalt nimmt der E-Modul und damit die Formstabilität zu [93]. Ein optimaler Elastizitätskoeffizient eines Füllungswerkstoffs ist im Grunde genommen nicht zu bestimmen, da dieser immer von der Indikation der Restauration abhängt. So sollte der E-Modul für eine Klasse-V-Füllung vergleichsweise niedriger sein [54] als für eine Klasse-II-Füllung, bei der der Koeffizient einen dem Dentin entsprechenden oder höheren Wert aufweisen sollte [75; 131]. Ein zu gering gewählter E-Modul bei einer Restauration im Seitenzahnbereich führt bei Kaubelastung zu einer Deformation und somit zu einer Beeinträchtigung der marginalen Integrität [65; 97].

2.9.2 Polymerisationstiefe und Härte

Füllungskompositmaterialien sind aufgrund ihres Füllstoffgehaltes und der Einfärbung mit Pigmenten weniger lichtdurchlässig als reine Methakrylate [61]. Die Polymerisationstiefe ist folglich von vielen Faktoren abhängig. Der verwendete Lampentyp, die Intensität des Lichts, die Bestrahlungszeit, die Kompositzusammensetzung, die Transluzenz und die Farbe sind entscheidende Parameter [35; 50; 99]. Abstand und Winkel der Lampe zum auszuhärtenden Komposit bestimmen ebenfalls die Polymerisations- und Aushärtungstiefe [108]. Die EN ISO 4049 verlangt für lichthärtende, nicht-opake Füllungsmaterialien eine Mindestpolymerisationstiefe von 1,5 mm [18]. Da die Polymerisationstiefe nichts über den Polymerisationsgrad aussagt, wird die Durchhärtungstiefe hinzugezogen. Wesentlichen Einfluss nehmen auch hier die Leistungsfähigkeit des Lichtpolymerisationsgerätes und die Bestrahlungsdauer [22; 32]. Je größer die Anfangsintensität des Lichtes ist, umso früher wird der Gel-Punkt erreicht. So sind bei Hochleistungslampen, wie Plasma- oder Xenonlampen, alle Härtewerte niedriger als die vergleichbaren Werte, die mit einer Halogenlampe erzielt wurden [17; 28; 98]. In einer Schichttiefe von 2 mm sind signifikant mehr Restmonomere als bei der Verwendung von Halogenlampen zu finden [28]. LED-Lampen bieten sich aufgrund der konstanten Lichtemission, der langen Lebensdauer, der geringeren Wärmeentwicklung und dem geringeren Gewicht [25; 50] als Alternative zu herkömmlichen Halogenlampen an. Zurzeit werden aber noch nicht von allen Bauarttypen die Aushärtungs- sowie Polymerisationstiefen von Plasmalampen erreicht [20; 50; 113]. Hybridkomposite weisen in jeder Schicht höhere Härtewerte auf als Mikrofüller [20]. Je höher der Vernetzungsgrad und der anorganische Füllstoffgehalt sind, umso größer wird die Härte [49]. Unabhängig vom Material nehmen die Härtewerte von der Oberfläche her ab [32; 85].

2.9.3 Ausarbeiten und Polierbarkeit

Um die weitere Ausarbeitung auf wenige Arbeitsschritte zu beschränken, sollte bereits bei der Rekonstruktion des Zahnes die spätere Form möglichst genau herausgearbeitet werden. Generell wird eine Kompositfüllung wegen der Polymerisationsschrumpfung und der Oberflächengrenzschicht mit Überschuss modelliert. Mit diamantierten Schleifkörpern, welche eine durchschnittliche Korngröße von bis zu 25 μm aufweisen, wird die Kompositoberfläche definitiv geformt [107]. Die Politur führt zu einer eingeebneten Oberfläche mit verringerten Rauhtiefen; dadurch lassen sich die Oralhygiene steigern, die Plaqueretention vermindern und der äußerliche Eindruck verbessern. Ein bewährtes Poliersystem für die Politur von Glattflächen sind die flexiblen mit Aluminiumoxidpartikeln beschichteten Sof-Lex-Scheiben (3M ESPE AG, Seefeld, D) [53; 107]. Das Sof-Lex-System kann als Alternative zu Gummipolierern und Polierpaste bis zur Hochglanzpolitur verwendet werden. Die Polierbarkeit der verschiedenen Komposite stellt eine für jeden Zahnarzt wichtige Materialeigenschaft für den Einsatz in der Praxis dar. Zur quantitativen Beschreibung der Rauheit dient der arithmetische Mittenrauwert [78]. Die Polierbarkeit von Kompositmaterialien ist im Wesentlichen von der Größe der Füllstoffe abhängig. Sobald die Füllkörpergröße von etwa 400 - 700 nm in der Größenordnung der Wellenlänge des Lichtes liegt, ist es möglich, das Material hochglänzend zu polieren, da Lichtbrechungen an der Oberfläche vom Auge nicht mehr wahrgenommen werden können. Eine sehr gute Polierbarkeit zeigen daher die Mikrofüllerkomposite. Diese Qualität kann von Hybridkompositen nicht erreicht werden, dennoch weisen sie eine gute und akzeptable Polierbarkeit auf. Die Vielzahl mikroskopisch kleiner Schleifspuren in einer Ebene stellt sich für das menschliche Auge als Hochglanz dar. Um diese Feinstrukturen beurteilen zu können, ist die Darstellung mit dem Rasterelektronenmikroskop üblich [38; 41; 53; 89; 126].

3 Eigene Untersuchungen

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung sollte der Glanz von 8 auf dem deutschen Markt erhältlichen Nano-Kompositen gemessen und miteinander verglichen werden. Hierzu wurden planparallele Proben aus einem reinen Nano-Komposit und sieben Nano-Hybrid-Kompositen hergestellt. Nach maschineller Bearbeitung durch SiC-Nassschleifpapier mit einer Körnung von 4000 Grit wurde die abschließende quantitative Bestimmung des Glanzes mit Hilfe eines Reflektometers vorgenommen. Der direkte Zusammenhang zwischen Polituren und dem messbaren Glanz von Kompositen wurde bisher nur vereinzelt überprüft [79]. Seitdem wurden aber sowohl die Füllungswerkstoffe als auch die Meßmethoden zur Glanzbestimmung weiterentwickelt.

3.1 Materialien (Zusammensetzung nach Angaben der Hersteller)

Folgende Komposite wurden untersucht:

Filtek™ Supreme XT Universal (3M ESPE)

Art des Komposits: Nano-Komposit

Zusammensetzung der Matrix: Methakrylatmatrix

Füllkörper: Siliziumoxid- und Zirkonoxid-Nanofüller

Füllergehalt in Gew.-% / in Vol.-%: 72,5 - 78,5 / 57,7 - 60

Mittlere / max. Füllkörpergröße: 20 oder 75 nm / 75 nm

Indikationsbereich: universal

PREMISE™ (KerrHawe SA)

Art des Komposits: Trimodales Nano-Hybrid-Komposit

Zusammensetzung der Matrix: Bis-GMA, UDMA, TEGDMA

Füllkörper: 3 verschiedene Füllkörper: vorpolymerisierte Füller (PPF), Bariumglas,
Siliziumdioxid-Nanopartikel

Füllergehalt in Gew.-% / in Vol.-%: 84 / 69

Mittlere / max. Füllkörpergröße: 0,02 µm / 0,4 µm / 30 nm

Indikationsbereich: Black-Klassen I - V, universal

Simile® (Jeneric Pentron)

Art des Komposits: Nano-Hybrid-Komposit

Zusammensetzung der Matrix: Methakrylate (PCBisGMA, BisGMA, UDMA, HDDMA)

Füllkörper: Nano-Hybrid-Füller (Bariumborosilikatglas [enthält Al₂O₃], Zirkonium,
Silikate, Polysilsesquioxane [POSS])

Füllergehalt in Gew.-% / in Vol.-%: 75 / 65

Mittlere / max. Füllkörpergröße: ---

Indikationsbereich: Black-Klassen I - V

Artiste® Enamel (Jeneric Pentron)

Art des Komposits: Nano-Hybrid-Komposit

Zusammensetzung der Matrix: Methakrylate (PCBisGMA, BisGMA, UDMA, HDDMA)

Füllkörper: Nano-Hybrid-Füller (Bariumborosilikatglas [enthält Al₂O₃], Zirkonium,
Silikate, Polysilsesquioxane [POSS])

Füllergehalt in Gew.-% / in Vol.-%: 65% / 55%

Mittlere / max. Füllkörpergröße: 0,6 - 0,7 µm

Indikationsbereich: Black-Klassen I - V, Reparaturen, direkte Veneers

Synergy D6[®] (Colténe Whaledent)

Art des Komposits: Nano-Hybrid-Komposit

Zusammensetzung der Matrix: BisGMA, BisEMA, UDMA, TEGDMA

Füllkörper: Bariumglas, SiO₂-Nanofüller

Füllergehalt in Gew.-% / in Vol.-%: 80 / 65

Mittlere / max. Füllkörpergröße: 0,6 µm / ca. 2,5 µm

Indikationsbereich: Black-Klassen I - V, indirekte Versorgungen

NEPA[®] Fil (Merz)

Art des Komposits: Nano-Hybrid-Komposit

Zusammensetzung der Matrix: Bis-GMA-Harze

Füllkörper: Nano-Fluorapatit und andere anorganische Füllstoffe

Füllergehalt in Gew.-%: 79%

Mittlere / max. Füllkörpergröße: ---

Indikationsbereich: direkte adhäsive Füllungstherapie im Front- und Seitenzahn-
bereich aller Kavitätenklassen

Grandio[®] (VOCO)

Art des Komposits: Nano-Hybrid-Komposit

Zusammensetzung der Matrix: Methakrylmatrix (Bis-GMA, TEGDMA)

Füllkörper: Fluorsilikatgläser, Siliziumdioxid, Nanofüller

Füllergehalt in Gew.-% / in Vol.-%: 87 / 71,4

Füllkörpergröße: Mikrofüller < 1 µm / Nanofüller < 40 nm

Indikationsbereich: Black-Klassen I - V, Stumpfaufbauten, Komposit-Inlays

ice[®] (SDI)

Art des Komposits: Nano-Hybrid-Komposit

Zusammensetzung der Matrix: multifunktionale Methakrylester

Füllkörper: anorganische Füllstoffe

Füllergehalt in Gew.-% / in Vol.-%: 77,5 / 61

Füllkörpergröße: 40 nm - 1,5 µm

Indikationsbereich: Black-Klassen I - V, Front- und Seitenzahnbereich, indirekte
Versorgungen

3.2 Probenherstellung

Aus einem reinen Nano-Komposit (Filtek™ Supreme XT Universal) und sieben Nano-Hybrid-Kompositen (PREMISE™, Simile[®], Artiste[®], Synergy D6[®], NEPA[®] Fil, Grandio[®] und ice[®]) sollten Proben mit möglichst glatten Oberflächen hergestellt werden. Die Komposite wurden zunächst auf spezielle Trägerplatten aufgetragen, nachdem diese zuvor mit einem kompatiblen Bonding Agent beschickt worden waren. Nach anschließendem Pressen und Aushärten gegen eine planparallele Glasoberfläche sollten diese auf ihren Glanz hin untersucht werden.

Zur Glanzmessung wurde das Reflektometer „micro-TRI-gloss“ der Firma „BYK-Gardner GmbH“ gewählt. Um sowohl die Messfenstergröße des Messgerätes als auch eine statistische Messwertstreuung zu berücksichtigen, war es erforderlich, Probenoberflächen mit einer Abmessung von mind. 30 mm x 30 mm herzustellen.

Als Trägerplatte für die Kompositschicht wurde 4 mm starkes, satiniertes Glas gewählt, da es aufgrund seiner Lichtdurchlässigkeit eine allseitig gleichmäßige Aushärtung zuließ. Anfänglich auf glatten Glasträgern hergestellte Kompositproben hatten sich nicht bewährt, da sich der Verbund zwischen Glas und Komposit relativ schnell wieder löste. Die Folge waren unregelmäßig aufgeworfene Probenoberflächen, die reproduzierbare Messungen nicht mehr zuließen. Vermutlich waren endogene Spannungen bedingt durch Polymerisationsschrumpfungen ursächlich für den raschen Haftverlust; jedenfalls konnten sie unter diesen Umständen nicht weiter bearbeitet werden.

Für einen besseren Verbund zur Kompositschicht erwies sich schließlich einseitig satiniertes Glas als vorteilhaft, da auftretende Polymerisationsschrumpfungen durch die aufgeraute Oberfläche besser kompensiert werden konnten. Außerdem sorgte die vergrößerte Oberfläche des sog. Mattglases für eine gesteigerte Retention und führte folglich zu verbesserten Haftwerten. Satiniertes Glas wird aus Flachglas hergestellt und zu einem undurchsichtigen, aber lichtdurchlässigen Glas verarbeitet. Dieses Ergebnis kann man durch unterschiedliche Techniken wie z. B. die Sandstrahlmattierung mit feinen Korundkörnern oder die Behandlung mit Fluss- und Schwefelsäure gewinnen [13]. Für unsere Zwecke wurde geätztes, einseitig oberflächenmattiertes Flachglas verwendet. Durch zusätzliches Beschicken der satinierten Glasoberfläche mit einem kompatiblen Bonding Agent konnte die Adhäsion weiter gesteigert werden. Alle verwendeten Materialien wurden streng nach Herstellerangaben verarbeitet.

Zur Dosierung der Kompositmenge erwies sich die Verwendung von 4-g-Drehspritzen als vorteilhaft. Anders als beim Zusammenfügen kleinerer Kompositanteile aus 0,25-g-Karpulen konnten so Verunreinigungen und Porositäten durch Lufteinschlüsse weitestgehend vermieden werden. Versuchsweise hergestellte Proben lieferten nur unzureichende und nicht reproduzierbare Messergebnisse.

Um möglichst homogene und glatte Probenoberflächen zu erzeugen, wurden die zuvor auf die Trägerplatten aufgetragenen Komposite in gleichmäßiger Schichtstärke gegen eine planparallele Glasplatte ausgepresst.



Abbildung 6: Parallelpresse

Hierfür wurde eine eigens angefertigte Parallelpresse, bestehend aus zwei über vertikale Schrauben verbundenen Stahlplatten, verwendet. Für eine immer gleich bleibende Kompositstärke dienten genau definierte Distanzringe als Abstandshalter. Um Differenzen in der Schichtdicke der Komposite und somit eine unregelmäßige Bearbeitung auszuschließen, wurden die Proben sowohl unmittelbar nach ihrer Herstellung als auch nach der Bearbeitung mit Hilfe einer digitalen Schieblehre kontrolliert. Die durchschnittliche Stärke der Probe betrug 5 mm. Nach Entfernung der Kompositüberschüsse und Glätten der Ränder wurden die Proben allseitig mit einer LED-Lampe auspolymerisiert, wobei die Aushärtungszeiten je nach Herstellerangaben beachtet wurden. Die so hergestellten, planparallelen Probenoberflächen waren schließlich als ideale Arbeitsgrundlage für die nachfolgende Oberflächenpolitur geeignet. Abschließend wurde der jeweilige Glanzgrad mit Hilfe des Reflektometers ermittelt.

3.3 Probenbearbeitung

Um eine standardisierte Poliermethode für die Kompositproben zu entwickeln, wurde zuvor in Vorversuchen evaluiert, inwieweit unterschiedliche Parameter wie z. B. Anpressdruck, Poliergeschwindigkeit, Polierdauer und Verschleißerscheinung des Polierkörpers Einfluss auf die Hochglanzpolitur nehmen und somit das Glanzergebnis beeinflussen können.

Zur standardisierten Bearbeitung der Kompositproben wurde das automatische Schleif- und Poliergerät „SCANDIMATIC“ der Firma SCAN-DIA (Hans P. Tempelmann GmbH & Co KG, Hagen) gewählt. Mit Hilfe eines Probenhalterarms und eines Kunststoffeinlegerings war es möglich, die Proben oberhalb des Poliermittels zu platzieren. Eine Polyethylen-Trägerscheibe mit einem Durchmesser von 200 mm wurde für jede einzelne Probe neu mit einem Siliziumkarbid-Nassschleifpapier der Körnung 4000 Grit (Struers GmbH, Willich) bestückt. Durch den Schleifpapierwechsel sollten mögliche Verfälschungen der Messwerte durch Abnutzung, Verunreinigung oder Zusetzen der Schleifpapieroberfläche durch vorangegangene Polituren verhindert werden. Als Poliermittel wurde SiC-Nassschleifpapier mit einer Körnung von 4000 Grit (5 µm) entsprechend der feinsten Körnung der Sof-Lex™ Polierscheiben (1 - 7 µm) ausgewählt. Große, glatte Flächen wie bei Oberkieferfrontzähnen können durch die große Auflagefläche der Scheibe gut über die verschiedenen Politurstufen glänzend poliert werden [30]. Da eine gleichmäßige Befeuchtung beim Poliervorgang gewährleistet werden sollte, wurde die Schleifpapieroberfläche kontinuierlich mit 50 ml Wasser pro Minute benetzt. Des Weiteren diente die Wasserzufuhr zur Kühlung der Probe und zur Entfernung des Schleifstaubes.

Um einen vergleichbaren Anpressdruck, wie er bei der manuellen Politur von Kompositfüllungen am Patienten aufgebracht wird, zu erzeugen, wurde in Vorversuchen ein Auflagegewicht von 800 g für die Probenfläche von 900 mm² ermittelt. Anschließend wurden die Proben für jeweils 3 Minuten bei einer Scheibendrehzahl von 600 U/min poliert. Zur Probenaufnahme diente ein

beweglicher Probenhalterarm mit Einlegering von 32 mm Durchmesser. Dies ermöglichte den Proben während der Bearbeitung leichte Rotationsbewegungen, so dass diese allseitig poliert werden konnten.



Abbildung 7: Schleif- und Poliergerät SCANDIMATIC

3.4 Glanzmessung vor und nach der Bearbeitung

Je nach Glanzgrad der Probenoberfläche wurde diese bei vorgegebenen Beleuchtungswinkeln gemessen. Um hochglänzende bis matte Oberflächen besser differenzieren zu können, wurden 3 Geometrien, d. h. Winkel zur Probennormalen, genormt (DIN 67530). Die 60°-Geometrie dient zur Beurteilung des Mittelglanzes, die 20°-Geometrie ist v. a. für den Hochglanz und die 85°-Geometrie für den Mattglanz geeignet.

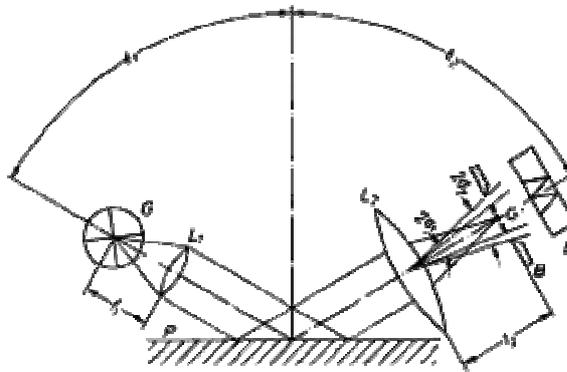


Abbildung 8: Reflektometeranordnung nach DIN 67530

Eine Prinzipskizze der Reflektometeranordnung nach DIN 67530 mit parallelem Strahlengang ist oben dargestellt. Hier befinden sich die Lichtquelle G auf der linken und der entsprechende Detektor G' auf der rechten Seite. Die Detektoren sind so dimensioniert, dass jeweils für den erforderlichen Messbereich ein linearer Kurvenverlauf – sog. Kennlinienverlauf zwischen Glanzwert und optischem Eindruck – vorliegt (Abb. 9). Es wurden insgesamt 13 Testoberflächen mit unterschiedlichen Glanzgraden unter allen drei Geometrien vermessen. Das Umschalten von einer Messgeometrie zur nächsten bewirkt für dieselbe Testoberfläche eine deutliche Änderung des Glanzwertes. So besitzt die Testoberfläche Nr. 8 bei der 60°-Geometrie 70 Glanzeinheiten, während sie unter 20° gemessen lediglich 30

Glanzeinheiten aufweist. Das bedeutet, dass zu jeder Glanzmessung stets der verwendete Messwinkel anzugeben ist.

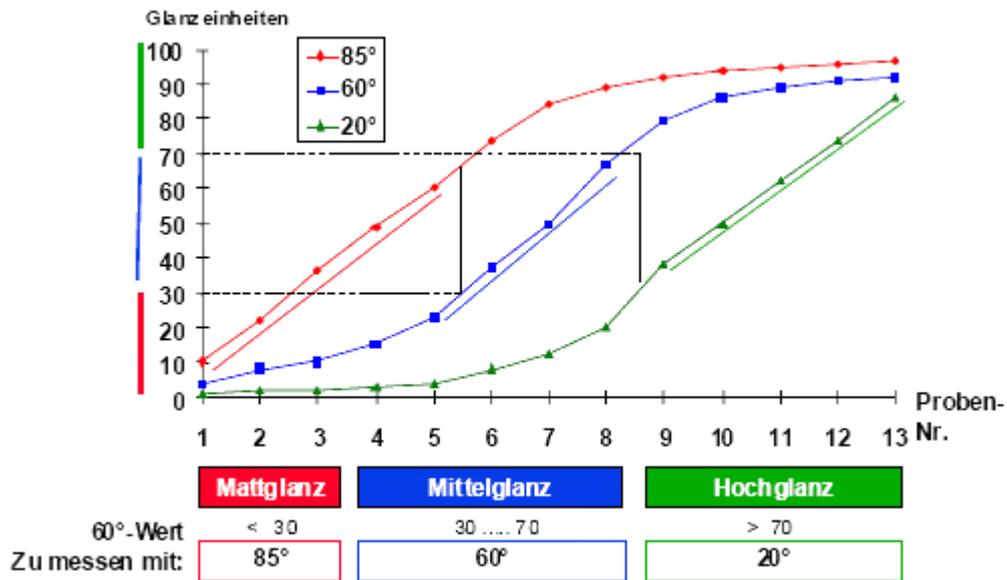


Abbildung 9: Anwendungsbereiche der Geometrien nach DIN 67530

Um den Messbereich für eine unbekannte Probe zu ermitteln, muss zunächst unter der 60°-Geometrie gemessen werden. Liegt bei dieser Messung der Messwert oberhalb von 70 Glanzeinheiten so wird die 20°-Geometrie bzw. bei Messwerten unterhalb von 30 Glanzeinheiten die 85°-Geometrie empfohlen. Durch die nicht linearen Kurvenverläufe können hochglänzende Proben, die mit der 60°-Geometrie gemessen werden, ab ca. 90 Glanzeinheiten teilweise nur schwer differenziert werden. Dies ist aber noch ohne Probleme bei der 20°-Geometrie möglich.

3.5 Datentransfer und Dokumentation der Messergebnisse

Zur Dokumentation der Messergebnisse wurden die Glanzwerte via PC-Transferkabel auf das Notebook übertragen. Mit der zugehörigen Software „BYKWARE easy-link“ war es möglich, alle gewonnenen Daten in übersichtlicher Form im Tabellenkalkulationsprogramm Microsoft Excel darzustellen. Nach Berechnung der Mittelwerte und Standardabweichungen wurden alle Ergebnisse zur genaueren Analyse in Säulendiagrammen dargestellt.

3.6 Vorversuche

3.6.1 Zum Glanz vor der Politur

Da zur standardisierten Politur Ausgangsproben mit möglichst glatten Oberflächen benötigt werden, wurden die Komposite bei der Herstellung gegen ideal planparallele Glasplatten gepresst und ausgehärtet, weil in zahlreichen früheren Studien – zum Thema Politur von Kompositen – die glattesten Probenoberflächen mit Polyester-Matrizenbändern erzeugt worden waren. Zusätzliche Polituren nach Entfernung der Matrize führten nur zur Aufrauhung der Kompositoberflächen [51]. Mit diesem Vorversuch sollte evaluiert werden, ob durch eine zusätzliche Politur mit Polierpasten vor der eigentlichen Bearbeitung eine Steigerung der ohnehin schon glatten Probenoberfläche möglich wäre. Zu diesem Zweck wurden 3 Prophylaxepasten bzw. Polierpasten ausgewählt, die regelmäßig Anwendung in der Praxis finden:

1. Universal Polishing Paste[®] der Firma Ivoclar Vivadent GmbH (zur Hochglanzpolitur von Kunststoff- und Metallarbeiten)
2. Cleanic[®] der Firma Kerr Hawe SA (Zahnreinigungs- und Polierpaste in einem; der Abrasivstoff Silica / Naturkiesel verwandelt sich unter Last von grob- zu feinkörnig, die Reinigungspaste wird während der Anwendung von selbst zur Polierpaste mit Glanzeffekt)
3. Clean Polish[®] der Firma primedis GmbH (Fluoridfreie Zahnreinigungs- und Polierpaste zum Reinigen natürlicher Zähne sowie zum Vorpolieren von Gold-, Amalgam- und Kunststofffüllungen)

Zur Probenherstellung wurde das Feinstpartikel-Hybrid-Komposit Venus[®] der Heraeus Kulzer GmbH ausgewählt. Als Vertreter der Nano-Hybrid-Komposite wurde Grandio[®] der VOCO GmbH getestet. Es wurden jeweils 3 Proben in der Farbe A2 hergestellt. Der Glanz wurde direkt nach der zusätzlichen Politur gemessen und anschließend mit den Glanzwert unmittelbar nach Probenherstellung verglichen.

Im ersten Durchlauf wurden jeweils 3 Proben des Feinstpartikel- und des Nano-Hybrid-Komposits auf ihre Polierbarkeit mit den unterschiedlichen Polierpasten überprüft. Dabei erfolgte die Hochglanzpolitur mit einer Wollschwabbel an der Poliermaschine bei 1500 - 3000 U/min. Während der Politur wurde der Anpressdruck manuell frei gewählt.

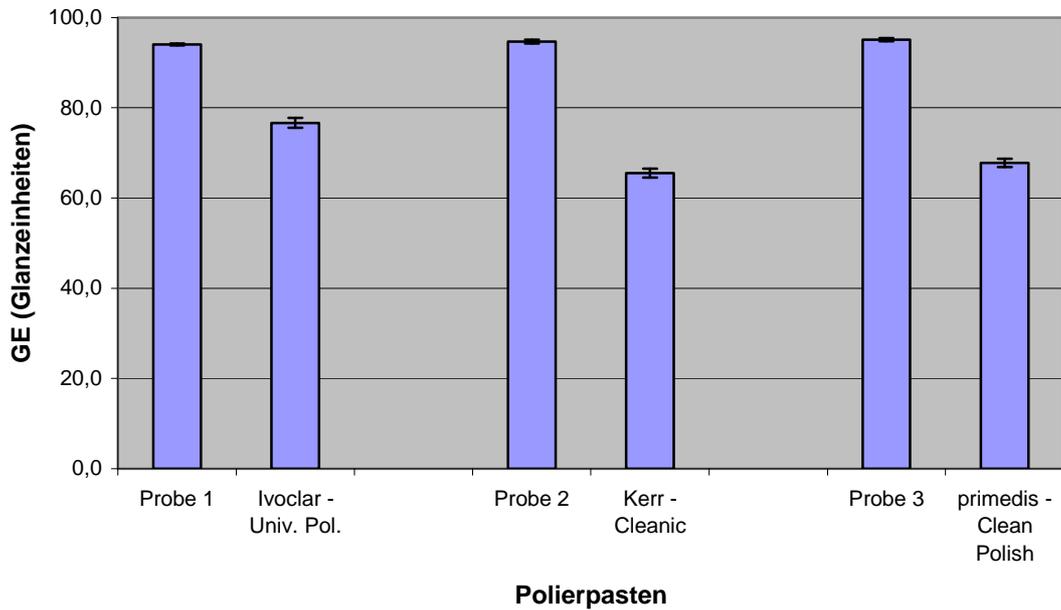


Abbildung 10: Glanzwerte von Venus A2 vor und nach Bearbeitung mit den unterschiedlichen Polierpasten (Mittelwerte und Standardabweichungen)

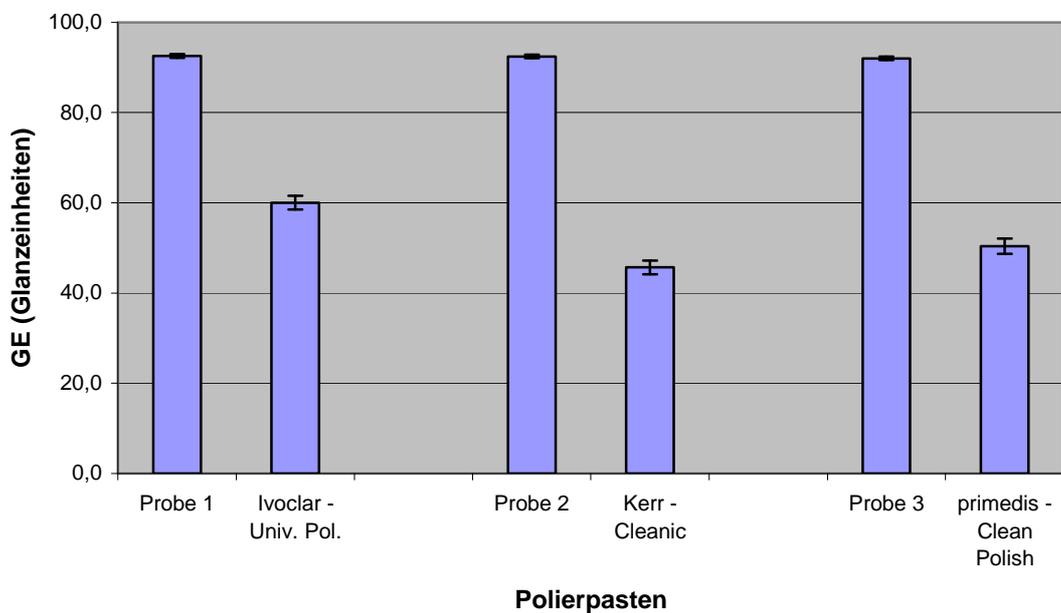


Abbildung 11: Glanzwerte von Grandio A2 vor und nach Bearbeitung mit den unterschiedlichen Polierpasten (Mittelwerte und Standardabweichungen)

Als Ergebnis war die Abnahme der Glanzwerte nach standardisierter Bearbeitung bei allen getesteten Kompositproben festzuhalten. Im Vergleich der Polierpasten wurde mit Universal Polishing Paste[®] höhere Glanzwerte als bei der Verwendung von Clean Polish[®] erzielt. Mit der Prophylaxepaste Cleanic[®] wurden die niedrigsten Glanzwerte gemessen. Dabei zeigte das Nano-Hybrid-Komposite Grandio[®] generell niedrigere Glanzwerte als das Feinstpartikel-Hybrid-Komposit Venus[®]. Bei Venus[®] war eine Verminderung der Glanzwerte zwischen 28 % und 38 %, bei Grandio[®] zwischen 44 % und 58 % zu verzeichnen. Somit wurden bei Grandio[®] generell deutlich niedrigere Glanzwerte als bei Venus[®] gemessen.

Im zweiten Durchlauf der Vorversuche galt es zu evaluieren, inwieweit das Ergebnis der Politur durch die Bearbeitungsdauer beeinflusst werden kann. Dazu wurden Glanzmessungen zunächst vor der Politur und nach jeder weiteren polierten Minute – bei einer Gesamtdauer von 5 min – vorgenommen. Für die Probenherstellung wurde erneut das Feinstpartikel-Hybrid-Komposit Venus[®] A2 verwendet. Zur Vergleichbarkeit wurden die Prophylaxepasten Cleanic[®] und Clean Polish[®] gewählt. Anschließend erfolgte die Hochglanzpolitur mit einem Polierkelch der Firma Becht und dem grünem Winkelstück bei 1500 - 2000 U/min.

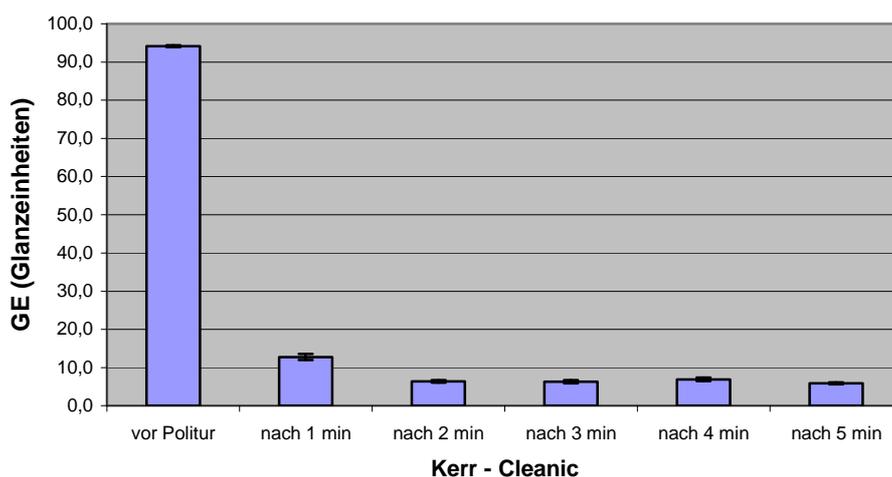


Abbildung 12: Glanzwerte von Venus A2 vor und nach Bearbeitung mit Cleanic in Minutenabständen (Mittelwerte und Standardabweichungen)

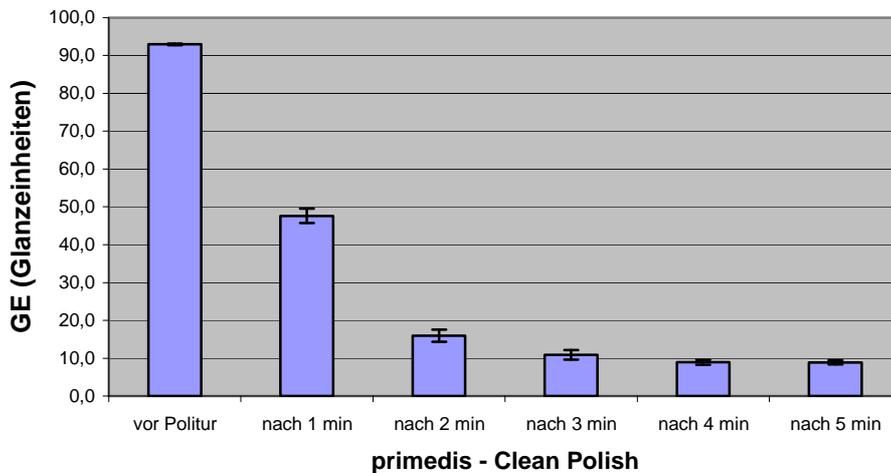


Abbildung 13: Glanzwerte von Venus A2 vor und nach Bearbeitung mit Clean Polish in Minutenabständen (Mittelwerte und Standardabweichungen)

Nach einer Bearbeitungsdauer von 5 min konnte bei Venus[®] eine Verminderung des Glanzes auf ca. 5,5 % des Ausgangswertes bei der Politur mit Cleanic[®] bzw. auf ca. 7,5 % bei der Politur mit Clean Polish[®] verzeichnet werden.

Auffälligkeiten zeigten sich in der drastischen Abnahme der Glanzwerte bei der 60° Messung in den ersten 2 min der Politur. Die andauernde Politur führte nach 3, 4 und 5 Minuten nur zu unwesentlichen Veränderungen der Glanzwerte und ist somit zu vernachlässigen. Auch ist festzuhalten, dass bei der Hochglanzpolitur an der Poliermaschine nach derselben Bearbeitungsdauer deutlich höhere Glanzergebnisse hervorgerufen wurden als bei der Politur mit dem grünen Winkelstück.

Die Schlussfolgerung dieses Vorversuches war, dass durch die zusätzliche Anwendung der Prophylaxepasten keine Verbesserung des Glanzes erzielt werden konnte. Vielmehr bewirkten sie eine Aufrauung der bereits glatten Kompositoberfläche, was auch in einer ähnlichen In-vitro-Studie zur Oberflächenwirkung von Prophylaxepasten bestätigt werden konnte [9].

3.6.2 Zur Festlegung der Bearbeitungsmodalitäten

Da in der Praxis je nach Behandler sowohl unterschiedliche Poliersysteme als auch individuelle Bearbeitungsmethoden favorisiert werden, müssen mehrere Faktoren gleichermaßen berücksichtigt werden, um eine standardisierte Poliermethode – diese soll aber dennoch vergleichbare Ergebnisse zulassen – zu entwickeln.

Mit diesen Vorversuchen sollte daher evaluiert werden, inwieweit unterschiedliche Parameter wie der Anpressdruck, die Poliergeschwindigkeit, die Polierdauer und die Verschleißerscheinung des Polierkörpers Einfluss auf die Hochglanzpolitur und somit auf das Glanzergebnis eines festgelegten Bearbeitungssystems nehmen könnten.

Um werkstoffspezifische Eigenschaften eines einzelnen Komposits auszuschließen und einen Vergleich zwischen unterschiedlichen Kompositarten zu ermöglichen, wurden zur Probenherstellung das Nano-Hybrid-Komposit Grandio® der Firma VOCO und das Nano-Komposit Filtek™ Supreme XT der Firma 3M ESPE ausgewählt. Es wurden jeweils drei Proben der Zahnfarbe C3 hergestellt und deren Glanzgrade unmittelbar nach Probenherstellung in unbearbeitetem Zustand sowie direkt nach der standardisierten Politur gemessen und miteinander verglichen. In nachfolgenden Versuchen sollten die oben genannten Parameter berücksichtigt und deren Einfluss auf das Polierergebnis geprüft werden.

Der Glanz eines jeden Gegenstandes ist von seiner Oberflächenbeschaffenheit abhängig. Je rauer seine Oberfläche ist, desto größer ist der Anteil an diffus reflektiertem Licht und desto geringer sein Glanz [58]. Der durch die Politur hervorgerufene Verschleiß einer Oberfläche ist wiederum von Einflussgrößen wie z. B. dem Anpressdruck, der Poliergeschwindigkeit, der Dauer der Bearbeitung und dem gewählten Poliermittel abhängig. Da der Druck als Wirkung einer Kraft auf eine Fläche definiert ist und entscheidenden Einfluss auf das Glanzergebnis nimmt, galt bei diesen Vorversuchen dem Parameter „Anpressdruck“ ein besonderes Augenmerk. Als standardisierte Methode wurde die maschinelle Politur mit Hilfe von Siliziumkarbid-Nassschleifpapier gewählt. So sollte zunächst ermittelt werden, mit

welchem Gewicht die Kompositproben während ihrer Bearbeitung belastet werden müssen, um möglichst optimale Polierergebnisse zu erzielen. Um Unterschiede in der Schichtstärke der Komposite und somit eine unregelmäßige Politur auszuschließen, wurden die Proben sowohl unmittelbar nach ihrer Herstellung als auch während der Bearbeitung mit Hilfe einer digitalen Schieblehre regelmäßig kontrolliert.

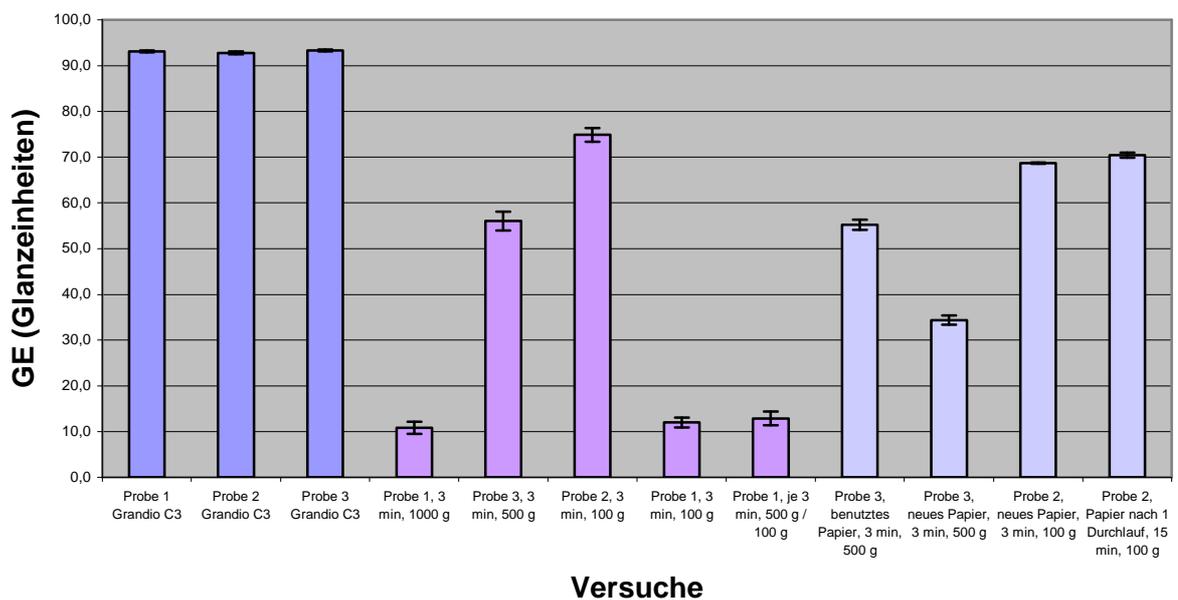


Abbildung 14: Glanzwerte aus Vorversuchen mit Grandio bei der 60°-Geometrie (Mittelwerte und Standardabweichungen)

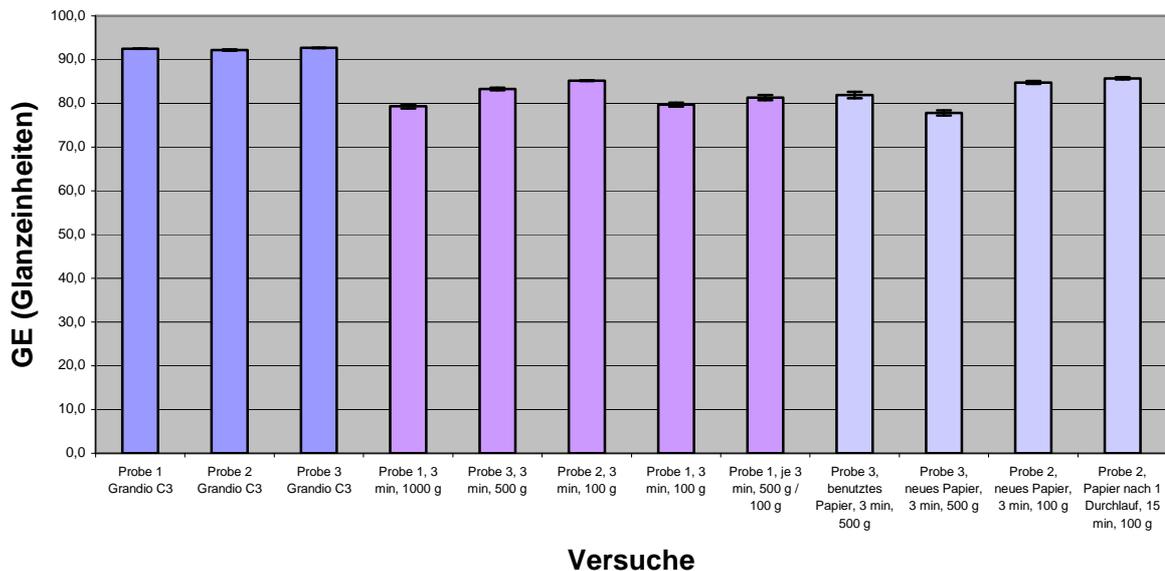


Abbildung 15: Glanzwerte aus Vorversuchen mit Filtek Supreme bei der 60° Geometrie (Mittelwerte und Standardabweichungen)

In den Abbildungen 14 und 15 sind die Ergebnisse aus den Vorversuchen für die Komposite Grandio[®] und Filtek[™] Supreme als Säulendiagramme getrennt voneinander dargestellt. Zur besseren Vergleichbarkeit wurden beide Versuchsreihen in gleicher Abfolge durchgeführt und die Glanzwerte jeweils bei der 60°-Geometrie gemessen.

In den Diagrammen stellen die blauen Säulen 1 bis 3 zunächst die Glanzwerte unmittelbar nach Probenherstellung dar. Die Säulen 4 bis 6 (lila dargestellt) zeigen die Werte nach einer Bearbeitungsdauer von 3 min und Belastung mit unterschiedlicher Gewichtskraft, wobei Glanzunterschiede bei Grandio[®] offensichtlicher sind als bei Filtek[™] Supreme. Probe 1 wurde zunächst mit 1000 g (Säule 4), Probe 2 mit 100 g (Säule 6) und Probe 3 schließlich mit 500 g (Säule 5) belastet. Um zu klären, ob eine zusätzliche Politur mit weniger Druck das Glanzergebnis nachträglich verbessern kann, wurde die zuvor mit 1000 g belastete Probe erneut für 3 min und einem Auflagegewicht von 100 g poliert (Säule 7). Eine signifikante Verbesserung der Glanzwerte ergab sich jedoch nicht. Eine weitere Bearbeitung der

Probe 1 zunächst mit 500 g Belastung für 3 min und anschließend erneut mit 100 g für 3 min (Säule 8) führte ebenfalls nur zu einer unmerklichen Verbesserung des Glanzes und ist somit zu vernachlässigen. Somit bleibt festzuhalten, dass durch die zweizeitige Politur mit abnehmender Auflagekraft keine auffallende Steigerung des Glanzergebnisses hervorgerufen werden konnte.

Da auch der Abrieb der Schleifpartikel mit zunehmender Bearbeitungsdauer Einfluss auf die Hochglanzpolitur nimmt, musste diese Verschleißerscheinung des Poliermittels mitberücksichtigt werden. Um einer möglichen Verfälschung der Messwerte durch Abnutzung, Verunreinigung oder Zusetzen der Schleifpapieroberfläche durch vorangegangene Polituren vorzubeugen, kamen daher stets neue Schleifpapierscheiben zum Einsatz.

Die Säulen 9 bis 11 beider Diagramme (hellblau dargestellt) verdeutlichen den Einfluss des Schleifpapierwechsels auf die Messwerte. Wie zuvor treten Differenzen bei Grandio[®] stärker hervor als bei Filtek[™] Supreme. Es konnte gezeigt werden, dass eine nachträgliche Politur mit bereits benutztem Schleifpapier bessere Ergebnisse liefert als der Wechsel auf neues Papier nach 3 min. Dieses Verhalten kann dadurch begründet werden, dass die Schleifpapieroberfläche mit zunehmender Bearbeitungsdauer mit abgetragenen Polierstäuben zugeschwemmt wird und anschließend ein weniger abrasives Verhalten als unbenutztes Schleifpapier zeigt.

Auch in diesen Versuchen war erneut die verwendete Auflagekraft entscheidend. Je geringer der Druck war, desto besser waren die Glanzwerte. Dies wird durch die Säulen 10 und 11 verdeutlicht. Somit hat die Auflagekraft, mit der eine Probe während der Politur gleichmäßig belastet wird, einen entscheidenden Einfluss auf das Glanzergebnis.

Um einen vergleichbaren Anpressdruck – wie er bei der manuellen Politur von Komposit-Füllungen am Patienten erzeugt wird – zu ermitteln, wurde ein weiterer Versuch herangezogen. Für diesen Zweck wurden extrahierte, in Gips eingebettete Zähne auf einer Präzisionswaage fixiert und anschließend mit sehr feinen Sof-Lex[™] Polierscheiben und dem grünem Winkelstück bei niedriger Drehzahl (< 2000 U/min) bearbeitet. Aus der Arbeitsfläche der Polierscheibe und der durchschnittlich

gemessenen Auflagekraft während der Bearbeitung konnte ein Anpressdruck von ca. $0,9 \text{ g/mm}^2$ ermittelt werden. Übertragen auf die Oberfläche der Kompositproben von 900 mm^2 wurde somit eine Gewichtskraft von 800 g für die Bearbeitung festgelegt. Als Poliermittel wurde Siliziumkarbid-Nassschleifpapier mit einer Körnung von 4000 Grit ($5 \text{ }\mu\text{m}$) entsprechend der sehr feinen Aluminiumoxid-Körnung ($1 - 7 \text{ }\mu\text{m}$) von Sof-Lex™-Polierscheiben ausgewählt. Mit dem letzten Versuch sollte der Einfluss der Bearbeitungsdauer veranschaulicht werden. Der Vergleich zwischen den Säulen 11 und 12 lässt jedoch keinen auffallenden Unterschied erkennen. Die andauernde Politur führte nach 5, 10 und 15 Minuten nur zu geringfügigen Erhöhungen der Glanzwerte und ist somit zu vernachlässigen.

Als Ergebnis dieser Vorversuche bleibt festzuhalten, dass der Anpressdruck und die Abnutzung des Schleifpapiers entscheidend für das Polierergebnis sind. Die Politurdauer scheint nach Ablauf von ca. 3 Minuten keinen erheblichen Einfluss mehr auf die Glanzwerte zu nehmen, da durch die voranschreitende Abnutzung des SiC-Nassschleifpapiers nach dieser Zeit die Polierwirkung rapide abnimmt. Zudem wird die Oberfläche des Schleifpapiers während der Bearbeitung durch anfallende Polierstäube und herausgebrochene Füllkörper zunehmend zugesetzt, was ein weiterer Grund für den nachlassenden Poliereffekt ist.

4 Hauptuntersuchungen

Zur quantitativen Bestimmung des Glanzes wurde das Reflektometer „micro-TRI-gloss“ der Firma „BYK-Gardner GmbH“ gewählt, welches die Oberflächenreflexion bei drei unterschiedlichen Messgeometrien erfasst. Dabei wurde das Messergebnis als sog. Reflektometerwert – die optische Kenngröße für den Oberflächenglanz – in Glanzeinheiten (GE) angegeben. Insgesamt wurden 5 Proben pro Komposit hergestellt und jeweils 5 Glanzmessungen unmittelbar nach Probenherstellung sowie 5 Messungen nach standardisierter Bearbeitung durchgeführt. Abschließend wurden die durchschnittlichen Glanzwerte und Standardabweichungen der einzelnen Kompositgruppen errechnet und zur besseren Übersicht in Form von Säulendiagrammen dargestellt.



Abbildung 16: Micro-Tri-Gloss auf planer Oberfläche

Um einer möglichen Messwertverfälschung durch zurückgeworfene Streustrahlung vorzubeugen, erfolgte die Glanzmessung vor einem schwarzen Hintergrund, da dieser ein hohes Absorptionsvermögen besitzt.

5 Ergebnisse

5.1 Unbearbeitete Proben (gegen Glas polymerisiert)

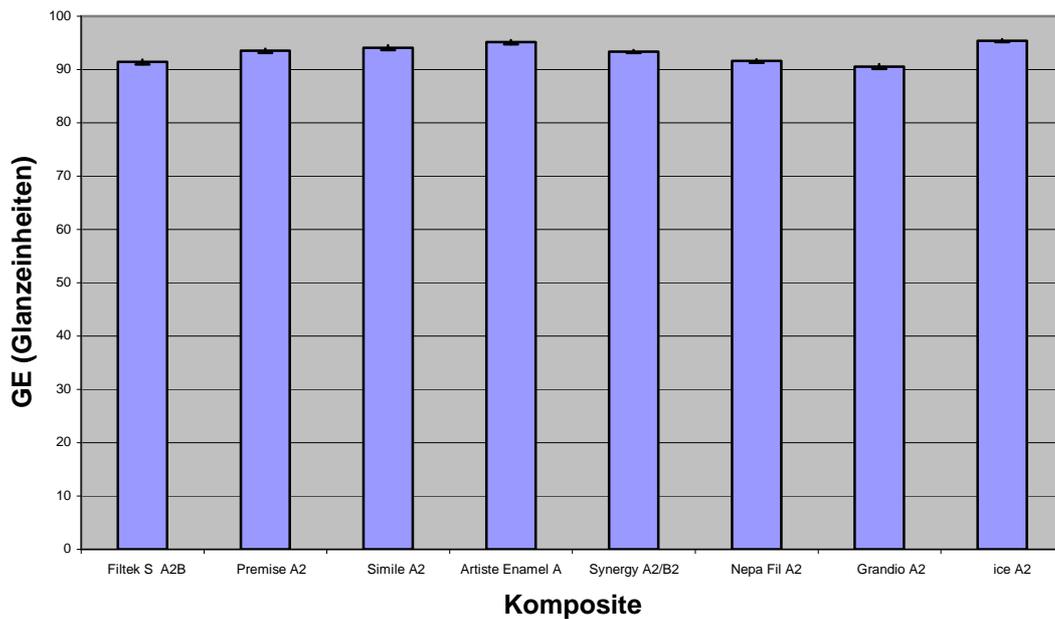


Abbildung 17: Übersicht der Messwerte vor Politur bei 60°-Geometrie (A-Proben)

Die nachfolgenden Abbildungen 18 - 20 zeigen die Glanzwerte für die Nano-Komposite unmittelbar nach Probenherstellung. Zur besseren Analyse sind die jeweiligen Mittelwerte und Standardabweichungen in Form von Säulendiagrammen zusammengefasst worden. Alle Glanzmessungen wurden jeweils mit der 20° (Hochglanz), 60° (Mittelglanz) und 85°-Geometrie (Mattglanz) durchgeführt. Die unterschiedlichen Messvarianten kommen vor allem zum Tragen, wenn Glanzunterschiede von Proben mit scheinbar ähnlichen Werten hervorgehoben werden sollen. Ein erster Vergleich zwischen den Kompositen erbrachte keine größeren Glanzunterschiede nach der Probenherstellung.

Dies wird besonders bei der 60°-Messgeometrie verdeutlicht, wo die Glanzwerte aller Nano-(Hybrid-)Komposite zwischen 95,86 GE (Maximalwert) und 89,55 GE (Minimalwert) lagen. Das höchste Glanzergebnis zeigte ice[®] (SDI) mit ca. 95 GE. Minimal niedrigere Glanzwerte wiesen beispielsweise Synergy D6[®] (Coltène Whaledent) und PREMISE[™] (KerrHawe SA) mit ca. 93 GE auf. Der verhältnismäßig niedrigste Glanz wurde bei Grandio[®] (VOCO GmbH) gemessen und betrug ca. 90 GE. Somit hatten alle Komposite vor der standardisierten Bearbeitung relativ hohe Glanzwerte. Der durchschnittliche Glanzwert aller Proben betrug ca. 93 GE.

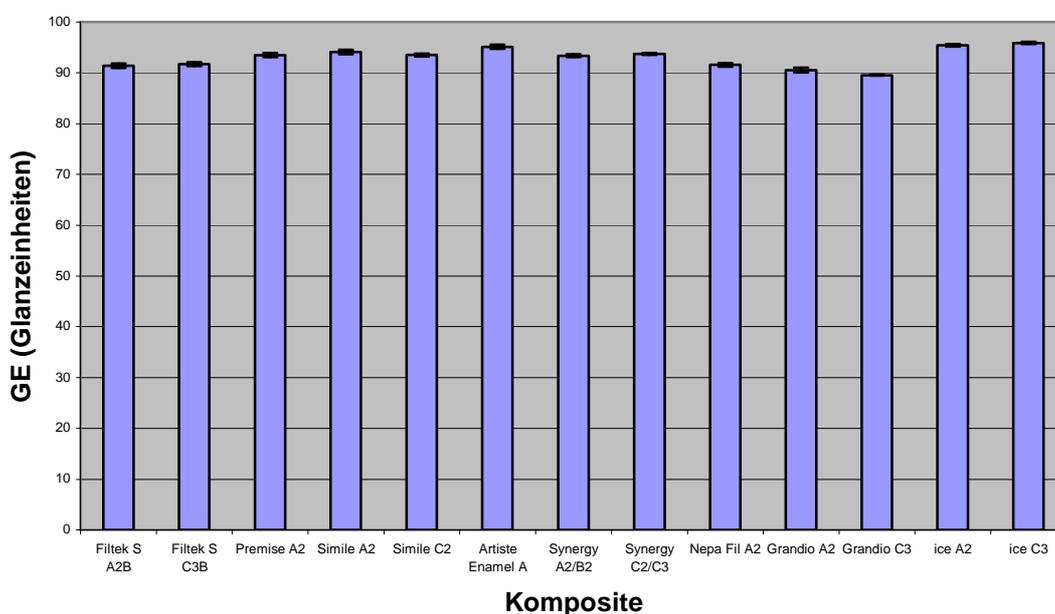


Abbildung 18: Messwerte vor Politur bei der 60°-Geometrie (Mittelwerte und Standardabweichungen)

Der Grund für generell hohe Glanzwerte liegt vermutlich in der gemeinsamen Ausgangssituation. Zur Herstellung der Proben wurden die Komposite gegen eine planparallele Glasplatte gepresst. Der noch plastische Materialzustand vor der Polymerisation ermöglicht die Einlagerung der Füllkörper in die Kompositmatrix während des Pressvorgangs. Die so erzeugten Probenoberflächen entsprechen nach der Aushärtung der planparallelen Pressfläche des Glases. Folglich weisen die

Kompositproben nach ihrer Herstellung vergleichbare Oberflächenrauigkeiten und somit ähnliche Glanzwerte auf. Die Art der enthaltenen Füllkörper, ihre Größe und ihre Anordnung in der Matrix – v. a. an der Grenzfläche zur Luft – scheinen vor der standardisierten Bearbeitung nur eine untergeordnete Rolle zu spielen. Diese Tatsache konnte auch in der Studie von M. Wefelmeier zum Thema „Polierbarkeit dentaler Komposite in Abhängigkeit vom Glanz“ [127] festgestellt werden, bei der herkömmliche Komposite unmittelbar nach der Probenherstellung vergleichbare Glanzwerte – wie die hier getesteten Nano-Komposite – aufwiesen. Der durchschnittliche Glanzwert aller Proben betrug bei den herkömmlichen Kompositen ebenfalls ca. 93 GE.

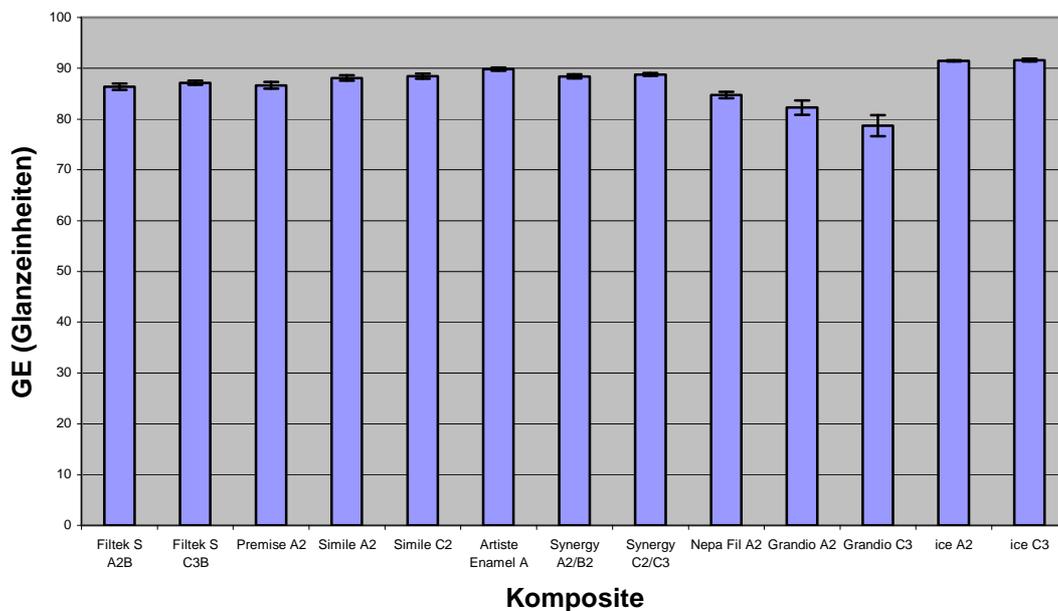


Abbildung 19: Messwerte vor Politur bei der 20°-Geometrie (Mittelwerte und Standardabweichungen)

Betrachtet man jedoch dieselben Proben mit der 20°-Geometrie, so fallen deutlichere Glanzdifferenzen auf, die durch die materialbedingten Reflexionseigenschaften hervorgerufen werden. Bei der Wahl des optimalen Messwinkels geht man zunächst von der 60°-Messung aus. Betragen die dort gemessenen Werte 70 Glanzeinheiten und mehr, sollte laut Herstellerangaben ein kleinerer Beleuchtungswinkel zur Glanzmessung gewählt werden. Zur Darstellung von hochglänzenden Oberflächen wird daher idealerweise die 20°-Messgeometrie empfohlen, da dann für diesen Messbereich wieder eine lineare Beziehung zwischen gemessenem Glanzwert und dem optischen Eindruck des Glanzgrades gegeben ist. Jedoch können Überschneidungen steiler Kurvenabschnitte unterschiedlicher Messgeometrien dazu führen, dass die Messwerte auf verschiedene Weise und ohne Ungenauigkeiten dargestellt werden können. So dient in diesem Falle die Betrachtung bei der 20°-Geometrie zur besseren Veranschaulichung der Glanzunterschiede zwischen den einzelnen Nano-Kompositen.

In Abbildung 19 wird die Glanzdifferenz von fast 13 Glanzeinheiten zwischen dem Maximalwert von 91,62 GE bei ice[®] C3 (SDI) und dem Minimalwert von 78,73 GE bei Grandio[®] C3 (VOCO GmbH) deutlich. Es zeigt sich ebenfalls eine breitere Streuung der Messwerte, wobei Grandio[®] mit bis zu 2 GE die größte Standardabweichung aufweist. Der bei der 20°-Messung erzielte durchschnittliche Glanzwert aller Komposite betrug ca. 87 GE.

Stellt man die Diagramme der 60°- und 20°-Geometrie direkt gegenüber, so lässt sich tendenziell eine ähnliche Abstufung bei der Glanzmessung erkennen. Die Nano-Komposite ice[®] und Artiste[®] (Jeneric Pentron) weisen die höchsten Glanzwerte und die Proben von Grandio[®] die vergleichbar niedrigsten Werte auf. Auch stimmt die Werteverteilung bei den Zahnfarben überein. Lediglich werden die Differenzen in der 20°-Messung durch Werte, die zwischen 91,62 GE und 78,73 GE rangieren, stärker verdeutlicht als in der 60°-Messung. Betrachtet man jedoch die Glanzwerte der Komposite, die sich im mittleren Messbereich befinden, so zeigen sich leichte Schwankungen bei den unterschiedlichen Messgeometrien. So weist beispielsweise Simile[®] (Jeneric Pentron) mit der Zahnfarbe A2 (94,09 GE) bei der 60°-Messung

einen minimal höheren Glanzwert auf als mit der Zahnfarbe C2 (93,53 GE). Bei der 20°-Messung verhält es sich genau umgekehrt. Hier zeigt Simile[®] C2 – wenn auch nur minimal – mit 88,47 GE ein höheres Ergebnis als Simile[®] A2 mit 88,10 GE. Da aber auch die Standardabweichung bei der Zahnfarbe A2 geringfügig höher ist als bei C2, können die Glanzwerte bei isolierter Betrachtung leicht differieren, zumal in den Diagrammen nur die gemittelten Werte aller gemessenen Proben dargestellt sind. Beim Vergleich der Kompositproben unterschiedlicher Hersteller fällt auf, dass sich auch hier minimale Änderungen in der Reihenfolge ergeben können. Zeigt beispielsweise in der 20°-Messung Filtek[™] Supreme XT Universal A2B (3M ESPE AG) mit 86,38 GE ein höheres Ergebnis als NEPA[®] Fil A2 (Merz Dental GmbH) mit 78,73 GE, so ist das Verhältnis in der 60°-Messung genau gegensätzlich.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass minimale Glanzunterschiede beim Vergleich der Messgeometrien auftreten können. Durch die Vielzahl der Einzelmessungen können auch die Standardabweichungen mehr oder weniger stark ausgeprägt sein. Die Auswahl der Zahnfarbe scheint keinen gravierenden Einfluss auf das Glanzergebnis zu nehmen. Insgesamt haben alle getesteten Komposite relativ hohe Glanzwerte vor der Politur und eine ähnliche Messwertverteilung beim Vergleich zwischen der 60°- und 20°-Geometrie.

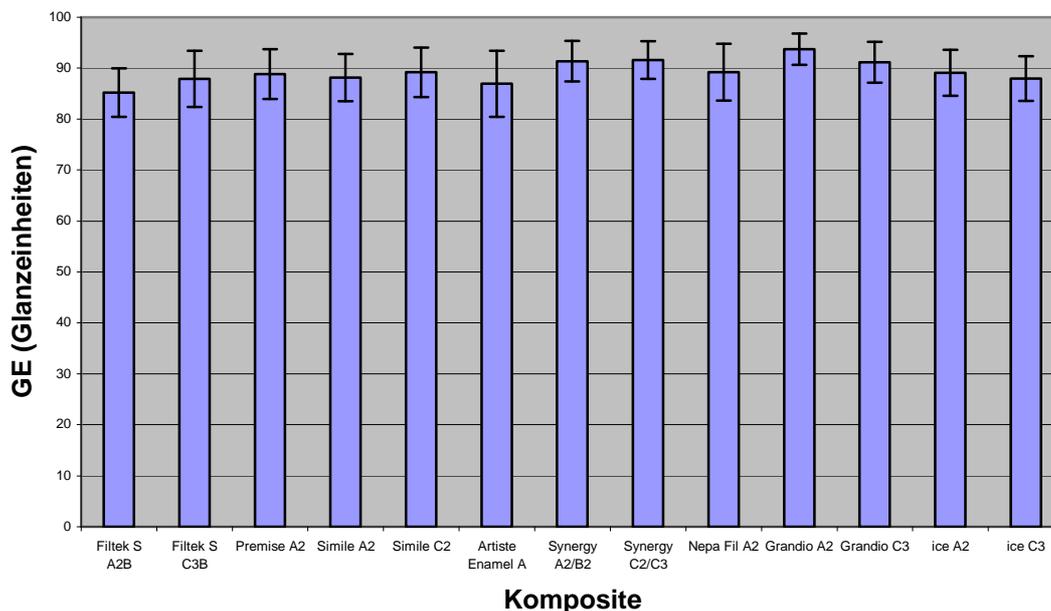


Abbildung 20: Messwerte vor Politur bei der 85°-Geometrie (Mittelwerte und Standardabweichungen)

Da die Glanzmessung mit der 85°-Geometrie für mattglänzende Oberflächen bestimmt ist, kommen relativ hohe Standardabweichungen zustande. Auch sind die Messwertunterschiede zwischen den einzelnen Kompositen stärker, als es das Diagramm auf den ersten Blick vermuten lässt. Diese Differenzen ergeben sich, weil anders als bei der 20° oder 60°-Geometrie für diesen Messbereich des Reflektometers kein linearer Kurvenverlauf besteht. Der 85°-Messwinkel kommt am besten zum Tragen, wenn der Wert bei der 60°-Messung 30 Glanzeinheiten oder weniger beträgt. Ein linearer Kennlinienverlauf wäre dann für diesen Messbereich wieder gegeben. Die Ergebnisse der 85°-Messung vor der Politur können somit vernachlässigt werden.

Da die Glanzwerte aller Proben vor und nach der Bearbeitung miteinander verglichen werden mussten, wurde letztendlich die 60°-Geometrie ausgewählt. Dieser Messwinkel garantierte für alle Komposite gleichermaßen einen ausreichend weiten Messbereich. So konnten Messungenauigkeiten weitestgehend vermieden werden.

Tendenziell wiesen alle untersuchten Proben unmittelbar nach Probenherstellung relativ hohe Glanzwerte auf.

5.2 Messung nach Bearbeitung

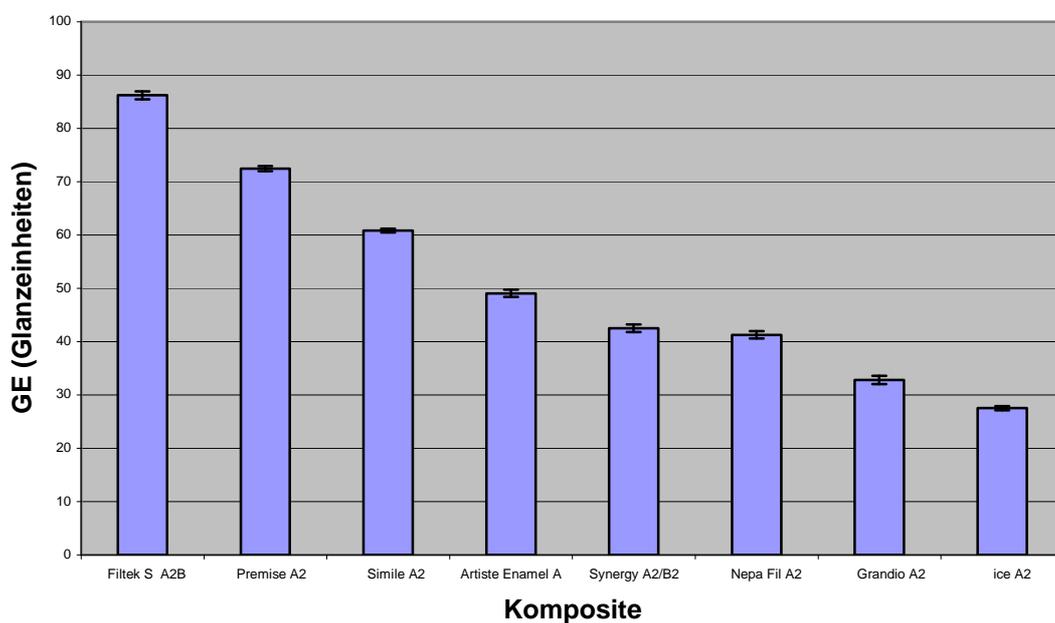


Abbildung 21: Übersicht der Messwerte nach Politur bei 60°-Geometrie (A-Proben)

In den Abbildungen 21 - 24 sind die Glanzwerte der Kompositproben nach standardisierter Bearbeitung dargestellt. Alle Proben weisen nach der Politur niedrigere Werte als vor der Bearbeitung auf. Dies gilt für alle drei verwendeten Messgeometrien. Die nachfolgende Abbildung zeigt die Werte der Nano-Komposite, die bei der 60°-Geometrie erfasst wurden.

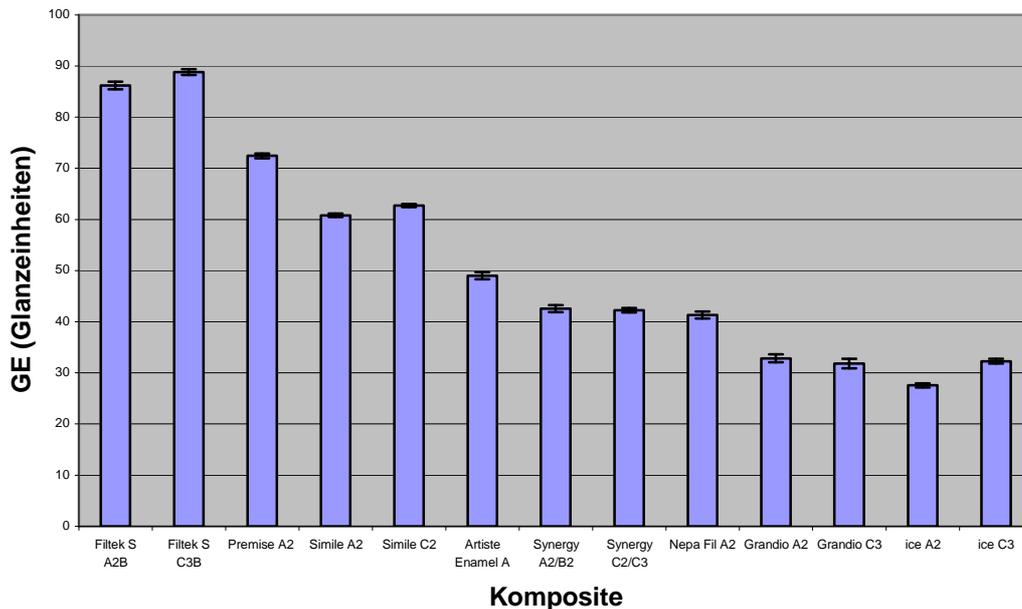


Abbildung 22: Messwerte nach Politur bei der 60°-Geometrie (Mittelwerte und Standardabweichungen)

Mit Werten über 85 GE erreichte Filtek™ Supreme XT Universal (3M ESPE AG) das höchste Glanzergebnis, gefolgt von PREMISE™ (KerrHawe SA) mit Werten über 70 GE und Simile® (Jeneric Pentron) mit knapp über 60 GE. Die niedrigsten Resultate wurden mit dem 60°-Winkel bei Grandio® (VOCO GmbH) und ice® (SDI) mit Glanzeinheiten unter 35 GE gemessen. Alle übrigen Nano-Komposite lagen im Messwertbereich zwischen 40 - 50 GE. Zur alternativen Darstellung der Glanzunterschiede zwischen den einzelnen Proben wurde erneut die 20°-Geometrie herangezogen.

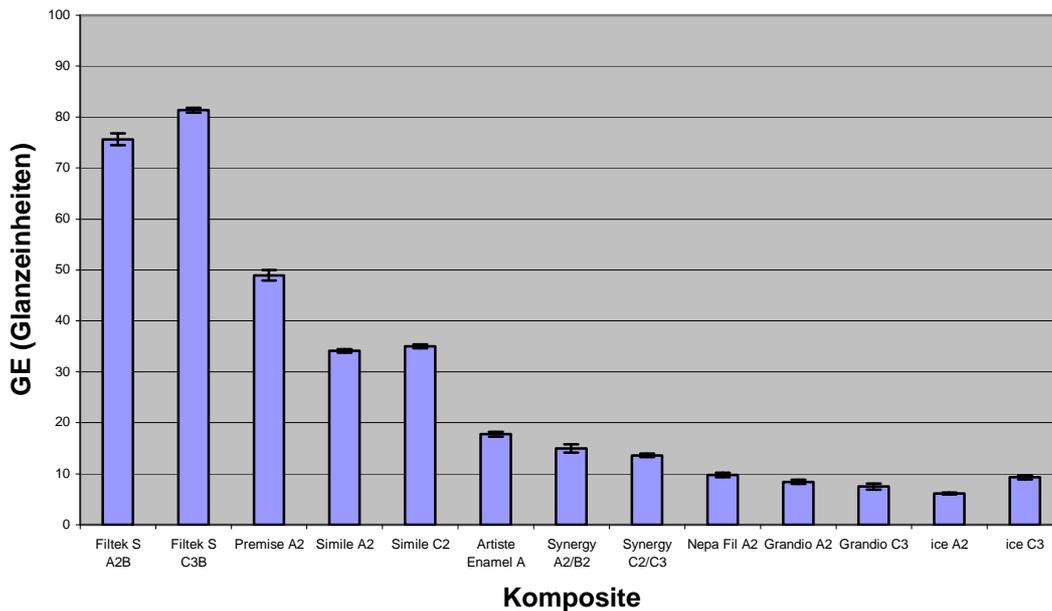


Abbildung 23: Messwerte nach Politur bei der 20°-Geometrie (Mittelwerte und Standardabweichungen)

Beträgt die Differenz zwischen den Kompositen mit dem höchsten und dem niedrigsten Glanzwert in der 60°-Messung ca. 61 GE, so ist diese in der 20°-Messung auf ca. 75 GE erhöht. Da aber die 20°-Messgeometrie insbesondere für den Hochglanzbereich – d. h. für 60°-Werte > 70 GE – bestimmt ist, können vor allem Messungen im unteren Wertebereich der 60°-Geometrie mit Ungenauigkeiten behaftet sein: hier nimmt der lineare Kurvenverlauf stärker ab. Dies kann anhand des Beispiels NEPA[®] Fil (Merz) verdeutlicht werden. Mit einem Messwert unter 10 GE weist es im Vergleich zur 60°-Geometrie einen relativ niedrigen Glanzwert auf. Dagegen hat Filtek[™] Supreme XT Universal (3M ESPE) in beiden Messgeometrien ähnlich hohe Glanzwerte. Tendenziell zeigen aber alle Proben bei der 20°-Messung eine ähnliche Werteverteilung wie bei der 60°-Messung. Jedoch fallen ihre Messwerte insgesamt niedriger aus. Kamen bei der Glanzmessung vor der standardisierten Bearbeitung insbesondere die materialbedingten Reflexionseigenschaften zum Tragen, so nahmen jetzt vor allem die Zusammensetzung der Füllkörper und ihre Anordnung in der Kompositmatrix Einfluss auf das

Glanzverhalten der Kompositproben. Durch die Bearbeitung mit SiC-Nassschleifpapier kommt es zu Aufrauung der Probenoberfläche. Hierbei wird zunächst die verhältnismäßig weiche Kompositmatrix abgetragen, wodurch die Füllkörper an der Oberfläche stärker freigelegt werden. Diese ragen dann in der obersten Schicht aus der Matrix hervor oder brechen bei instabiler Verankerung komplett aus ihr heraus. Je nach Art der verwendeten Füllkörper, ihrer Größe und dem Füllergehalt entstehen so mehr oder weniger raue Oberflächen. Da der Glanz wesentlich durch die Oberflächenbeschaffenheit eines Objektes und ihre Reflexionseigenschaft beeinflusst wird [58], ist dieser nach der Politur verändert. In dieser Untersuchung führte die Bearbeitung der Proben zu einer Aufrauung ihrer Oberfläche. Folglich war auch ihr Glanz vermindert.

Als einziger Vertreter der reinen Nano-Komposite weist Filtek™ Supreme XT Universal (3M ESPE AG) das mit Abstand höchste Glanzergebnis auf. Mit einer mittleren Füllkörpergröße von unter 1 µm erreicht das trimodale Nano-Hybrid-Komposit PREMISE™ (KerrHawe SA) die zweithöchsten Messwerte. Alle übrigen Nano-Hybrid-Komposite enthalten Partikel im höheren Mikrometerbereich und zeigen deutlich niedrigere Glanzwerte. Es fällt zudem auf, dass Komposite mit Zusätzen von Glasfüllkörpern (z.B. Synergy D6® oder Grandio®) schlechtere Poliereigenschaften besitzen und folglich weniger glänzen. Der Füllergehalt scheint keinen entscheidenden Einfluss auf das Glanzergebnis zu haben, wie beispielsweise der Vergleich zwischen Grandio® und PREMISE™ zeigt.

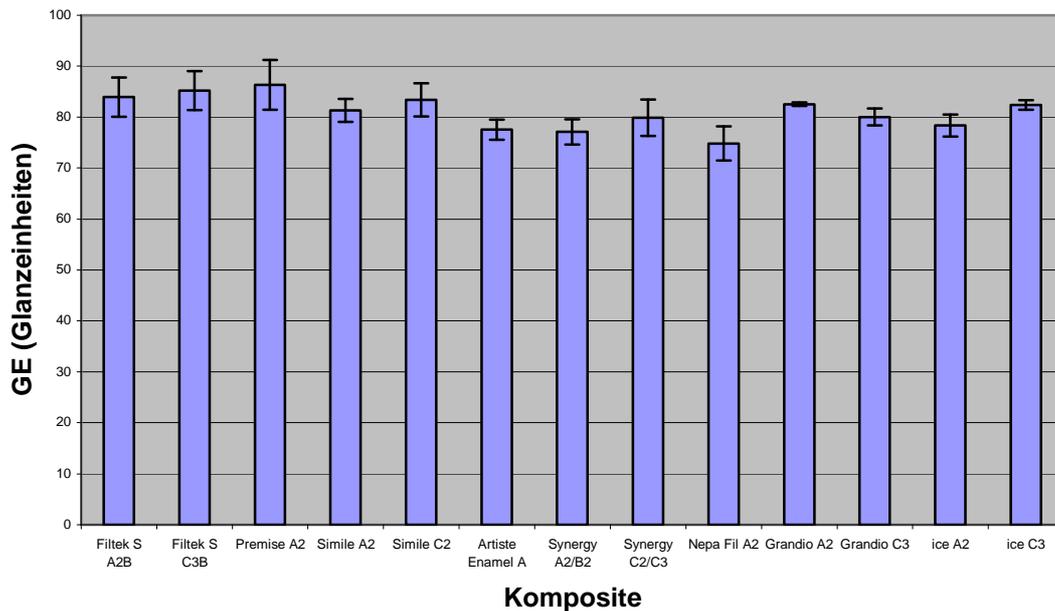


Abbildung 24: Messwerte nach Politur bei der 85°-Geometrie (Mittelwerte und Standardabweichungen)

In Abbildung 24 sind alle Polierergebnisse bei Anwendung des 85°-Beleuchtungswinkels zusammengefasst. Wie schon bei der Glanzbestimmung unmittelbar nach Probenherstellung verfälschen Messfehler und zu hohe Standardabweichungen die Ergebnisse. So zeigen beispielsweise niedrige Werte der 60°-Messung einen unverhältnismäßig hohen Glanzanstieg bei Verwendung der 85°-Geometrie, dagegen verändern sich zuvor hohe Glanzwerte nur geringfügig. Durch die verzerrte Darstellung der Messwerte können Glanzdifferenzen der einzelnen Proben nicht mehr wirklichkeitsgetreu dargestellt werden.

Dieser Umstand lässt sich durch die Glanzwerte der 60°-Messung erklären, die mit 30 - 70 GE außerhalb des Anwendungsbereichs der 85°-Geometrie liegen. Ungeachtet dessen gemessene Werte beinhalten zu große Ungenauigkeiten, als dass sie Aussagekraft hätten und sind infolgedessen zu vernachlässigen.

5.3 Statistische Analyse

Um signifikante Unterschiede der gemessenen Glanzwerte und ihrer Standardabweichungen festzustellen, wurden verschiedene statistische Tests angewendet.

5.3.1 Varianzanalyse

Voraussetzung für die Durchführung einer Varianzanalyse sind Homogenität der Gruppenvarianzen und Normalverteilung der Fehlerkomponenten, welche die Abweichung eines Messwertes vom jeweiligen Stichprobenmittel darstellt. Zum Nachweis der Normalverteilung wurde der „Kolmogorov-Smirnov-Test“ herangezogen. Dabei handelt es sich um einen statistischen Test auf Übereinstimmung zweier Wahrscheinlichkeitsverteilungen. Dem Test zufolge waren alle gemessenen Werte normal verteilt.

Für den horizontalen Vergleich – also die Testung der Kompositproben untereinander – wurde in dieser Arbeit die einfaktorielle „ANOVA“ (analysis of variance) durchgeführt. Diese Form der Varianzanalyse testet, ob sich die Mittelwerte aus verschiedenen Gruppen signifikant unterscheiden. Zur „Post-Hoc-Analyse“ wurde der „Scheffé-Test“ gewählt. Dabei kommt es zu einem paarweisen Vergleich der Gruppen. Ziel dieses Tests ist es, anhand des Vergleichs der Mittelwerte bei signifikanten Unterschieden homogene Untergruppen zu definieren.

In den nachfolgenden Tabellen 3 und 4 sind die Ergebnisse der Scheffé-Tests zusammengefasst. Dabei wurden folgende Abkürzungen verwendet:

S = Signifikanz, **/** = keine Signifikanz, **-** = nicht getestet

	Filtek Supreme A2B	Filtek Supreme C3B	Premise A2	Simile A2	Simile C2	Artiste Enamel A	Synergy A2/B2	Synergy C2/C3	Nepa Fil A2	Grandio A2	Grandio C3	ice A2	ice C3
Filtek Supreme A2B	—	/	/	/	/	S	/	/	/	/	/	S	S
Filtek Supreme C3B	/	—	/	/	/	S	/	/	/	/	/	S	S
Premise A2	/	/	—	/	/	/	/	/	/	/	S	/	/
Simile A2	/	/	/	—	/	/	/	/	/	S	S	/	/
Simile C2	/	/	/	/	—	/	/	/	/	/	S	/	/
Artiste Enamel A	S	S	/	/	/	—	/	/	S	S	S	/	/
Synergy A2/B2	/	/	/	/	/	/	—	/	/	/	S	/	/
Synergy C2/C3	/	/	/	/	/	/	/	—	/	S	S	/	/
Nepa Fil A2	/	/	/	/	/	S	/	/	—	/	/	S	S
Grandio A2	/	/	/	S	/	S	/	S	/	—	/	S	S
Grandio C3	/	/	S	S	S	S	S	S	/	/	—	S	S
ice A2	S	S	/	/	/	/	/	/	S	S	S	—	/
ice C3	S	S	/	/	/	/	/	/	S	S	S	/	—

Tabelle 3: Scheffé-Test für Glanzwerte vor Bearbeitung

Signifikanzniveau: 5%

Vor der Bearbeitung zeigten ca. 28% der getesteten Nano-(Hybrid-)Komposite signifikante Unterschiede ihrer Mittelwerte. Dabei wurden bei Grandio® C3 (VOCO) im paarweisen Gruppenvergleich die meisten statistischen Signifikanzen festgestellt.

	Filtek Supreme A2B	Filtek Supreme C3B	Premise A2	Simile A2	Simile C2	Artiste Enamel A	Synergy A2/B2	Synergy C2/C3	Nepa Fil A2	Grandio A2	Grandio C3	ice A2	ice C3
Filtek Supreme A2B	—	/	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
Filtek Supreme C3B	/	—	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
Premise A2	S	S	—	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
Simile A2	S	S	S	—	/	S	S	S	S	S	S	S	S
Simile C2	S	S	S	/	—	S	S	S	S	S	S	S	S
Artiste Enamel A	S	S	S	S	S	—	S	S	S	S	S	S	S
Synergy A2/B2	S	S	S	S	S	S	—	/	/	S	S	S	S
Synergy C2/C3	S	S	S	S	S	S	/	—	/	S	S	S	S
Nepa Fil A2	S	S	S	S	S	S	/	/	—	S	S	S	S
Grandio A2	S	S	S	S	S	S	S	S	S	—	/	S	/
Grandio C3	S	S	S	S	S	S	S	S	S	/	—	S	/
ice A2	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	—	S
ice C3	S	S	S	S	S	S	S	S	S	/	/	S	—

Tabelle 4: Scheffé-Test für Glanzwerte nach Bearbeitung

Signifikanzniveau: 5%

Beim Vergleich der paarweisen Gruppen nach Bearbeitung wurden ca. 90% der Nano-(Hybrid-)Komposite signifikant getestet. Mit Ausnahme des Vergleichs von ice[®] A2 zu ice[®] C3 der Firma SDI konnten bei der Gegenüberstellung der einzelnen Farben eines Nano-(Hybrid-)Komposits keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden.

5.3.2 t-Test

Der „t-Test“ ist ein statistisches Verfahren, mit dem Mittelwertsunterschiede zwischen Stichproben auf ihre statistische Signifikanz hin überprüft werden. Für den Vergleich eines Komposits vor und nach der Bearbeitung, d. h. vertikalen Vergleich, wurde der unpaarige t-Test herangezogen. Dieser Test prüft die Hypothese, ob die verglichenen Stichproben systematisch gegeneinander verschoben sind (Tabelle 5).

	Filtek Supreme A2B	Filtek Supreme C3B	Premise A2	Simile A2	Simile C2	Artiste Enamel A	Synergy A2/B2	Synergy C2/C3	Nepa Fil A2	Grandio A2	Grandio C3	ice A2	ice C3
Filtek Supreme A2B	S	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Filtek Supreme C3B	–	/	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Premise A2	–	–	S	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Simile A2	–	–	–	S	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Simile C2	–	–	–	–	S	–	–	–	–	–	–	–	–
Artiste Enamel A	–	–	–	–	–	S	–	–	–	–	–	–	–
Synergy A2/B2	–	–	–	–	–	–	S	–	–	–	–	–	–
Synergy C2/C3	–	–	–	–	–	–	–	S	–	–	–	–	–
Nepa Fil A2	–	–	–	–	–	–	–	–	S	–	–	–	–
Grandio A2	–	–	–	–	–	–	–	–	–	S	–	–	–
Grandio C3	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	S	–	–
ice A2	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	S	–
ice C3	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	S

Tabelle 5: t-Test für Glanzwerte vor und nach Bearbeitung

Signifikanzniveau: 5%

Einzig bei dem reinen Nano-Komposit Filtek™ Supreme XT Universal C3B (3M ESPE) waren nach Testung keine signifikanten Unterschiede (t-Wert = 5,766, p-Wert = 0,0004) der Mittelwerte feststellbar. Bei allen übrigen Kompositen war der p-Wert < 0,0001 und somit signifikant. Dabei rangierten die t-Werte dieser Proben zwischen 42,182 bei Simile® C2 (Jeneric Pentron) und 220,446 bei Synergie D6® C2/C3 (Coltène/Whaledent). Mit einem dazu vergleichbar niedrigen t-Wert von 13,88 wurde Filtek™ Supreme XT Universal A2B (3M ESPE) ebenfalls signifikant getestet.

6 Diskussion

6.1 Diskussion der Fehlermöglichkeiten

Fehlermöglichkeiten können sich in allen Teilabschnitten dieser Untersuchung ergeben, wobei diese sowohl material- als auch verfahrensbedingt sein können. So wurde bereits in den Vorversuchen strengstens darauf geachtet, mögliche Fehlerquellen zu erkennen und zu klären, um derartige in den Hauptuntersuchungen auszuschließen. Nachfolgend sollen die Herstellung der Proben, ihre anschließende Bearbeitung und die Glanzmessung als Hauptfehlerquellen diskutiert werden.

6.1.1 Probenherstellung

Bereits bei der Auswahl der Proben wurde Wert darauf gelegt, dass nur Nano-(Hybrid-)Komposite untersucht und verglichen werden, die sich bereits auf dem deutschen Dentalmarkt bewährt haben. So wurden eingangs alle Materialien auf ihre Herkunft überprüft und hinsichtlich ihrer Artikel- bzw. Chargennummer und ihres Haltbarkeitsdatums kontrolliert.

Zur Dosierung der Kompositmenge war die Verwendung von 4-g-Drehspritzen erforderlich, um möglichst homogene Proben herstellen zu können. Anders als beim Zusammenfügen kleinerer Kompositanteile aus 0,25-g-Karpulen konnten so Verunreinigungen und Porositäten durch Lufteinschlüsse weitestgehend vermieden werden. Generell wurden ein sauberes Arbeitsumfeld und die Verwendung von sterilen Bearbeitungsinstrumenten vorausgesetzt, um Verunreinigungen von außen zu vermeiden. Während der Materialverarbeitung wurden die Herstellerangaben stets beachtet und befolgt.

Als Probenträger wurde satiniertes Glas mit seiner vergrößerten Oberfläche ausgewählt, welches zur Retentionssteigerung zusätzlich mit einem kompatiblen Bonding Agent beschickt wurde. Komposite, die sich nach dem Pressen und Aushärten dennoch von ihrer Unterlage lösten oder inhomogene Oberflächen zeigten, wurden ausgemustert, da keine reproduzierbaren Messergebnisse erzielt werden konnten.

Um Differenzen in der Schichtdicke der Komposite und somit eine unregelmäßige Bearbeitung auszuschließen, wurden die Proben sowohl unmittelbar nach ihrer Herstellung als auch nach der Bearbeitung mit Hilfe einer digitalen Schieblehre kontrolliert.

6.1.2 Probenbearbeitung

Da bei der Bearbeitung der Probenoberfläche mehrere Parameter Einfluss auf die Hochglanzpolitur und somit auf das spätere Glanzergebnis nehmen können, sollten in den Vorversuchen mögliche Fehlerquellen erfasst werden. Hierzu wurden verschiedene Faktoren wie beispielsweise Anpressdruck, Polierdauer und Verschleißerscheinung des Polierkörpers getestet.

Entsprechend der feinsten Körnung der Sof-Lex™ Polierscheiben (1 - 7 µm) wurde zur Probenbearbeitung SiC-Nassschleifpapier mit einer Körnung von 4000 Grit (5 µm) ausgewählt. Weitere Poliermittel, die möglicherweise eine Steigerung der Glanzergebnisse erzielt hätten, wurden in dieser Arbeit nicht berücksichtigt.

Um verfälschte Messwerte durch Abrieb, Verunreinigung oder Zusetzen der Schleifpapieroberfläche durch vorangegangene Polituren zu verhindern, wurde ein Schleifpapierwechsel für jede einzelne Probe vorgenommen. Zusätzlich wurden die Kompositoberflächen durch eine kontinuierliche Wasserzufuhr gekühlt und entstandene Schleifstäube entfernt. Durch leichte Rotationsbewegungen der Proben während der Politur konnten diese allseitig bearbeitet werden.

Analog zum aufgebrachten Anpressdruck bei der Politur mit Sof-Lex™-Polierscheiben am Patienten wurde die Auflagekraft von 800 g für eine Probenfläche von 900 mm² ermittelt und für jede Probe beibehalten.

Die Bearbeitungsdauer wurde auf 3 Minuten begrenzt, da Vorversuche gezeigt hatten, dass längere Polierzeiten nur zu unwesentlichen Veränderungen der Glanzwerte führten.

6.1.3 Glanzmessung

Die quantitative Bestimmung des Glanzes wurde mit einem Messgerät durchgeführt, welches die Oberflächenreflexion bei drei unterschiedlichen Messgeometrien erfasst. Dies ermöglichte eine bessere Differenzierung von Glanzunterschieden einzelner Kompositproben.

Um fehlerhafte Messungen des Glanzes zu vermeiden, wurde das Reflektometer regelmäßig auf einen schwarzen, polierten Glasstandard mit definiertem Brechungsindex kalibriert. Die automatische Diagnose des Gerätes prüfte zusätzlich die Kalibrierwerte und meldete, wann ein erneuter Vergleich mit dem Standard nötig war. Somit wurden zuverlässige Glanzmessungen ohne Bedienfehler sichergestellt.

Da der Mittelwert jeder Probe aus 25 Einzelmessungen gebildet wurde, können mehr oder weniger große Schwankungen zwischen dem Maximal- und Minimalwert eines Komposits vorliegen. Durch die Festlegung der maximalen Standardabweichung wurde eine zu große Streuung der Glanzwerte um ihren Mittelwert vermieden.

Des Weiteren hätten Faktoren wie z. B. der Glanzschleier das Messergebnis negativ beeinflussen können. Durch diffuses Streulicht geringer Intensität nahe der Hauptreflexionsrichtung wird der Glanz getrübt, und die Oberfläche erscheint bei der visuellen Wahrnehmung matt. Die Tatsache, dass diese Glanztrübung ausschließlich bei hochglänzenden Oberflächen auftritt und nur durch einen Messwertvergleich bei unterschiedlichen Reflexionswinkeln angezeigt werden kann, war ein weiterer Grund, die 20°-Geometrie hinzu zu ziehen.

6.2 Diskussion der Ergebnisse

6.2.1 Hochglanzpolierbarkeit von Nano-Kompositen

Viele Studien beschäftigen sich seit Einführung der Nano-Komposite mit ihren physikalischen und klinischen Eigenschaften [2; 29; 52; 68; 110; 111; 123; 133]. So konnte beispielsweise in zahlreichen Untersuchungen der Zusammenhang zwischen dem erhöhten Füllstoffgehalt in Nano-Kompositen und einer verringerten Polymerisationsschrumpfung gegenüber herkömmlichen Kompositen – dieses setzt die Gefahr von Randspaltbildungen weiter herab – belegt werden [2; 67].

Eine wesentliche Weiterentwicklung soll auch die verbesserte Hochglanzpolierbarkeit dieser Füllungswerkstoffe darstellen. Bereits 1969 befassten sich A. Berlage und R. Marxkors mit der Entstehung der Hochglanzpolitur auf dentalen Kunststoffen. Zwei Ansichten standen sich derzeit nach W. Burkart im Wesentlichen gegenüber. Nach der einen Meinung bestand zwischen Schleifen und Polieren kein grundsätzlicher, sondern nur ein gradueller Unterschied. Der anderen These zufolge wurden beim Polieren keine Substanz mehr abgetragen, sondern feinste Grate durch die Poliertemperatur erweicht und durch den Druck der Polierbürste seitlich in die entsprechenden Rauigkeiten gedrückt.

Aus verschiedenen Experimenten wurde letztendlich gefolgert, dass es sich bei der Erzeugung der Hochglanzpolitur um ein Abtragen von Substanzen in kleinsten Dimensionen handelt und nicht um eine seitliche Werkstoffverschiebung, wie damals weitläufig angenommen. Vielmehr konnten die unterschiedlichen Versuchsreihen zeigen, dass Verschiebungen in der oberflächlichen Schicht von dentalen Kunststoffproben nicht zum Hochglanz führten, sondern gegenteilig eine Aufräuhung hochglänzender Flächen bewirkten [7].

Die direkte Auswirkung von Polituren auf den messbaren Glanz von Kompositen wurde bisher aber nur vereinzelt überprüft [16; 79]. Dennoch werben viele Hersteller

dentaler Komposite mit der Hochglanzpolierbarkeit ihrer Restaurationswerkstoffe, obwohl klinisch auffallende Unterschiede in der Qualität der Politur unter ähnlichen Bedingungen festzustellen sind.

6.2.2 Klinische Relevanz

Der Glanz wird in der Literatur als materialabhängige Eigenschaft beschrieben [14], welche durch die Oberflächenbeschaffenheit eines Objektes und ihr Reflexionsvermögen wesentlich beeinflusst wird [12]. Er kommt besonders im sichtbaren Frontzahnbereich zum Tragen, wenn möglichst dauerhaft natürlich aussehende Restaurationen gestaltet werden sollen. Weniger als das äußere Erscheinungsbild sind im Seitenzahnbereich physikalische Eigenschaften wie Druckfestigkeit und Abrasionsresistenz entscheidend. Dennoch muss auch hier die Polierbarkeit berücksichtigt werden, da raue Kompositoberflächen die Plaqueanlagerung beschleunigen, was wiederum die Entstehung von Karies sowie Gingivitis begünstigt. So kam eine In-vitro-Studie, die sich mit der Oberflächenwirkung von Prophylaxepasten befasste, zu dem Ergebnis, dass die Anwendung der meisten Pasten zu einer Aufrauung von polierten Kompositflächen führte [9].

In der vorliegenden Untersuchung wurde der Parameter „Glanz“ zur Beurteilung der Wirkung einer standardisierten Poliermethode auf die Oberfläche von 8 Nano-(Hybrid-)Kompositen gewählt. Die Messung des Glanzes erfolgte dabei mit Hilfe eines Reflektometers, welches das von einer Oberfläche reflektierte Licht in einem durch Blenden eingegrenzten Winkelbereich in seiner Intensität erfasste. Um eine bessere Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Komposite zu ermöglichen, wurde das Messergebnis als Reflektometerwert in Glanzeinheiten (GE) angegeben. Eine rein visuelle Oberflächenprüfung und subjektive Bewertung des Glanzgrades wäre nur unzureichend möglich gewesen, da jeder Betrachter ein anderes Sehvermögen aufweist und Sinneseindrücke unterschiedlich interpretiert [84]. Neben dem

Glanzvergleich der verschiedenen Nano-Komposite interessierte aber auch, ob und inwieweit die Poliermethode in der Lage war, die bereits durch die Probenherstellung bedingt glatte Oberfläche noch weiter zu optimieren.

6.2.3 Glanz in Abhängigkeit von der Füllkörpergröße

Aus dieser Untersuchung geht eindeutig hervor, dass die Kompositproben nach standardisierter Bearbeitung erhebliche Glanzunterschiede aufweisen. So hat das einzige in dieser Studie untersuchte reine Nano-Komposit mit Abstand das höchste Glanzergebnis nach der Politur. Dagegen misst man bei Nano-Hybrid-Kompositen mit Zusatz von Glasfüllern deutlich niedrigere Glanzeinheiten. Generell zeigen Komposite mit größeren Füllkörpern eine stärkere Oberflächenrauigkeit nach der Bearbeitung [94] und folglich ein schlechteres Glanzergebnis [69].

Neben der Art der verwendeten Füllkörper und ihrer Partikelgröße nehmen weitere Faktoren, wie beispielsweise ihre Anordnung in der Kompositmatrix – v. a. nach der Probenbearbeitung –, der Füllkörpergehalt, die Matrixzusammensetzung und die materialabhängigen Reflexionseigenschaften Einfluss auf das Glanzergebnis. Nähere Untersuchungen zu diesen und weiteren Parametern, die den Glanz beeinflussen könnten, stehen aber noch aus.

Die Zugabe von Nanofüllern zur Matrix führt nicht zwangsläufig zur besseren Polierbarkeit gegenüber herkömmlichen Kompositen, wie ein Vergleich mit der Studie von M. Wefelmeier belegt [127]. So zeigen das Mikrofüller-Komposit EcuSphere[®]-Shine (DMG) und das Sub-Mikrofüller-Komposit Estelite[®] Sigma (Tokuyama) unter denselben Polierbedingungen und bei Verwendung der gleichen Messgeometrie höhere Glanzwerte als alle hier untersuchten Nano-Hybrid-Komposite. Die im Mittel höheren Glanzwerte im Vergleich zum Nano-Hybrid-Komposit können ebenfalls durch die kleineren Füllkörper in den Mikrofüller-Kompositen erklärt werden, die bei der Bearbeitung weniger stark aus der Matrix ausbrechen als größere Partikel. Dieses Verhalten in Abhängigkeit von der

Füllkörpergröße konnte auch durch ähnliche Abrasionstests bestätigt werden [9]. Nur das reine Nano-Komposit Filtek™ Supreme XT Universal (3M ESPE AG) war allen dort untersuchten Hybrid-, Submikron-Hybrid-, Mikrofüller- und Feinstpartikel-Hybrid-Kompositen überlegen. Dennoch stimmte auch hier der gemessene Glanzgrad nicht immer mit der subjektiven Glanzwahrnehmung überein. Einzig bei dem reinen Nano-Komposit Filtek™ Supreme XT Universal C3B konnte nach statistischer Analyse kein signifikanter Unterschied beim Vergleich der Glanzwerte vor und nach Bearbeitung festgestellt werden.

Des Weiteren konnte sowohl durch die Vorversuche als auch durch die Hauptuntersuchungen gezeigt werden, dass die zusätzliche Bearbeitung der Proben zu keiner weiteren Glättung der Kompositoberflächen führte. Dieses Verhalten wurde auch in ähnlichen Studien bestätigt, in denen Kompositproben gegen lichtdurchlässige Mylar-Matrizenbänder gepresst und ausgehärtet wurden. Die sich anschließenden Oberflächenvermessungen mit Hilfe von Profilometern ergaben, dass jede weitere Bearbeitung bzw. Politur lediglich zur Vergrößerung der Oberflächenrauigkeit führte [3; 5; 39; 60; 94; 112; 116; 128; 134].

Die generell hohen und vergleichbaren Glanzwerte aller Komposite unmittelbar nach Probenherstellung könnten darin begründet sein, dass der plastische Materialzustand während des Pressvorgangs die Einlagerung der groben Füllpartikel in die Kunststoffmatrix ermöglicht. Die so erzeugten Probenoberflächen entsprechen nach der Polymerisation der planparallelen Pressfläche des Glases und weisen folglich ähnliche Oberflächenrauigkeiten auf. So konnte auch in dieser Untersuchung keine glattere Probenoberfläche als durch das Pressen des Komposits gegen eine planparallele Fläche erzeugt werden.

7 Zusammenfassung

Der Glanz ist ein wichtiger Parameter zur Beurteilung einer Füllungsoberfläche und trägt somit wesentlich zu seinem äußeren Erscheinungsbild bei. Nur wenn es gelingt, eine Restauration farblich und glanztechnisch unauffällig in eine Kavität einzufügen – dies gilt vor allem für den Frontzahnbereich –, kann die optische Wirkung eines natürlichen Zahnes nachgeahmt werden. Laut Herstellerangaben verfügen viele Nano-Komposite über eine bessere Polierbarkeit gegenüber herkömmlichen Kompositen; klinisch sind jedoch auffallende Unterschiede in der Qualität unter ähnlichen Polierbedingungen festzustellen. Daher war es Ziel dieser Untersuchung, den Glanz von 8 auf dem deutschen Markt erhältlichen Nano-(Hybrid-)Kompositen, nach Bearbeitung mit einer zuvor festgelegten Poliermethode, zu ermitteln und zu vergleichen. Zur quantitativen Bestimmung dieser Eigenschaft wurde ein Reflektometer verwendet, welches die Oberflächenreflexion in drei unterschiedlichen Messwinkeln erfasst und das Ergebnis als so genannten Reflektometerwert in Glanzeinheiten (GE) wiedergibt. Mit Ausnahme des einzigen reinen Nano-Komposits wiesen alle übrigen getesteten Nano-Hybrid-Komposite nach der Politur signifikante Unterschiede ihrer Glanzwerte auf.

Zusammenfassend kann man sagen, dass die alleinige Zugabe von Nanofüllern zur Kompositmatrix nicht zwangsläufig zu einer besseren Polierbarkeit gegenüber herkömmlichen Kompositen führt, da weitere Faktoren, wie beispielsweise der Füllergehalt, die Art der übrigen enthaltenen Füllkörper und ihre Partikelgrößen, ebenfalls Einfluss auf das Polierergebnis und folglich auf den Glanz haben.

8 Literaturverzeichnis

1. Ashby M.F., Jones D.R.H. (1980) Engineering materials: An introduction to their properties and applications. Pergamon Press, Frankfurt
2. Atai M., Watts D.C. (2006) A new kinetic model for the photopolymerization shrinkage-strain of dental composites and resin-monomers. *Dent Mater* 22 (8): 785-791
3. Barbosa S.H., Zanata R.L., Navarro M.F., Nunes O.B. (2005) Effect of different finishing and polishing techniques on the surface roughness of microfilled, hybrid and packable composite resins. *Braz Dent J* 16 (1): 39-44
4. Bartel S., Thompson J.Y. (2003) *Farben im Webdesign: Symbolik, Farbpsychologie, Gestaltung*. 1. Aufl., Springer Verlag, Heidelberg
5. Baseren M. (2004) Surface roughness of nanofill and nanohybrid composite resin and ormocer-based tooth-colored restorative materials after several finishing and polishing procedures. *J Biomater Appl* 19 (2):121–134
6. Bayne S.C., Swift E.J. Jr., Stamatiades P., Wilkerson M. (1998) A characterization of first-generation flowable composites. *J Am Dent Assoc* 129 (5): 567-577
7. Berlage A., Marxkors R. (1969) Die Entstehung der Hochglanzpolitur auf dentalen Kunststoffen. *Dtsch Zahnärztl Z* 24 (7): 609-613
8. Boer W.-M. (1998) Überblick über Möglichkeiten der ästhetischen Zahnheilkunde mit direkten Kompositfüllungen. *Quintessenz* 49: 871-881
9. Bose M., Ott K.H.R. (1996) Abrieb, Aufrauung und Glättung von Kompositen durch Prophylaxepasten in vitro. *Dtsch Zahnärztl Z* 51 (11): 690-693
10. Bowen R.L. (1962) Dental filling materials comprising vinyl silane treated fused silica and a binder consisting of the reaction product of bisphenol and glycidyl acrylate. US Pat Off: 3066112
11. Bowen R.L. (1963) Properties of a silica-reinforced polymer for dental restorations. *J Am Dent Assoc* 66: 57-64
12. Braun D. (2003) *Kunststofftechnik für Einsteiger*. 1. Aufl., Hanser Fachbuchverlag, München

13. Bundesverband des Deutschen Flachglas-Großhandels e.V. (1983) Glasfibel. Druckerei und Verlag Locher GmbH, Köln
14. Bungartz H.-J., Griebel M., Zenger C. (2002) Einführung in die Computergrafik. 2. Aufl., Vieweg + Teubner, Wiesbaden
15. Buonocore M.G. (1955) A simple method of increasing the adhesion of acrylic filling materials to enamel surfaces. *J Dent Res* 34 (6): 849-853
16. Campbell P.M., Johnston W.M., O'Brien W.J. (1986) Light scattering and gloss of an experimental quartz-filled composite. *J Dental Res* 65 (6): 892-894
17. Danesh G., Davids H., Dammaschke T., Reinhardt K.-J., Ott K.H.R. (2001) Werkstoffeigenschaften verschiedener Komposite nach Plasma- und Halogenlichtpolymerisation. *Dtsch Zahnärztl Z* 56: 161-166
18. Deutsches Institut für Normung (2001) EN ISO 4049:2000. Füllungs-, restaurative und Befestigungskunststoffe. Beuth-Vertrieb GmbH, Berlin
19. Dietschi D., Campanile G., Holz J., Meyer J.M. (1994) Comparison of the color stability of ten new-generation composites: an in vitro study. *Dent Mater* 10: 353-362
20. Dunn W.J., Bush A.C. (2002) A comparison of polymerization by light-emitting diode and halogen-based light-curing units. *J Am Dent Assoc* 133 (3): 335-341
21. Eick J.D., Robinson S.J., Byerley T.J., Chappelow C.C. (1993) Adhesives and nonshrinking dental resins of the future. *Quintessence Int* 24 (9): 632-640
22. Ernst C.P., Schauer F., Willershausen B., Hickel R. (1996) Leistungsvergleich von Lichtpolymerisationsgeräten (I). *Acta Med Dent Helv* 1: 58-62
23. Ernst C.P., Willershausen B. (2003) Eine aktuelle Standortbestimmung zahnärztlicher Füllungskomposite. *Zahnärztl Mitt* 7: 30-42
24. Ernst C.P., Brandenbusch M., Canbek K., Meyer G.R., Fiedler T., Gottschalk F., Willershausen B. (2003) Nanofüller- und Feinstpartikel-Hybridkomposit im klinischen Vergleich. *Dental Praxis* 11: 327-335
25. Ernst C.P., Meyer G.R., Müller J., Willershausen B. (2004) Depth of cure of LED vs QTH light-curing devices at a distance of 7 mm. *J Adhes Dent* 6 (2): 141-150
26. Feilzer A.J., de Gee A.J., Davidson C.L. (1987) Setting stress in composite resin in relation to configuration of the restoration. *J Dent Res* 66 (11): 1636-1639

27. Feilzer A.J., Doreen L.H., de Gee A.J., Davidson C.L. (1995) Influence of light intensity on polymerization shrinkage and integrity of restoration-cavity interface. *Eur J Oral Sci* 103 (5): 322-326
28. Gagliani M., Fadini L., Ritzmann J.M. (2002) Depth of cure efficacy of high-power curing devices vs traditional halogen lamps. *J Adhes Dent* 4 (1): 41-47
29. Garoushi S., Vallittu P.K., Watts D.C., Lassila L.V. (2007) Effect of nanofiller fractions and temperature on polymerization shrinkage on glass fiber reinforced filling material. *Dent Mater* 24 (5): 606-610
30. Gedik R., Hürmüzlü F., Coşkun A., Bektaş Ö.Ö., Özdemir A.K. (2005) Surface roughness of new microhybrid resin-based composites. *J Am Dent Assoc* 136: 1106-1112
31. Geurtsen W. (1999) *Kariologie und Füllungstherapie*. Urban & Schwarzenberg, München, 4. Aufl.: 177-218
32. Geurtsen W. (1989) *Kunststofffüllung*. In: Heidemann D. (Hrsg) *Klinik der Kompositfüllung*. Hanser Fachbuchverlag, München
33. Grellmann W., Seidler S. (2005) *Kunststoffprüfung*. 1. Aufl., Hanser Fachbuchverlag, München
34. Heinzlreiter P. (2001) *Grundlagen der atmosphärischen Optik*. Phys Diss, Berlin
35. Hellwig E., Klimek J., Achenbach K. (1991) Die Auswirkungen der Schichttechnik auf die Polymerisation von zwei lichthärtenden Komposit-Füllungsmaterialien. *Dtsch Zahnärztl Z* 46: 270-273
36. Hellwig E., Klimek J., Attin T. (1995) *Einführung in die Zahnerhaltung*. Urban & Schwarzenberg, München
37. Hellwig E., Klimek J., Attin T. (1999) *Restauration mit plastischen Füllungsmaterialien*. In: *Einführung in die Zahnerhaltung*. Urban & Fischer, München
38. Henning A.C., Helbig E.B., Haufe E., Richter G., Klimm H.W. (2004) Die Versorgung von Klasse-V-Kavitäten mit dem Ormocer-basierenden Füllungssystem Admira. *Schweiz Monatsschr Zahnmed* 114: 104-114
39. Herrgott A.-M.L., Ziemiecki T.L., Dennison J.B. (1989) An evaluation of different composite resin systems finished with various abrasives. *J Am Dent Assoc* 119 (6): 729-732

40. Hickel R., Dasch W., Janda R., Tyas M. (1998) New direct restorative materials. FDI Commission Project. *Int Dent J* 48 (1): 3-16
41. Hilschmann S. (1998) Experimentelle Untersuchung der Aussagekraft rasterelektronenmikroskopischer Aufnahmen von Kompositen auf ihrer Biegefestigkeit und E-Modul. Zahnmed Diss, Berlin
42. Hofmann H., Spindler J. (2004) Verfahren der Oberflächentechnik. 1 Aufl., Hanser Fachbuchverlag, München
43. Janda R. (1988) Der Stand der Entwicklung auf dem Gebiet der Zahnfüllungskunststoffe (I). *Quintessenz* 6: 1067-1073
44. Janda R. (1988) Der Stand der Entwicklung auf dem Gebiet der Zahnfüllungskunststoffe (II). *Quintessenz* 7: 1243-1253
45. Janda R. (1988) Der Stand der Entwicklung auf dem Gebiet der Zahnfüllungskunststoffe (III). *Quintessenz* 7: 1393-1398
46. Janda R. (1989) Kunststoffverbundsysteme: Grundlagen, Anwendung, Verarbeitung, Prüfung. Wiley-VCH, Weinheim
47. Janda R. (1992) Polymere Materialien für adhäsive prophylaktische und restaurative Maßnahmen. *Zahnärztl Welt* 101: 498-506
48. Janda R. (1994) Amalgamalternativen. Teil 1: Materialien für direkte Füllungen. *Der Hess Zahnarzt* 33: 515-522
49. Janda R. (1996) Chemie und Physik zahnärztlicher Kunststoffe. In: Kappert H.F., Eichner K. (Hrsg) *Zahnärztliche Werkstoffe und ihre Verarbeitung*. Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 5. Aufl., Bd 1: 173-210
50. Jandt K.D., Mills R.W., Blackwell G.B., Asworth S.H. (2000) Depth of cure and compressive strength of dental composites cured with blue light emitting diodes (LEDs). *Dent Mater* 16 (1): 41-47
51. Johnson L.N., Jordan R.E., Lynn J.A. (1971) Effects of various finishing devices on resin surfaces. *J Am Dent Assoc* 83 (2): 321-331
52. Joniot S., Solomon J.P., Dejon G., Grégoire G. (2006) Use of two surface analyzers to evaluate the surface roughness of four esthetic restorative materials after polishing. *Oper Dent* 31 (1): 39-46
53. Kaden U. (2001) Der Einfluss zweier verschiedener Poliersysteme auf Oberflächenrauigkeit und Randqualität von Black-Klasse-V-Füllungen aus Komposit- und Kompomermaterialien in vitro. Zahnmed Diss, Berlin

54. Kemp-Scholte C.M., Davidson C.L. (1990) Complete marginal seal of Class V resin composite restorations effected by increased flexibility. *J Dent Res* 69 (6): 1240-1243
55. Kimmel K. (1999) Optimale Lichtpolymerisation als wichtiges Kriterium der Füllungsqualität. *Dental Spiegel* 18: 39-42
56. Kipphan H. (2000) *Handbuch der Printmedien. Technologien und Produktionsverfahren*. 1. Aufl., Springer, Heidelberg
57. Klein G.A. (2004) *Farbenphysik für industrielle Anwendungen*. 1. Aufl., Springer, Heidelberg
58. Knauer R. (2002) *Entwerfen und Darstellen*. 2. Aufl., Ernst & Sohn, Berlin
59. Koran P., Kürschner R. (1997) Stress reduction in composites due to two-step-polymerization. *J Dent Res* 76: 313
60. Korkmaz Y., Ozel E., Attar N., Aksoy G. (2008) The influence of one-step polishing systems on the surface roughness and microhardness of nanocomposites. *Oper Dent* 33 (1): 44-50
61. Körber K., Ludwig K. (1993) *Zahnärztliche Werkstoffkunde und Technologie*. Georg Thieme Verlag, Stuttgart
62. Kullmann W. (1990) *Atlas der Zahnerhaltung mit Glas-Ionomer-Zementen und Komposit-Kunststoffen*. Hanser Fachbuchverlag, München
63. Kullmann W., Pötters G. (1984) Vergleichende Untersuchungen zum thermischen Expansionskoeffizienten an 50 verschiedenen Kunststoff-Füllungsmaterialien. *Dtsch Zahnärztl Z* 39: 96-100
64. Kunzelmann K.-H. (2008) Aufbau der Kompositfüllungswerkstoffe. In: Kappert H.F., Eichner K. (Hrsg) *Zahnärztliche Werkstoffe und ihre Verarbeitung*. Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 6. Aufl., Bd 2: 203-241
65. Lambrechts P., Braem M., Vanherle G. (1987) Buonocore memorial lecture. Evaluation of clinical performance for posterior composite resins and dentin adhesives. *Oper Dent* 12 (2): 53-78
66. Lösche G.M., Eisele T., Roulet J.-F. (1996) Einfluß der Zwei-Schicht-Füllungstechnik auf das Randverhalten von Klasse-IV-Füllungen in vitro. *Dtsch Zahnärztl Z* 51: 620-622
67. Lutz F., Phillips R.W. (1983) A classification and evaluation of composite resin systems. *J Prosthet Dent* 50 (4): 480-488

68. Lu H., Lee Y.K., Oguri M., Powers J.M. (2006) Properties of a dental resin composite with a spherical inorganic filler. *Oper Dent* 31 (6):734-740
69. Lu H., Roeder L.B., Lei L., Powers J.M. (2005) Effect of surface roughness on stain resistance of dental resin composites. *J Esthet Restor Dent* 17 (2):102-109
70. Manhart J., Chen H.Y., Hamm G., Hickel R. (2004) Review of the clinical survival of direct and indirect restorations in posterior teeth of the permanent dentition. *Oper Dent* 29: 481-508
71. Marxkors R., Meiners H. (1993) Taschenbuch der zahnärztlichen Werkstoffkunde. 4. Aufl., Hanser Fachbuchverlag, München
72. Mehl A., Hickel R., Kunzelmann K.-H. (1997) Physical properties and gap formation of light-cured composites with and without 'softstart-polymerization'. *J Dent* 25 (3-4): 321-330
73. Mehl A., Sobota M., Hickel R. (1997) Softstartpolymerisation von Kompositen in Klasse-V-Kavitäten. *Dtsch Zahnärztl Z* 52: 824-827
74. Mütze K., Foitzik L., Krug W., Schreiber G. (1961) ABC der Optik. Bd. 1, Werner Dausien, Hanau/Main
75. Nakayama W.T., Hall D.R., Grenoble D.E., Katz J.L. (1974) Elastic properties of dental resin restorative materials. *J Dent Res* 53 (5): 1121-1126
76. Newesely H., Janda R. (1987) Zemente, Composites, Adhäsive und Kleber. In: Voß R., Meiners H. (Hrsg) Fortschritte in der zahnärztlichen Prothetik und Werkstoffkunde. Hanser Fachbuchverlag, München, Bd. 2: 283-303
77. Newesely H., Janda R. (1981) Zemente, Composites, Adhäsive und Kleber. In: Voß R., Meiners H. (Hrsg) Fortschritte in der zahnärztlichen Prothetik und Werkstoffkunde. Hanser Fachbuchverlag, München, Bd. 1: 292-411
78. Noppen G., Sigalla J. (1985) Oberflächenbeschaffenheit. In: Deutsches Institut für Normung e.V.: Technische Oberflächen. 1. Aufl., Beuth Verlag GmbH, Berlin
79. O'Brien W.J., Johnston W.M., Fanian F., Lambert S. (1984) The surface roughness and gloss of composites. *J Dent Res* 63 (5): 685-688
80. Oberbach K., Pabst F., Saechtling H. (2004) Kunststoff-Taschenbuch. 29. Ausgabe, Hanser Fachbuchverlag, München

81. Paffenbarger G.C., Nelsen R.J., Sweeney W.T. (1953) Direct and indirect filling resins: a review of some physical and chemical properties. *J Am Dent Assoc* 47 (5): 516-524
82. Perez J.-P. (1996) *Optik*. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg
83. Peutzfeldt A., Asmussen E. (1997) Composite resins in dentistry: the monomer systems. *Eur J Oral Sci* 105: 97-116
84. Pietschmann J. (2004) *Industrielle Pulverbeschichtung. Grundlagen, Anwendungen, Verfahren*. 2. Aufl., Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden
85. Quance S.C., Shortall S.C. (2001) Effect of exposure intensity and post-cure temperature storage on hardness of contemporary photo-activated composites. *J Dent* 29 (8): 553-560
86. Reeves G.W., Fitchi J.G., Scarbrough A.R., Hembree J.H. (1995) Microleakage of new dentin bonding systems using human and bovine teeth. *Oper Dent* 20 (6): 230-235
87. Reinhardt K.J. (1991) Restdoppelbindungen und Grenzflächeneffekt von Kunststoffmaterialien. *Dtsch Zahnärztl Z* 46: 204-208
88. Roulet J.-F. (1988) Werkstoffkundliche Parameter und ihre Auswirkungen auf die Klinik. *Dtsch Zahnärztl Z* 43: 887-892
89. Roulet J.-F. (1987) *Degradation of dental polymers*. S. Karger AG, Basel
90. Roulet J.-F. (1984) Zahnfarbene Restaurationen als Amalgam-Alternativen. *Dtsch Zahnärztl Z* 49 (11): 859-866
91. Roulet J.-F., Blunck U. (1996) Probleme und Lösungsansätze der Adhäsivtechnik im Seitenzahnbereich. *Neue Gruppe* 9: 10-13
92. Rueggeberg F.A., Caughman W.F., Curtis J.W. Jr. (1994) Effect of light intensity and exposure duration on cure of resin composite. *Oper Dent* 19 (1): 26-32
93. Ruyter I.E. (1988) Composites – Characterization of composite filling materials: reactor response. *Adv Dent Res* 2 (1): 122-129
94. Sarac D., Sarac Y.S., Kulunk S., Ural C., Kulunk T. (2006) The effect of polishing techniques on the surface roughness and color change of composite resins. *J Prosthet Dent* 96 (1): 33-40

95. Schuckar M., Geurtsen W. (1995) Die approximal-zervikale Randdichte von Klasse-II-Kompositfüllungen nach Temperaturwechselbelastung. Dtsch Zahnärztl Z 50: 164-166
96. Schwickerath H. (1982) Der Einfluß auf Steifigkeit und Härte der Composites auf Füllungsrand und Füllungsoberfläche: Füllungswerkstoffe auf Kunststoffbasis. Bayer Dental, Leverkusen
97. Schwickerath H., Nolden R. (1982) Der Einfluß des E-Moduls von Füllungswerkstoffen auf den Randspalt unter Dauerbeanspruchung. Dtsch Zahnärztl Z 37: 442-444
98. Sharkey S., Ray N., Burke F., Ziada H. (2001) Surface hardness of light-activated resin composites cured by two different visible-light sources: an in vitro study. Quintessence Int 32 (5): 401-405
99. Shey Z., Oppenheim M. (1979) A clinical evaluation of a radiopaque material in the restoration of anterior and posterior teeth. J Am Dent Assoc 98 (4): 569-571
100. Sidhu S.K., Henderson L.J. (1992) Dentin adhesives and microleakage in cervical resin composites. Am J Dent 5 (5): 240-244
101. Soltész U., Weidemann A., Klaiber B. (1998) Polymerisationsschrumpfung einiger neuer Komposit-Füllungswerkstoffe. Zahnärztl Mitt 89: 1404-1406
102. Soltész U. (1986) Festigkeit von Füllungsmaterialien nach Temperaturwechselbeanspruchung. Quintessenz 37: 1261-1267
103. Spahl W. (1995) Analyse zahnmedizinischer Komposite auf extrahierbare Restmonomere und Additive mit Hilfe der Gaschromatographie/ Massenspektrometrie und der Hochleistungsflüssigkeitschromatographie/ Massenspektrometrie. Chem Diss, Köln
104. Sperber K.-H. (2004) ArchiCAD. 2. Aufl., Addison-Wesley, München
105. Stansbury J.W. (1992) Synthesis and evaluation of new oxaspiro monomers for double ring-opening polymerization. J Dent Res 71 (7): 1408-1412
106. Stansbury J.W. (1990) Cyclopolymerizable monomers for use in dental resin composites. J Dent Res 69 (3): 844-848
107. Stoll R., Remes H., Kunzelmann K.-H., Stachniss V. (2000) Marginal characteristics of different filling materials and filling methods with standardized cavity preparation. J Adhes Dent 2 (2): 129-138

108. Strydom C. (2002) Curing lights - the effects of clinical factors on intensity and polymerisation. *SADJ* 57 (5): 181-186
109. Swift E.J. Jr., Triollo P.T. Jr., Barkmeier W.W., Bird J.L., Bounds S.J. (1996) Effect of low-viscosity resins on the performance of dental adhesives. *Am J Dent* 9 (3): 100-104
110. Turssi C.P., Ferrance J.L., Ferrance L.L. (2006) Wear and fatigue behaviour of nano-structured dental resin composite. *J Biomed Mater Res B Appl Biomater* 78 (1): 196-203
111. Turssi C.P., Ferracane J.L., Serra M.C. (2005) Abrasive wear of resin composites as related to finishing and polishing procedures. *Dent Mater* 21 (7): 641-8
112. Türkün L.S., Türkün M. (2004) The effect of one-step polishing system on the surface roughness of three esthetic resin composite materials. *Oper Dent* 29 (2): 203-211
113. Uhl A., Mills R.W., Vowles R.W., Jandt K.D. (2002) Knoop hardness depth profiles and compressive strength of selected dental composites polymerized with halogen and LED light curing technologies. *J Biomed Mater Res* 63 (6): 729-738
114. Uno S., Finger W.J. (1995) Function of the hybrid zone as a stress-absorbing layer in resin-dentin bonding. *Quintessence Int* 26 (10): 733-738
115. Unterbrink G.L., Liebenberg W.H. (1999) Flowable resin composites as "filled adhesives": literature review and clinical recommendations. *Quintessence Int* 30 (4): 249-257
116. Üçtaslı M.B., Bala O., Güllü A. (2004) Surface roughness of flowable and packable composite resin materials after finishing with abrasive discs. *J Oral Rehabil* 31 (12): 1197-1202
117. Van Meerbeek B., Perdigão J., Lambrechts P., Vanherle G. (1998) The clinical performance of adhesives. *J Dent* 26 (1): 1-20
118. Venhoven B.A., de Gee A.J., Davidson C.L. (1996) Light initiation of dental resins: dynamics of the polymerization. *Biomater* 17 (42): 2313-2318
119. Viohl J. (1985) Kunststoff-Füllungswerkstoffe. In: Kappert H.F., Eichner K. (Hrsg) *Zahnärztliche Werkstoffe und ihre Verarbeitung*. 5. Aufl., Bd 2: 135-171

120. Viohl J. (1982) Spezifikationsprüfungen für Kunststofffüllungswerkstoffe. In: Technisch wissenschaftliche Abteilung des Bereichs für biomedizinische Materialien und Dental (Hrsg) Füllungswerkstoffe auf Kunststoffbasis. Bayer Dental, Leverkusen
121. Viohl J., Dermann K., Quast D. (1986) Die Chemie zahnärztlicher Füllungskunststoffe. Hanser Fachbuchverlag, München
122. Völz H.G. (2001) Industrielle Farbprüfung: Grundlagen und Methoden. 2. Aufl., Wiley-VCH, Weinheim
123. Watanabe H., Khera S.C., Vargas M.A., Qian F. (2008) Fracture toughness comparison of six resin composites. Dent Mater 24 (3): 418-425
124. Watts D.C. (1987) Characterization of aluminium radiopacity standards for restorative materials. J Dent 15 (4): 175-177
125. Watts D.C. (1987) Radiopacity vs. composition of some barium and strontium glass composites. J Dent 15 (1): 38-43
126. Weeber J. (2004) Vergleichende werkstoffwissenschaftliche Untersuchung zweier handelsüblicher Hybridkomposite, zweier Kompomere und zweier Ormocere. Zahnmed Diss, Berlin
127. Wefelmeier M. (2009) Polierbarkeit dentaler Komposite in Abhängigkeit vom Glanz. Med Diss, Münster
128. Welsch N., Liebmann C.C. (2004) Farben: Natur, Technik, Kunst. 2. Aufl., Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg
129. Wilder A.D., Swift E.J., May K.N., Thompson J.Y., McDougal R.A. (2000) Effect of finishing technique on the microleakage and surface texture of resin-modified glass ionomer restorative materials. J Dent 28 (5): 367-373
130. Willems G., Lambrechts P., Braem M., Celis J.P. (1992) A classification of dental composites according to their morphological and mechanical characteristics. Dent Mater 8 (5): 310-319
131. Willems G., Lambrechts P., Braem M., Vanherle G. (1993) Composite resins in the 21st century. Quintessence Int 24 (9): 641-658
132. Wirz J., Jungo M., Schmiedli F. (1996) Zahnärztliche Materialien und Werkstoffe auf dem Prüfstand. Quintessenz 6: 837-846
133. Xia Y., Zhang F., Xie H., Gu N. (2008) Nanoparticle-reinforced resin-based dental composites. J Dent 36 (6): 450-455.

134. Yap A.U., Yap S.H., Too C.K., Ng J.J. (2004) Finishing/polishing of composite and compomer restoratives: Effectiveness of one-step systems. *Oper Dent* 29 (3):275–279

9 Verzeichnis der im Text verwendeten Abbildungen

Abbildung 1: Prinzip der Reflexion.....	4
Abbildung 2: Glanzzweibel	5
Abbildung 3: Absorption.....	7
Abbildung 4: Messung der gerichteten Reflexion.....	13
Abbildung 5: Messgeometrien	14
Abbildung 6: Parallelpresse	36
Abbildung 7: Schleif- und Poliergerät SCANDIMATIC	38
Abbildung 8: Reflektometeranordnung nach DIN 67530	39
Abbildung 9: Anwendungsbereiche der Geometrien nach DIN 67530.....	40
Abbildung 10: Glanzwerte von Venus A2 vor und nach Bearbeitung mit den unterschiedlichen Polierpasten (Mittelwerte und Standardabweichungen)	43
Abbildung 11: Glanzwerte von Grandio A2 vor und nach Bearbeitung mit den unterschiedlichen Polierpasten (Mittelwerte und Standardabweichungen)	43
Abbildung 12: Glanzwerte von Venus A2 vor und nach Bearbeitung mit Cleanic in Minutenabständen (Mittelwerte und Standardabweichungen).....	44
Abbildung 13: Glanzwerte von Venus A2 vor und nach Bearbeitung mit Clean Polish in Minutenabständen (Mittelwerte und Standardabweichungen).....	45
Abbildung 14: Glanzwerte aus Vorversuchen mit Grandio bei der 60°-Geometrie (Mittelwerte und Standardabweichungen).....	47
Abbildung 15: Glanzwerte aus Vorversuchen mit Filtek Supreme bei der 60°-Geometrie (Mittelwerte und Standardabweichungen)	48
Abbildung 16: Micro-Tri-Gloss auf planer Oberfläche	51
Abbildung 17: Übersicht der Messwerte vor Politur bei 60°-Geometrie (A-Proben) ...	52
Abbildung 18: Messwerte vor Politur bei der 60°-Geometrie (Mittelwerte und Standardabweichungen).....	53
Abbildung 19: Messwerte vor Politur bei der 20°-Geometrie (Mittelwerte und Standardabweichungen).....	54

Abbildung 20: Messwerte vor Politur bei der 85°-Geometrie (Mittelwerte und Standardabweichungen).....	57
Abbildung 21: Übersicht der Messwerte nach Politur bei 60°-Geometrie (A-Proben)	58
Abbildung 22: Messwerte nach Politur bei der 60°-Geometrie (Mittelwerte und Standardabweichungen).....	59
Abbildung 23: Messwerte nach Politur bei der 20°-Geometrie (Mittelwerte und Standardabweichungen).....	60
Abbildung 24: Messwerte nach Politur bei der 85°-Geometrie (Mittelwerte und Standardabweichungen).....	62

10 Verzeichnis der im Text verwendeten Tabellen

Tabelle 1: Normierung	15
Tabelle 2: Einteilung der Komposite anhand der Füllkörpersysteme nach Kunzelmann [64]	20
Tabelle 3: Scheffé-Test für Glanzwerte vor Bearbeitung	64
Tabelle 4: Scheffé-Test für Glanzwerte nach Bearbeitung	65
Tabelle 5: t-Test für Glanzwerte vor und nach Bearbeitung	66
Tabelle 6: Messwerte vor Politur bei 20°Messwinkel (Mittelwerte und Standardabweichung)	VIII
Tabelle 7: Messwerte vor Politur bei 60°Messwinkel (Mittelwerte und Standardabweichungen)	X
Tabelle 8: Messwerte vor Politur bei 85°Messwinkel (Mittelwerte und Standardabweichungen)	XII
Tabelle 9: Messwerte nach Politur bei 20°Messwinkel (Mittelwerte und Standardabweichungen)	XIV
Tabelle 10: Messwerte nach Politur bei 60°Messwinkel (Mittelwerte und Standardabweichungen)	XVI
Tabelle 11: Messwerte nach Politur bei 85°Messwinkel (Mittelwerte und Standardabweichungen)	XVIII

11 Lebenslauf

12 Danksagung

Für die Überlassung des Themas und die freundliche Betreuung möchte ich mich zunächst ganz herzlich bei Prof. Dr. med. dent. K. Ott, Direktor der Poliklinik für Zahnerhaltung des Universitätsklinikums Münster, bedanken.

Des Weiteren bedanke ich mich auch bei Herrn OA Dr. Markus Kaup und Herrn Dr. Sven Duda für die Beantwortung theoretischer Fragen und Hilfestellung bei der praktischen Umsetzung.

Ebenfalls danke ich der MTA Helga Kleemann für ihre Anregungen und organisatorische Bemühungen während der Durchführung der Versuche. Vielen Dank auch den Firmen 3M ESPE, KerrHawe SA, Jeneric Pentron, Coltène Whaledent, Merz, VOCO und SDI, die uns freundlicherweise ihre Materialien zur Verfügung gestellt haben.

Auf diesem Wege möchte ich mich auch bei meinem Freund und Kollegen Herrn Michael Wefelmeier bedanken, der wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat. Die gute Zusammenarbeit hat mich sehr geehrt.

Mein ganz besonderer Dank gilt meiner Familie und meiner Freundin Geraldine für die Geduld, die Unterstützung und das mir entgegengebrachte Vertrauen. Ohne Euch wäre diese Arbeit nicht zustande gekommen.

Ferner bedanke ich mich bei meinen engsten Freunden und all denen, die hier namentlich nicht erwähnt wurden, für die Aufheiterung und stetige Motivation in schwierigen Zeiten.

Allen nochmals ein großes Dankeschön!

13 Anhang

13.1 Herstellernachweis

13.1.1 Probenmaterial

3M ESPE AG

ESPE Platz, 82229 Seefeld

Filtek™ Supreme XT Universal A2B, Order No.: 3910A2B

Filtek™ Supreme XT Universal C3B, Order No.: 3910C3B

Kerr Hawe SA

Via Strecce 4, 6934 Bioggio, Schweiz

PREMISE™ A2, Art.-Nr.: 32618

HKdent GmbH

(Jeneric/Pentron Deutschland GmbH)

Raiffeisenstr. 18, 72127 Kusterdingen

Simile® A2, Art.-Nr.:---

Simile® C2, Art.-Nr.: 134198

Artiste® Enamel A, Art.-Nr.: 154299

Coltène/Whaledent GmbH & Co. KG

Raiffeisenstr. 30, 89129 Langenau

Synergy D6[®] A2/B2, Art.-Nr.: 8367

Synergy D6[®] C2/C3, Art.-Nr.: 8370

Merz Dental GmbH

Eetzweg 20, 24321 Lütjenburg

NEPA[®] Fil A2, Charge: 5509988

VOCO GmbH

Anton-Flettner-Straße 1-3, 27472 Cuxhaven

Grandio[®] A2, Art.-Nr.: 1811

Grandio[®] C3, Art.-Nr.: 1818

Southern Dental Industries GmbH

Dieselstr. 12, 50859 Köln

ice[®] A2, Art.-Nr.: 8400002

ice[®] C3, Art.-Nr.: 8400012

13.1.2 Vermessen und Bearbeiten

BYK-Gardner GmbH

Lausitzerstr. 8, 82538 Geretsried

Messgerät zur Bestimmung von Glanz

- micro-TRI-gloss mit Köcherstandard
- Ser.nr.: 1022846, Kat.nr.: 4430
- Die Prüfung erfolgt durch Vergleichen des Prüflings mit geprüften Standards.
- Referenzinstrument: micro-TRI-gloss Ser.No. 1000049
- Referenzstandard: „BAM-Satz-Z“-Zeugnis Nr. S1E1638 vom 11.08.2005 von der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin
- Normen: DIN 67530, ISO 2813, ASTM D-523

Hans P. Tempelmann GmbH & Co KG

Lütkenheider Straße 11, 58030 Hagen

automatisches Poliergerät SCANDIMATIC

- einspindelrig, Ø 200 mm

Probenhalterarm mit Einlegering

- SCANDIMATIC Serie, Probenaufnahme Ø 32 mm

Gewichte

- SCANDIMATIC Serie, aus Edelstahl, 800 g

Trägerscheibe für Schleifpapiere

- SCANDIMATIC Serie, aus Polyethylen, Ø 200 mm

Struers GmbH

Karl-Arnold-Straße 13B, 47877 Willich

Poliermittel

- Siliziumkarbid-Nassschleifpapier (HV 30-400)
- für Trägerscheiben mit 200 mm Ø
- mit einer Körnung von 4000 Grit, entspricht 5 µm
- Art.-Nr.: 40400117

3M ESPE AG

ESPE Platz, 82229 Seefeld

Sof-Lex™ Ausarbeitungs- und Polierscheiben

- Flexible Polierscheiben mit Aluminiumoxid-Beschichtung
- zur Politur von Kompositen, Kompomeren, Metallen und Glasionomeren
- Körnungen: fein (3 - 9 µm), sehr fein (1 - 7 µm)
- Art.-Nr.: 1958 F, 1958 SF

Ivoclar Vivadent GmbH

Dr. Adolf-Schneider-Str. 2, 73479 Ellwangen (Jagst)

Universal Polierpaste

- zur Hochglanzpolitur von Kunststoff- und Metallarbeiten
- Art.-Nr.: 313-66847

primedis GmbH

Jagdweg 1 - 3, 01159 Dresden

Clean Polish®

- Fluoridfreie Zahnreinigungs- und Polierpaste zum Reinigen natürlicher Zähne sowie zum Vorpolieren von Gold-, Amalgam- und Kunststofffüllungen
- Art.-Nr.: 045360

Kerr Hawe SA

Via Strecce 4, 6934 Bioggio, Schweiz

Cleanic®

- Zahnreinigungs- und Polierpaste in einem, der Abrasivstoff (Silica/Naturkiesel) verwandelt sich unter Last von grob- zu feinkörnig, die Reinigungspaste wird während der Anwendung von selbst zur Polierpaste mit Glanzeffekt
- Art.-Nr.: 3140

13.2 Wertetabellen

13.2.1 Messwerte vor der Bearbeitung

Messwinkel	Kompositproben	n	Mean	Min	Max	StDev
20°	Filtek™ Supreme XT A2B 1	5	84,3	83,2	86,4	1,3
20°	Filtek™ Supreme XT A2B 2	5	87,7	87,2	88,8	0,6
20°	Filtek™ Supreme XT A2B 3	5	87,6	87,1	88,6	0,5
20°	Filtek™ Supreme XT A2B 4	5	87,1	86,7	87,4	0,3
20°	Filtek™ Supreme XT A2B 5	5	85,2	84,6	85,9	0,6
20°	Filtek™ Supreme XT C3B 1	5	87,3	86,9	87,7	0,3
20°	Filtek™ Supreme XT C3B 2	5	87,9	87,4	88,5	0,5
20°	Filtek™ Supreme XT C3B 3	5	86,9	86,4	87,2	0,3
20°	Filtek™ Supreme XT C3B 4	5	86,8	86,4	87,4	0,4
20°	Filtek™ Supreme XT C3B 5	5	86,9	86,0	87,5	0,5
20°	Premise™ A2 1	5	87,4	87,2	87,5	0,1
20°	Premise™ A2 2	5	85,2	82,4	86,3	1,5
20°	Premise™ A2 3	5	85,7	82,8	86,4	1,4
20°	Premise™ A2 4	5	87,2	86,8	87,4	0,2
20°	Premise™ A2 5	5	87,9	87,7	88,0	0,1
20°	Simile® A2 1	5	88,0	87,3	89,5	0,8
20°	Simile® A2 2	5	87,1	86,3	88,1	0,6
20°	Simile® A2 3	5	88,4	88,1	88,8	0,3
20°	Simile® A2 4	5	88,5	88,0	88,8	0,3
20°	Simile® A2 5	5	88,4	87,3	89,5	0,7
20°	Simile® C2 1	5	89,8	89,3	90,3	0,4
20°	Simile® C2 2	5	87,6	87,3	88,1	0,3
20°	Simile® C2 3	5	86,5	85,1	88,5	1,2
20°	Simile® C2 4	5	89,6	89,3	89,9	0,2
20°	Simile® C2 5	5	88,8	88,4	89,5	0,4
20°	Artiste® Enamel A 1	5	89,5	89,2	89,8	0,2

20°	Artiste® Enamel A 2	5	90,2	90,2	90,3	0,1
20°	Artiste® Enamel A 3	5	89,6	89,3	89,9	0,3
20°	Artiste® Enamel A 4	5	89,7	89,4	89,9	0,2
20°	Artiste® Enamel A 5	5	90,1	88,5	90,8	0,8
20°	Synergy D6® A2/B2 1	5	87,0	84,3	88,1	1,5
20°	Synergy D6® A2/B2 2	5	88,0	87,7	88,2	0,2
20°	Synergy D6® A2/B2 3	5	88,5	88,0	88,6	0,2
20°	Synergy D6® A2/B2 4	5	89,2	89,1	89,4	0,1
20°	Synergy D6® A2/B2 5	5	89,4	89,3	89,5	0,1
20°	Synergy D6® C2/C3 1	5	88,7	87,9	89,2	0,5
20°	Synergy D6® C2/C3 2	5	89,3	89,0	89,6	0,2
20°	Synergy D6® C2/C3 3	5	88,9	88,8	89,2	0,1
20°	Synergy D6® C2/C3 4	5	88,9	88,5	89,1	0,2
20°	Synergy D6® C2/C3 5	5	88,1	87,6	88,7	0,4
20°	Nepa® Fil A2 1	5	84,8	84,0	85,2	0,4
20°	Nepa® Fil A2 2	5	84,2	83,3	84,5	0,5
20°	Nepa® Fil A2 3	5	84,4	82,3	85,9	1,3
20°	Nepa® Fil A2 4	5	84,8	83,8	85,4	0,5
20°	Nepa® Fil A2 5	5	85,5	84,9	86,0	0,4
20°	Grandio® A2 1	5	81,1	77,1	83,6	2,3
20°	Grandio® A2 2	5	83,8	82,0	85,4	1,3
20°	Grandio® A2 3	5	84,1	82,5	85,8	1,0
20°	Grandio® A2 4	5	81,3	78,8	82,7	1,3
20°	Grandio® A2 5	5	81,0	78,9	82,1	1,2
20°	Grandio® C3 1	5	83,3	81,8	84,5	0,9
20°	Grandio® C3 2	5	77,1	73,1	80,5	2,8
20°	Grandio® C3 3	5	76,3	74,2	77,5	1,3
20°	Grandio® C3 4	5	72,6	64,2	76,4	4,4
20°	Grandio® C3 5	5	84,4	82,7	85,5	1,0
20°	ice® A2 1	5	91,4	91,3	91,5	0,1
20°	ice® A2 2	5	91,6	91,4	91,9	0,2
20°	ice® A2 3	5	91,3	91,0	91,4	0,1
20°	ice® A2 4	5	91,8	91,7	91,9	0,1
20°	ice® A2 5	5	91,3	91,0	91,6	0,2
20°	ice® C3 1	5	92,2	91,7	92,5	0,3

20°	ice® C3 2	5	91,4	91,2	91,7	0,2
20°	ice® C3 3	5	91,8	91,5	92,0	0,2
20°	ice® C3 4	5	91,7	91,4	91,8	0,1
20°	ice® C3 5	5	91,0	90,2	91,5	0,5

Tabelle 6: Messwerte vor Politur bei 20°Messwinkel (Mittelwerte und Standardabweichung)

Messwinkel	Kompositproben	n	Mean	Min	Max	StDev
60°	Filtek™ Supreme XT A2B 1	5	90,4	89,6	91,2	0,7
60°	Filtek™ Supreme XT A2B 2	5	92,2	91,3	92,8	0,5
60°	Filtek™ Supreme XT A2B 3	5	91,7	91,5	92,0	0,2
60°	Filtek™ Supreme XT A2B 4	5	91,4	90,9	91,9	0,3
60°	Filtek™ Supreme XT A2B 5	5	91,3	90,3	92,1	0,7
60°	Filtek™ Supreme XT C3B 1	5	91,3	90,9	91,6	0,2
60°	Filtek™ Supreme XT C3B 2	5	91,2	90,7	91,5	0,4
60°	Filtek™ Supreme XT C3B 3	5	92,5	92,3	92,7	0,1
60°	Filtek™ Supreme XT C3B 4	5	92,3	91,1	93,4	0,8
60°	Filtek™ Supreme XT C3B 5	5	91,3	90,9	91,8	0,3
60°	Premise™ A2 1	5	94,6	94,4	94,8	0,2
60°	Premise™ A2 2	5	93,3	92,7	93,7	0,4
60°	Premise™ A2 3	5	93,0	91,4	93,9	0,9
60°	Premise™ A2 4	5	94,1	93,6	94,4	0,3
60°	Premise™ A2 5	5	92,5	92,2	92,8	0,2
60°	Simile® A2 1	5	94,0	93,5	94,7	0,5
60°	Simile® A2 2	5	94,0	93,4	94,3	0,4
60°	Simile® A2 3	5	93,9	93,1	94,3	0,5
60°	Simile® A2 4	5	93,7	92,5	94,4	0,6
60°	Simile® A2 5	5	94,9	94,4	95,1	0,3
60°	Simile® C2 1	5	95,3	94,9	95,4	0,2
60°	Simile® C2 2	5	93,5	93,4	93,6	0,1
60°	Simile® C2 3	5	91,6	91,0	92,5	0,5
60°	Simile® C2 4	5	93,9	93,1	94,4	0,5

60°	Simile® C2 5	5	93,4	93,3	93,6	0,1
60°	Artiste® Enamel A 1	5	94,2	93,6	95,1	0,6
60°	Artiste® Enamel A 2	5	95,9	95,2	96,4	0,4
60°	Artiste® Enamel A 3	5	95,4	95,1	95,6	0,2
60°	Artiste® Enamel A 4	5	95,5	95,3	95,8	0,1
60°	Artiste® Enamel A 5	5	94,6	93,8	95,1	0,5
60°	Synergy D6® A2/B2 1	5	92,4	90,9	93,1	0,8
60°	Synergy D6® A2/B2 2	5	93,3	93,0	93,5	0,2
60°	Synergy D6® A2/B2 3	5	93,4	93,0	93,7	0,2
60°	Synergy D6® A2/B2 4	5	93,8	93,7	93,9	0,1
60°	Synergy D6® A2/B2 5	5	93,9	93,8	94,0	0,1
60°	Synergy D6® C2/C3 1	5	93,6	93,1	93,9	0,3
60°	Synergy D6® C2/C3 2	5	94,3	94,2	94,3	0,0
60°	Synergy D6® C2/C3 3	5	93,7	93,5	93,9	0,2
60°	Synergy D6® C2/C3 4	5	93,9	93,8	94,0	0,1
60°	Synergy D6® C2/C3 5	5	93,4	92,9	93,8	0,3
60°	Nepa® Fil A2 1	5	91,6	91,0	92,0	0,4
60°	Nepa® Fil A2 2	5	91,2	90,8	91,4	0,2
60°	Nepa® Fil A2 3	5	92,0	91,3	92,8	0,6
60°	Nepa® Fil A2 4	5	91,5	91,3	91,8	0,2
60°	Nepa® Fil A2 5	5	91,6	91,3	92,1	0,3
60°	Grandio® A2 1	5	89,9	88,9	90,7	0,7
60°	Grandio® A2 2	5	91,2	90,6	92,5	0,7
60°	Grandio® A2 3	5	91,3	91,0	91,9	0,3
60°	Grandio® A2 4	5	90,2	89,5	90,7	0,4
60°	Grandio® A2 5	5	90,1	89,6	90,4	0,3
60°	Grandio® C3 1	5	89,6	89,5	89,6	0,1
60°	Grandio® C3 2	5	88,6	87,1	89,8	0,9
60°	Grandio® C3 3	5	87,6	84,4	88,8	1,6
60°	Grandio® C3 4	5	86,9	83,9	88,5	1,6
60°	Grandio® C3 5	5	92,0	91,1	93,0	0,6
60°	ice® A2 1	5	94,7	94,5	95,2	0,3
60°	ice® A2 2	5	94,8	93,5	95,3	0,6
60°	ice® A2 3	5	96,9	96,7	97,0	0,1
60°	ice® A2 4	5	95,6	95,5	95,7	0,1

60°	ice® A2 5	5	95,1	94,8	95,4	0,2
60°	ice® C3 1	5	95,1	94,7	95,2	0,2
60°	ice® C3 2	5	96,4	96,2	96,6	0,2
60°	ice® C3 3	5	96,6	96,2	96,7	0,2
60°	ice® C3 4	5	94,9	94,6	95,4	0,3
60°	ice® C3 5	5	96,4	96,0	96,7	0,3

Tabelle 7: Messwerte vor Politur bei 60°-Messwinkel (Mittelwerte und Standardabweichungen)

Messwinkel	Kompositproben	n	Mean	Min	Max	StDev
85°	Filtek™ Supreme XT A2B 1	5	84,1	78,2	93,3	5,1
85°	Filtek™ Supreme XT A2B 2	5	87,5	78,9	93,5	5,4
85°	Filtek™ Supreme XT A2B 3	5	86,4	77,3	98,8	7,2
85°	Filtek™ Supreme XT A2B 4	5	81,0	78,3	81,8	1,4
85°	Filtek™ Supreme XT A2B 5	5	87,1	79,7	92,4	4,9
85°	Filtek™ Supreme XT C3B 1	5	87,9	81,6	100,0	6,4
85°	Filtek™ Supreme XT C3B 2	5	88,5	82,7	98,7	5,8
85°	Filtek™ Supreme XT C3B 3	5	85,6	76,1	93,1	5,9
85°	Filtek™ Supreme XT C3B 4	5	86,8	81,6	89,9	3,3
85°	Filtek™ Supreme XT C3B 5	5	90,8	83,1	98,2	6,2
85°	Premise™ A2 1	5	86,7	79,6	93,6	4,6
85°	Premise™ A2 2	5	90,0	83,1	94,7	4,2
85°	Premise™ A2 3	5	91,0	84,2	96,5	5,3
85°	Premise™ A2 4	5	88,7	80,6	96,1	5,5
85°	Premise™ A2 5	5	87,9	80,4	93,6	5,0
85°	Simile® A2 1	5	91,5	86,0	96,9	3,6
85°	Simile® A2 2	5	84,6	78,3	94,0	5,8
85°	Simile® A2 3	5	86,1	82,0	91,1	3,0
85°	Simile® A2 4	5	89,6	84,6	98,9	5,3
85°	Simile® A2 5	5	88,9	81,8	96,1	5,4
85°	Simile® C2 1	5	93,5	87,0	98,7	4,2
85°	Simile® C2 2	5	88,2	82,2	97,1	5,4
85°	Simile® C2 3	5	86,7	79,5	93,7	4,6

85°	Simile® C2 4	5	86,5	77,3	92,6	7,0
85°	Simile® C2 5	5	91,0	84,0	94,6	4,2
85°	Artiste® Enamel A 1	5	85,5	78,7	91,8	5,2
85°	Artiste® Enamel A 2	5	87,1	78,5	95,1	6,8
85°	Artiste® Enamel A 3	5	89,4	77,1	96,4	7,2
85°	Artiste® Enamel A 4	5	88,3	83,0	95,5	4,4
85°	Artiste® Enamel A 5	5	84,5	70,1	94,4	8,9
85°	Synergy D6® A2/B2 1	5	92,8	86,0	98,8	4,7
85°	Synergy D6® A2/B2 2	5	94,0	92,3	99,0	2,6
85°	Synergy D6® A2/B2 3	5	94,1	92,4	96,6	1,5
85°	Synergy D6® A2/B2 4	5	89,1	84,0	94,2	4,0
85°	Synergy D6® A2/B2 5	5	86,8	74,7	94,3	7,2
85°	Synergy D6® C2/C3 1	5	90,5	84,4	95,7	4,9
85°	Synergy D6® C2/C3 2	5	89,8	87,5	91,7	1,6
85°	Synergy D6® C2/C3 3	5	93,5	87,8	99,0	3,5
85°	Synergy D6® C2/C3 4	5	92,7	86,9	98,0	4,1
85°	Synergy D6® C2/C3 5	5	91,5	85,5	98,7	4,4
85°	Nepa® Fil A2 1	5	94,1	90,1	98,8	2,8
85°	Nepa® Fil A2 2	5	85,8	78,0	95,4	6,9
85°	Nepa® Fil A2 3	5	90,4	84,5	94,4	4,0
85°	Nepa® Fil A2 4	5	90,7	80,4	98,1	5,8
85°	Nepa® Fil A2 5	5	85,2	70,8	95,4	8,5
85°	Grandio® A2 1	5	95,4	91,0	99,0	3,0
85°	Grandio® A2 2	5	95,2	91,5	97,9	2,3
85°	Grandio® A2 3	5	94,1	90,6	97,4	2,3
85°	Grandio® A2 4	5	88,8	82,1	98,1	5,8
85°	Grandio® A2 5	5	95,0	92,8	98,4	2,0
85°	Grandio® C3 1	5	91,1	86,0	96,3	4,0
85°	Grandio® C3 2	5	89,8	79,9	95,4	5,3
85°	Grandio® C3 3	5	80,8	66,5	88,2	8,3
85°	Grandio® C3 4	5	85,6	77,8	92,5	5,7
85°	Grandio® C3 5	5	94,2	91,1	96,4	1,9
85°	ice® A2 1	5	92,2	87,1	96,6	3,8
85°	ice® A2 2	5	87,8	75,8	93,2	6,7
85°	ice® A2 3	5	88,8	81,3	93,5	4,2

85°	ice® A2 4	5	88,1	81,8	93,8	4,5
85°	ice® A2 5	5	88,6	84,3	92,8	3,2
85°	ice® C3 1	5	87,4	82,9	93,2	3,7
85°	ice® C3 2	5	88,3	82,9	93,1	3,9
85°	ice® C3 3	5	91,6	87,6	95,4	2,9
85°	ice® C3 4	5	84,8	79,4	92,4	5,9
85°	ice® C3 5	5	87,6	79,1	95,1	5,5

Tabelle 8: Messwerte vor Politur bei 85°-Messwinkel (Mittelwerte und Standardabweichungen)

13.2.2 Messwerte nach der Bearbeitung

Messwinkel	Kompositproben	n	Mean	Min	Max	StDev
20°	Filtek™ Supreme XT A2B 1	5	76,9	76,2	77,4	0,4
20°	Filtek™ Supreme XT A2B 2	5	74,7	73,9	75,2	0,5
20°	Filtek™ Supreme XT A2B 3	5	76,3	74,6	78,8	1,4
20°	Filtek™ Supreme XT A2B 4	5	75,4	73,2	78,8	2,5
20°	Filtek™ Supreme XT A2B 5	5	74,9	73,6	76,8	1,1
20°	Filtek™ Supreme XT C3B 1	5	79,6	78,6	80,8	0,9
20°	Filtek™ Supreme XT C3B 2	5	80,7	79,3	81,4	0,8
20°	Filtek™ Supreme XT C3B 3	5	81,9	81,3	82,3	0,3
20°	Filtek™ Supreme XT C3B 4	5	82,7	82,4	82,9	0,1
20°	Filtek™ Supreme XT C3B 5	5	81,8	81,4	82,1	0,3
20°	Premise™ A2 1	5	49,3	47,8	51,1	1,2
20°	Premise™ A2 2	5	48,1	47,2	51,3	1,6
20°	Premise™ A2 3	5	49,6	48,8	51,3	1,0
20°	Premise™ A2 4	5	48,8	47,6	50,0	1,1
20°	Premise™ A2 5	5	48,9	48,2	49,4	0,4
20°	Simile® A2 1	5	33,8	33,4	34,2	0,3

20°	Simile® A2 2	5	34,8	34,2	35,3	0,3
20°	Simile® A2 3	5	33,9	33,4	34,4	0,4
20°	Simile® A2 4	5	33,5	32,8	33,8	0,4
20°	Simile® A2 5	5	34,5	33,8	34,9	0,4
20°	Simile® C2 1	5	35,5	35,0	36,3	0,5
20°	Simile® C2 2	5	37,1	37,0	37,1	0,0
20°	Simile® C2 3	5	34,8	34,0	35,4	0,5
20°	Simile® C2 4	5	33,8	33,2	34,2	0,4
20°	Simile® C2 5	5	33,9	33,0	34,5	0,5
20°	Artiste® Enamel A 1	5	18,3	17,9	18,9	0,3
20°	Artiste® Enamel A 2	5	18,3	17,8	18,5	0,3
20°	Artiste® Enamel A 3	5	18,0	17,4	18,2	0,3
20°	Artiste® Enamel A 4	5	16,8	15,7	18,0	0,9
20°	Artiste® Enamel A 5	5	17,7	16,8	18,4	0,5
20°	Synergy D6® A2/B2 1	5	15,0	14,5	16,9	1,0
20°	Synergy D6® A2/B2 2	5	15,3	14,0	16,3	0,8
20°	Synergy D6® A2/B2 3	5	12,9	11,6	13,7	0,9
20°	Synergy D6® A2/B2 4	5	17,3	15,9	18,3	0,8
20°	Synergy D6® A2/B2 5	5	14,4	13,4	15,9	0,8
20°	Synergy D6® C2/C3 1	5	13,8	12,8	14,1	0,5
20°	Synergy D6® C2/C3 2	5	13,0	12,6	13,6	0,4
20°	Synergy D6® C2/C3 3	5	14,0	13,7	14,3	0,2
20°	Synergy D6® C2/C3 4	5	13,9	13,3	14,4	0,4
20°	Synergy D6® C2/C3 5	5	13,4	13,2	13,8	0,2
20°	Nepa® Fil A2 1	5	10,3	10,1	10,8	0,2
20°	Nepa® Fil A2 2	5	9,8	9,2	10,8	0,6
20°	Nepa® Fil A2 3	5	9,7	9,5	10,1	0,2
20°	Nepa® Fil A2 4	5	10,2	9,6	10,8	0,4
20°	Nepa® Fil A2 5	5	8,9	8,4	10,0	0,7
20°	Grandio® A2 1	5	8,2	7,8	8,5	0,3
20°	Grandio® A2 2	5	7,1	6,8	8,4	0,6
20°	Grandio® A2 3	5	8,1	7,7	8,5	0,3
20°	Grandio® A2 4	5	7,3	7,0	7,6	0,2
20°	Grandio® A2 5	5	11,5	11,1	12,4	0,5
20°	Grandio® C3 1	5	6,9	6,4	8,0	0,6

20°	Grandio® C3 2	5	7,7	7,4	8,3	0,4
20°	Grandio® C3 3	5	8,1	7,6	9,4	0,6
20°	Grandio® C3 4	5	7,7	7,1	8,3	0,5
20°	Grandio® C3 5	5	7,1	6,1	8,1	0,8
20°	ice® A2 1	5	6,9	6,7	7,1	0,1
20°	ice® A2 2	5	5,4	5,2	5,7	0,2
20°	ice® A2 3	5	5,2	4,7	5,5	0,3
20°	ice® A2 4	5	6,6	6,5	6,7	0,1
20°	ice® A2 5	5	6,7	6,2	7,1	0,3
20°	ice® C3 1	5	8,6	7,8	9,3	0,5
20°	ice® C3 2	5	9,1	8,7	10,0	0,5
20°	ice® C3 3	5	9,8	9,3	10,3	0,4
20°	ice® C3 4	5	9,2	9,0	9,4	0,2
20°	ice® C3 5	5	10,0	9,5	10,7	0,4

Tabelle 9: Messwerte nach Politur bei 20°Messwinke I (Mittelwerte und Standardabweichungen)

Messwinkel	Kompositproben	n	Mean	Min	Max	StDev
60°	Filtek™ Supreme XT A2B 1	5	87,1	86,4	88,0	0,5
60°	Filtek™ Supreme XT A2B 2	5	85,8	85,5	86,1	0,2
60°	Filtek™ Supreme XT A2B 3	5	85,9	84,2	88,7	1,5
60°	Filtek™ Supreme XT A2B 4	5	86,1	85,0	87,9	1,0
60°	Filtek™ Supreme XT A2B 5	5	86,1	85,3	86,7	0,5
60°	Filtek™ Supreme XT C3B 1	5	87,6	86,7	89,0	1,0
60°	Filtek™ Supreme XT C3B 2	5	88,3	87,4	89,7	0,8
60°	Filtek™ Supreme XT C3B 3	5	88,8	88,1	89,1	0,4
60°	Filtek™ Supreme XT C3B 4	5	89,5	89,2	89,9	0,3
60°	Filtek™ Supreme XT C3B 5	5	89,8	89,2	90,2	0,4
60°	Premise™ A2 1	5	72,7	72,0	73,2	0,4
60°	Premise™ A2 2	5	72,5	71,9	73,6	0,6
60°	Premise™ A2 3	5	72,3	71,6	73,0	0,5
60°	Premise™ A2 4	5	72,7	72,1	73,3	0,4
60°	Premise™ A2 5	5	71,9	71,2	72,5	0,5

60°	Simile® A2 1	5	60,9	60,3	61,8	0,5
60°	Simile® A2 2	5	60,1	59,8	60,5	0,2
60°	Simile® A2 3	5	61,2	60,8	61,6	0,3
60°	Simile® A2 4	5	61,6	61,3	61,7	0,2
60°	Simile® A2 5	5	60,4	59,7	61,2	0,5
60°	Simile® C2 1	5	63,7	63,5	64,3	0,3
60°	Simile® C2 2	5	63,9	63,3	64,3	0,3
60°	Simile® C2 3	5	62,1	61,7	63,0	0,5
60°	Simile® C2 4	5	62,0	61,8	62,3	0,2
60°	Simile® C2 5	5	62,0	61,5	62,4	0,3
60°	Artiste® Enamel A 1	5	49,7	49,1	50,7	0,6
60°	Artiste® Enamel A 2	5	48,8	47,8	49,9	0,8
60°	Artiste® Enamel A 3	5	49,7	48,8	50,8	0,8
60°	Artiste® Enamel A 4	5	47,8	47,1	48,7	0,6
60°	Artiste® Enamel A 5	5	49,2	48,2	49,8	0,6
60°	Synergy D6® A2/B2 1	5	43,1	42,4	44,6	0,8
60°	Synergy D6® A2/B2 2	5	41,7	40,0	42,8	1,0
60°	Synergy D6® A2/B2 3	5	42,2	41,0	42,8	0,7
60°	Synergy D6® A2/B2 4	5	43,7	42,8	44,4	0,5
60°	Synergy D6® A2/B2 5	5	42,0	41,3	42,8	0,5
60°	Synergy D6® C2/C3 1	5	42,4	41,5	42,8	0,5
60°	Synergy D6® C2/C3 2	5	42,7	42,0	43,3	0,5
60°	Synergy D6® C2/C3 3	5	41,6	40,7	42,3	0,6
60°	Synergy D6® C2/C3 4	5	42,1	41,2	42,4	0,5
60°	Synergy D6® C2/C3 5	5	42,4	42,2	42,8	0,2
60°	Nepa® Fil A2 1	5	40,6	39,2	41,4	0,7
60°	Nepa® Fil A2 2	5	40,1	39,3	41,3	0,9
60°	Nepa® Fil A2 3	5	42,5	41,5	43,1	0,5
60°	Nepa® Fil A2 4	5	42,3	41,5	42,7	0,5
60°	Nepa® Fil A2 5	5	41,1	40,3	42,6	0,9
60°	Grandio® A2 1	5	32,8	31,6	33,7	0,8
60°	Grandio® A2 2	5	31,7	31,2	33,9	1,1
60°	Grandio® A2 3	5	35,2	34,3	36,1	0,7
60°	Grandio® A2 4	5	32,2	31,5	32,8	0,5
60°	Grandio® A2 5	5	34,7	33,9	36,4	1,0

60°	Grandio® C3 1	5	31,3	30,6	32,5	0,7
60°	Grandio® C3 2	5	32,0	31,3	33,0	0,8
60°	Grandio® C3 3	5	32,7	31,7	34,9	1,2
60°	Grandio® C3 4	5	32,1	31,1	33,1	0,9
60°	Grandio® C3 5	5	30,9	29,4	32,7	1,2
60°	ice® A2 1	5	27,7	27,2	28,2	0,4
60°	ice® A2 2	5	27,4	26,9	27,8	0,3
60°	ice® A2 3	5	26,7	26,2	27,4	0,5
60°	ice® A2 4	5	28,4	27,8	28,8	0,4
60°	ice® A2 5	5	27,4	26,8	28,1	0,5
60°	ice® C3 1	5	31,9	30,8	32,8	0,7
60°	ice® C3 2	5	32,7	32,2	33,5	0,5
60°	ice® C3 3	5	32,4	31,6	32,9	0,4
60°	ice® C3 4	5	31,7	31,2	32,4	0,5
60°	ice® C3 5	5	32,7	32,3	33,1	0,3

Tabelle 10: Messwerte nach Politur bei 60°-Messwinkel (Mittelwerte und Standardabweichungen)

Messwinkel	Kompositproben	n	Mean	Min	Max	StDev
85°	Filtek™ Supreme XT A2B 1	5	83,1	77,6	90,5	4,2
85°	Filtek™ Supreme XT A2B 2	5	85,0	80,9	88,5	3,1
85°	Filtek™ Supreme XT A2B 3	5	83,4	81,1	88,0	2,4
85°	Filtek™ Supreme XT A2B 4	5	82,7	75,7	91,0	4,9
85°	Filtek™ Supreme XT A2B 5	5	85,3	77,5	91,7	4,6
85°	Filtek™ Supreme XT C3B 1	5	81,2	77,4	87,3	4,4
85°	Filtek™ Supreme XT C3B 2	5	85,0	79,7	88,9	3,4
85°	Filtek™ Supreme XT C3B 3	5	84,4	78,5	88,1	3,3
85°	Filtek™ Supreme XT C3B 4	5	87,1	80,8	92,6	4,4
85°	Filtek™ Supreme XT C3B 5	5	88,3	81,8	92,8	3,7
85°	Premise™ A2 1	5	83,1	68,0	92,0	8,2
85°	Premise™ A2 2	5	86,4	79,6	90,9	4,2
85°	Premise™ A2 3	5	87,8	76,2	92,4	6,0
85°	Premise™ A2 4	5	87,0	83,6	91,1	2,5

85°	Premise™ A2 5	5	87,4	82,0	91,9	3,4
85°	Simile® A2 1	5	83,3	81,1	85,7	1,7
85°	Simile® A2 2	5	79,6	76,8	81,5	1,9
85°	Simile® A2 3	5	76,1	73,5	80,0	2,3
85°	Simile® A2 4	5	86,1	84,2	87,9	1,4
85°	Simile® A2 5	5	81,4	76,6	85,3	3,9
85°	Simile® C2 1	5	83,8	78,0	87,0	3,2
85°	Simile® C2 2	5	73,7	72,4	76,4	1,4
85°	Simile® C2 3	5	85,7	85,4	86,1	0,2
85°	Simile® C2 4	5	86,3	85,7	86,7	0,4
85°	Simile® C2 5	5	87,5	86,8	88,5	0,6
85°	Artiste® Enamel A 1	5	74,1	71,0	76,8	2,3
85°	Artiste® Enamel A 2	5	80,7	79,0	82,1	1,2
85°	Artiste® Enamel A 3	5	76,8	73,9	80,9	2,8
85°	Artiste® Enamel A 4	5	82,4	81,6	83,3	0,7
85°	Artiste® Enamel A 5	5	73,6	70,2	77,5	2,8
85°	Synergy D6® A2/B2 1	5	74,6	72,9	78,7	2,1
85°	Synergy D6® A2/B2 2	5	69,7	68,4	72,7	1,5
85°	Synergy D6® A2/B2 3	5	85,2	80,9	87,6	2,6
85°	Synergy D6® A2/B2 4	5	77,4	73,5	84,4	3,7
85°	Synergy D6® A2/B2 5	5	78,5	74,8	82,0	2,5
85°	Synergy D6® C2/C3 1	5	77,7	70,3	81,9	4,3
85°	Synergy D6® C2/C3 2	5	76,5	67,3	84,0	6,1
85°	Synergy D6® C2/C3 3	5	82,4	75,5	85,4	3,6
85°	Synergy D6® C2/C3 4	5	80,1	76,4	84,5	2,6
85°	Synergy D6® C2/C3 5	5	82,7	81,0	84,2	1,3
85°	Nepa® Fil A2 1	5	73,7	68,7	81,1	4,2
85°	Nepa® Fil A2 2	5	71,5	70,2	74,5	1,6
85°	Nepa® Fil A2 3	5	74,6	71,6	80,5	3,4
85°	Nepa® Fil A2 4	5	79,3	74,0	85,4	4,7
85°	Nepa® Fil A2 5	5	74,9	72,7	80,2	2,8
85°	Grandio® A2 1	5	82,5	81,9	83,0	0,4
85°	Grandio® A2 2	5	80,2	76,8	81,1	1,7
85°	Grandio® A2 3	5	79,0	78,3	79,7	0,6
85°	Grandio® A2 4	5	80,7	79,9	81,2	0,5

85°	Grandio® A2 5	5	68,4	67,7	69,9	0,8
85°	Grandio® C3 1	5	83,2	81,4	83,7	0,9
85°	Grandio® C3 2	5	81,9	78,5	84,2	2,8
85°	Grandio® C3 3	5	75,6	73,6	76,6	1,1
85°	Grandio® C3 4	5	82,0	78,8	84,8	2,5
85°	Grandio® C3 5	5	77,3	75,8	78,4	1,0
85°	ice® A2 1	5	77,3	71,2	81,4	3,5
85°	ice® A2 2	5	79,6	77,7	80,7	1,1
85°	ice® A2 3	5	80,0	77,9	82,7	1,8
85°	ice® A2 4	5	74,0	68,8	78,2	3,0
85°	ice® A2 5	5	81,0	79,3	83,3	1,4
85°	ice® C3 1	5	79,0	75,9	81,2	1,8
85°	ice® C3 2	5	81,5	80,4	84,1	1,4
85°	ice® C3 3	5	83,7	82,7	84,7	0,8
85°	ice® C3 4	5	83,4	83,1	83,7	0,2
85°	ice® C3 5	5	84,3	83,9	84,9	0,4

Tabelle 11: Messwerte nach Politur bei 85°-Messwinkel (Mittelwerte und Standardabweichungen)