

**Der Einfluss verschiedener Ausarbeitungsmethoden und Poliersysteme
auf die Qualität von Feinpartikelhybridkompositoberflächen –
eine profilometrische und rasterelektronenmikroskopische
In-vitro-Untersuchung**

Inauguraldissertation
zur Erlangung des Grades eines Doktors der Zahnmedizin
des Fachbereichs Medizin
der Justus-Liebig-Universität Gießen

vorgelegt von Markus Brandt
aus Kassel

Gießen 2006

Aus dem Medizinischen Zentrum für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde
Poliklinik für Zahnerhaltungskunde und Präventive Zahnheilkunde
Direktor: Prof. Dr. J. Klimek
des Universitätsklinikums Gießen und Marburg

Gutachter: Prof. Dr. M. Jung
Gutachter: Prof. Dr. Dr. K. Rödelsperger

Tag der Disputation: 31.10.2006

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINLEITUNG UND PROBLEMSTELLUNG	1
2	LITERATURÜBERSICHT	3
2.1	Komposite in der Zahnmedizin	3
2.2	Bedeutung der Oberflächenqualität von Kompositen	6
2.2.1	Plaqueeakkumulation	7
2.2.2	Verschleißfestigkeit und Abrasion	7
2.2.3	Verfärbungen	8
2.3	Ausarbeitung und Politur von Kompositoberflächen	9
2.3.1	Ausarbeitungsinstrumente	10
2.3.2	Poliersysteme	11
2.4	Methoden zur Beurteilung von Kompositoberflächen	21
2.4.1	Quantitative Verfahren	21
2.4.2	Qualitative Verfahren	24
3	MATERIAL UND METHODE	25
3.1	Verwendetes Komposit	25
3.2	Herstellung der Prüfkörper	25
3.3	Instrumente der rotierenden Bearbeitung	26
3.3.1	Instrumente der Ausarbeitung	26
3.3.2	Instrumente für die Politur	28
3.3.3	Instrumente der Referenzbearbeitungsmethode	36
3.4	Ausarbeitung und Politur des Komposits	38
3.4.1	Ausarbeitung	38
3.4.2	Politur	39
3.4.3	Resultierende Bearbeitungsmethoden	40

3.5	Evaluierung der Kompositoberflächen	41
3.5.1	Quantitative Beurteilung	41
3.5.2	Qualitative Beurteilung	45
3.6	Statistik	48
4	ERGEBNISSE	50
4.1	Quantitative Beurteilung	50
4.1.1	Arithmetischer Mittenrauwert R_a	50
4.1.2	Profillängenverhältnis LR	58
4.1.3	Vergleich der beiden Untersuchungsparameter	65
4.2	Qualitative Beurteilung	68
4.2.1	Deskriptive Auswertung der REM-Aufnahmen	68
4.2.2	Semiquantitative Auswertung der REM-Aufnahmen	75
5	DISKUSSION	79
5.1	Methodenkritik	79
5.1.1	Studiendesign	79
5.1.2	Auswahl der untersuchten Ausarbeitungsverfahren und Poliersysteme	79
5.1.3	Bearbeitung der Prüfkörper	81
5.1.4	Methoden zur Evaluierung der Kompositoberflächen	81
5.2	Interpretation der Ergebnisse	84
5.2.1	Quantitative Beurteilung	84
5.2.2	Qualitative Beurteilung	89
5.3	Literaturvergleich	91
5.3.1	Limitationen des Literaturvergleichs	91
5.3.2	Vergleich mit den Ergebnissen anderer Autoren	92
5.4	Klinische Relevanz der Ergebnisse und Schlussfolgerung	98
6	ZUSAMMENFASSUNG	101
7	SUMMARY	104

8	LITERATURVERZEICHNIS	107
9	LEBENS LAUF	123
10	DANKSAGUNG	125

1 Einleitung und Problemstellung

Obwohl die Amalgamversorgung neben dem Goldinlay nach wie vor eine anerkannte und zuverlässige Versorgung im Seitenzahnbereich darstellt [13], gewinnen zahnfarbene Füllungswerkstoffe immer mehr an Bedeutung [2, 13, 23, 52, 60, 86, 93]. Neben der indirekten Herstellung von Komposit- oder Keramikinlays bietet sich hier vor allem die Verwendung von zahnfarbenen plastischen Füllungsmaterialien, wie z.B. Hybridkompositen, im Rahmen einer direkten Füllungstherapie an.

Nach dem Einbringen und Aushärten des plastischen Kompositmaterials ist eine Bearbeitung der Füllungsoberfläche mit rotierenden Instrumenten erforderlich. Die Oberflächenbearbeitung lässt sich prinzipiell in die Arbeitsschritte Ausarbeitung (Grobausarbeiten, Konturieren, Finieren) und Politur gliedern. Da es klinisch nahezu unmöglich ist, eine überschussfreie, optimal adaptierte Restauration zu legen, besteht das Ausarbeiten in erster Linie im Abtragen von Überschüssen sowie in der morphologischen Gestaltung und im okklusalen Adjustieren der Füllung. Zudem wird die sog. Sauerstoffinhibitionsschicht entfernt, die beim Aushärten von Kompositen entsteht. Dabei handelt es sich um eine füllstoffarme Oberflächenschicht, die aufgrund ihrer geringen Abrasionsresistenz zur Erhöhung der Verschleißfestigkeit und Lebenserwartung der Restauration abgetragen werden muss [5, 22, 28, 104]. Für das rotierende Ausarbeiten von Kompositfüllungen im Seitenzahnbereich kommen entweder Diamantfinierer unterschiedlicher Korngrößen oder Hartmetallfinierer zum Einsatz, welche in der Anzahl und Form der Schneiden variieren können [54, 77].

Nach der Ausarbeitung bleibt in der Regel eine raue Füllungsoberfläche zurück, was einerseits die Plaqueanlagerung [5, 29, 80, 83, 91, 92, 95] und in der Folge die Bildung von Sekundärkaries [7, 50, 51, 67, 112] und Gingivitiden begünstigt [15, 68]. Die anschließende Politur sollte die verbliebenen Rauigkeiten demnach zum einen aus Gründen der Prophylaxe einebnen, zum anderen wirkt

eine glatt polierte Füllung auch ästhetisch wesentlich ansprechender und weist eine deutlich geringere Verfärbungstendenz auf [25, 27, 29, 33, 67, 92, 96, 103]. Für die Politur von Kompositfüllungen steht eine Vielzahl rotierender Bearbeitungsinstrumente zur Verfügung, die auf unterschiedlichen Funktionsprinzipien basieren. Prinzipiell lassen sich flexible aluminiumbeschichtete Disks, diamantimprägnierte Filzpolierer, Gummi- bzw. Silikonpolierer, siliciumcarbid-imprägnierte Polierbürsten sowie Polierpasten auf Diamant- oder Aluminiumoxidbasis unterscheiden [42].

In den letzten Jahren wurde auf dem Dentalmarkt eine Vielzahl neuer Finierer und Polierer angeboten. Um eine Bewertung dieser Bearbeitungsinstrumente zu erleichtern, war es Ziel der vorliegenden In-vitro-Studie, die Eignung neuerer Poliersysteme in Kombination mit verschiedenen Ausarbeitungsmethoden an Oberflächen von Feinpartikelhybridkompositprüfkörpern zu untersuchen und mit etablierten Verfahren zu vergleichen.

2 Literaturübersicht

2.1 Komposite in der Zahnmedizin

Grundsätzlich wird in der Zahnmedizin zwischen Prothesenkunststoffen und Füllungskunststoffen, den sogenannten Kompositen, unterschieden. Definitionsgemäß handelt es sich bei einem Komposit um einen Verbundkunststoff, der aus drei Komponenten besteht: der organischen Phase (Matrix), der Verbundphase (Silane, Kopolymerisate) und der dispersen Phase (Füller) [61, 104].

Die erste Generation von Füllungskunststoffen stellten die Acrylatfüllkunststoffe dar, die in den 1940er Jahren verwendet wurden. Gravierende negative Eigenschaften waren die erhebliche Polymerisationsschrumpfung, die starke Verfärbungstendenz, die Verformung bei okklusaler Belastung, die geringe Abrasionfestigkeit sowie die fehlende Polierbarkeit [59, 76].

In den 1960er Jahren brachte die Entwicklung eines neuen primären Kunststoffanteils durch Bowen einen großen Fortschritt. Die chemische Grundformel des sog. Bowen-Moleküls (Bisphenol A-Glycidyl-Di-Methacrylat (Bis-GMA)) besteht aus M-R-M, wobei M für eine reaktive Methacrylatgruppe ($\text{CH}_2=\text{C}(\text{CH}_3)\text{-CO-O-}$) und R für das Molekülskelett steht. Die Füllungskunststoffe wurden dadurch härter und abrasionsfester, die Polymerisationsschrumpfung konnte reduziert werden. In heute gebräuchlichen Füllungskunststoffen kommen Derivate des Bowenmoleküls - so etwa Triethylenglycodimethacrylat (TEGDMA) - als organische Matrix zum Einsatz [61, 104].

Die Verbundphase zwischen der organischen Matrix und den anorganischen Füllern dient als Haftvermittler. Hierfür werden heute bipolare organische Silane verwendet [76].

Als dritte Komponente eines Komposits ist die disperse Phase zu nennen. In ihr befinden sich die Füllstoffe, die weitestgehend über die Materialeigenschaften des Komposits entscheiden. Basierend auf der Zusammensetzung der Füllstoffe und der mittleren Partikelgröße werden Komposite üblicherweise folgendermaßen klassifiziert:

- Makrofüllerkomposite (konventionelle Komposite):

Makrofüllerkomposite bestehen aus inhomogenen anorganischen Partikeln wie Quarz, Glas oder Keramik und weisen eine mittlere Partikelgröße von 2-30 μm auf [76]. Wegen des verhältnismäßig hohen Füllstoffanteils (70-80 Gew.-%) sind die mechanischen Eigenschaften dieses Kompositstyps gut, während Polierbarkeit und Verschleißfestigkeit der Kompositoberflächen aufgrund der großen Füllkörper als schlecht eingestuft werden [104]. Zudem weisen Makrofüllerkomposite einen im Vergleich zum Zahnschmelz hohen thermischen Ausdehnungskoeffizienten auf, wodurch es zur einer Randspaltbildung kommen kann [26].

- Mikrofüllerkomposite:

Der Mikrofülleranteil dieser Komposite besteht aus feindispersen Glasperlen aus pyrogener Kieselsäure (SiO_2) mit einer mittleren Partikelgröße von 0,04-0,15 μm . Besteht der Mikrofülleranteil nur aus pyrogener Kieselsäure, so spricht man von homogenen Mikrofüllerkompositen. Inhomogene Mikrofüllerkomposite hingegen enthalten im Fülleranteil sowohl pyrogene Kieselsäure als auch Mikrofüllerkomplexe, welche wiederum in splitterförmig-vorpolymerisierte, kugelförmig-vorpolymerisierte und agglomerierte Mikrofüllerkomplexe unterteilt werden [76]. Der niedrige Füllstoffanteil von 35-50 Gew.-% führt zu unerwünschten Materialeigenschaften wie geringer Härte, hoher thermischer Ausdehnung und großer Polymerisationsschrumpfung. Andererseits ermöglichen Mikrofüllerkomposite wegen der pyrogenen Kieselsäure eine besonders glatte Politur der Oberfläche und weisen daher gute ästhetische Eigenschaften auf [21, 61, 76].

- Hybridkomposite:

Die Füllkörper der Hybridkomposite bestehen ebenfalls aus anorganischen Partikeln wie Quarz, Glas oder Keramik. Bei einem Gesamtfülleranteil von 60-85 Gew.-% enthalten Hybridkomposite sowohl Mikrofüller als auch Makrofüller unterschiedlicher mittlerer Partikelgröße und vereinen daher die Vorteile der Mikro- und Makrofüllerkomposite in sich, wobei hier in erster Linie die guten physikalischen Eigenschaften der Makrofüllkörper und die Polierbarkeit der Kompositoberfläche bei den Mikrofüllerkompositen zu nennen sind [21, 76]. Bei den Makrofüllern ist in den letzten Jahren eine deutliche Tendenz zur Reduktion der ursprünglichen Füllergröße zu erkennen, wobei die Hybridkomposite heute nach ihrer Füllstoffgröße in Fein- (0,3-2 μm) und Grobpartikelhybridkomposite (2-10 μm) unterteilt werden [76].

Amalgam stellte aufgrund der seiner Vorteile in Bezug auf Kosten, Haltbarkeit, Verarbeitung und Sekundärkariesbildung lange Zeit das plastische Füllungsmaterial der Wahl dar, geriet jedoch im Zuge der „Amalgamdiskussion“ aufgrund seines Quecksilbergehaltes in Verruf. Eine toxische Wirkung der Amalgamfüllungen auf den menschlichen Organismus konnte aus wissenschaftlicher Sicht bislang nicht nachgewiesen werden [9, 19]. Trotzdem ist die Tendenz zur Kompositfüllung bei den Patienten weiter zunehmend [2, 23, 52, 86, 93], so dass hier unverändert großer Forschungs- und Entwicklungsbedarf besteht.

Wie jedes Füllungsmaterial weisen auch Komposite gewisse Schwachstellen auf. Beispielsweise tritt bei der Verarbeitung von Kompositmaterialien eine Polymerisationsschrumpfung auf, die bis zu 4,5% volumetrisch oder 2% linear sein kann [24, 30, 57, 94]. Auf diese Weise kann eine negative oder positive Stufe entstehen, die mitunter zu Sekundärkaries führt [82]. Auch wenn die Schrumpfung bei Anwendung einer Schichttechnik mit zwei- oder mehrstufiger Polymerisation signifikant kleiner ausfällt [16, 21], kann es bei größeren Füllungen weiterhin zu einer mangelhaften marginalen Adaption des Komposits und somit zu einer Randspaltbildung kommen [11, 24, 57]. Bei tiefen approximalen

Kavitäten ist eine direkte Kompositfüllung zudem aufgrund der erschwerten Trockenlegung, Ausarbeitung und approximalen Gestaltung kaum zu realisieren. Ebenfalls als schwierig erweist sich bei der direkten Kompositfüllung die korrekte Gestaltung der Okklusalfäche [30].

Aufgrund dieser Einschränkungen wurde lange Zeit kontrovers diskutiert, ob Komposite auch im Falle größerer zwei- oder dreiflächiger Seitenzahnkavitäten eine Alternative zur Amalgamversorgung darstellen können. Ein Großteil der Unzulänglichkeiten von zahnfarbenen plastischen Füllungsmaterialien konnte jedoch durch neuere werkstoffkundliche Entwicklungen erheblich reduziert werden [64]. Darüber hinaus zeigten Langzeitstudien, in denen Kompositfüllungen hinsichtlich ihrer Haltbarkeit untersucht wurden, ermutigende Ergebnisse. Beispielsweise ermittelten Manhart et al. [63] im Rahmen einer Meta-Analyse zur Langlebigkeit verschiedener Restaurationen im Seitenzahnbereich eine durchschnittliche jährliche Verlustrate von 3,0% bei Amalgamfüllungen, 2,9% bei Kompositinlays, 1,9% bei Keramikrestaurationen und 1,4% bei Goldinlays. Mit einer Verlustrate von 2,2% lagen die direkten Kompositrestaurationen im Mittelfeld. Hickel und Manhart [31] erstellten ebenfalls eine Literaturübersicht und ermittelten jährliche Verlustraten von 0-7% bei Amalgamfüllungen, 0-11,8% bei Kompositinlays, 0-7,5% bei Keramikrestaurationen, 0-5,9% bei Goldinlays und 0-9% bei direkten Kompositrestaurationen.

2.2 Bedeutung der Oberflächenqualität von Kompositen

Die Oberflächenqualität von Kompositfüllungen besitzt unterschiedliche Auswirkungen auf Plaqueakkumulation, Verschleiß und Abrasion sowie auf das Auftreten von Verfärbungen, worauf in den folgenden Kapiteln ausführlicher eingegangen werden soll.

2.2.1 Plaqueakkumulation

Ein direkter Zusammenhang zwischen Oberflächenrauigkeit und Plaqueakkumulation ist aus der Literatur bekannt, wobei das Ausmaß der Plaqueakkumulation mit der Rautiefe zunimmt [5, 29, 80, 83, 91, 92, 95] und in der Folge die Bildung von Sekundärkaries [7, 50, 51, 67, 113] und Gingivitiden begünstigt [15, 68]. Nahrungs- und Epithelreste sowie Bakterien finden aufgrund der vergrößerten Fläche und der Mikroretentionen, welche raue Oberflächen bieten, ideale Bedingungen vor, um sich anzusiedeln. Im Sinne einer Minimierung der Plaqueakkumulation sollte daher mittels geeigneter Ausarbeitungs- und Politurinstrumente eine möglichst glatte Oberfläche zahnärztlicher Füllungswerkstoffe geschaffen werden.

Neben der Rauigkeit der Oberfläche scheint auch die freie Oberflächenenergie Einfluss auf die Plaqueakkumulation des verwendeten Füllungsmaterials zu haben. Wenngleich die Oberflächenrauigkeit in diesem Zusammenhang den bedeutenderen Faktor darstellt [78], so wird die bakterielle Adhäsion durch eine höhere Oberflächenenergie zusätzlich begünstigt [79].

Zusätzlich zu den erwähnten Faktoren ist auch die Qualität des Randschlusses der Kompositfüllung und die dadurch gegebenenfalls entstehenden Makroretentionen für das Ausmaß der Plaqueakkumulation von Bedeutung, so dass auch auf einen guten Randschluss der Kompositfüllungen geachtet werden muss [95].

2.2.2 Verschleißfestigkeit und Abrasion

Die Verschleißfestigkeit eines Komposits hängt von vielen Faktoren wie Form, Größe, Härte der Füllkörper und Oberflächenrauigkeit ab. Tjan und Chan [100] zeigten, dass unpolierte Kompositoberflächen zu einer deutlich erhöhten Abrasion am Antagonisten und zu einem erhöhten Verschleißverhalten der Kompo-

sitoberfläche führen. Ein Zusammenhang zwischen dem Verschleißverhalten und der Oberflächenrauigkeit bei Kompositen konnte auch von Mandikos et al. [62] nachgewiesen werden. Im Gegensatz dazu bestätigte sich dieser Zusammenhang in einer aktuellen Studie von Turssi et al. [101] nicht, in der jedoch Oberflächen nach Politur mit verschiedenen Bearbeitungsverfahren und nicht unpolierte Oberflächen untersucht wurden, wie es bei Tjan und Chan [100] sowie Mandikos et al. [62] der Fall war. Nach Auffassung von Willems et al. [108] hat die Abrasion eines natürlichen Zahnes durch eine antagonistische Kompositfüllungsoberfläche dann klinische Bedeutung, wenn die Abrasion des Schmelzes das Maß der physiologischen Abrasion übersteigt. Aus diesem Grund sollte bei der Politur der Füllungsoberfläche mindestens die Oberflächenqualität der antagonistischen Schmelzoberfläche erreicht werden, wobei für den natürlichen Schmelz in der Literatur Mittenrauwerte zwischen 0,4 und 0,7 μm angegeben werden [55, 108, 110].

2.2.3 Verfärbungen

Ein wesentliches Qualitätskriterium von Kompositfüllungen stellt deren Farbstabilität dar, da Kompositoberflächen durch Substanzen wie Tee, Kaffee, Cola, Rotwein oder Tabak chemisch angegriffen und verfärbt werden können [10, 58, 90]. Lu et al. [58] untersuchten den Einfluss verschiedener Faktoren auf die Verfärbungstendenz des Kompositen, wobei einerseits ein signifikanter Zusammenhang mit dem verwendeten Kompositmaterial ermittelt wurde. Andererseits war die Verfärbungstendenz der Kompositoberfläche umso größer, je größer ihr arithmetischer Mittenrauwert war. Dieser Zusammenhang zwischen Oberflächenrauigkeit und Verfärbungstendenz konnte bereits in einer Vielzahl anderer Studien nachgewiesen werden [25, 27, 29, 33, 67, 92, 96, 103]. Darüber hinaus kommt in Hinblick auf die Farbstabilität einer präzisen Füllungstechnik sowie einer sorgfältigen Ausarbeitung große Bedeutung zu, da mangelhaft gestaltete Übergänge ebenfalls Retentionen darstellen und ein Verfärben insbesondere im Randbereich der Füllung begünstigen [27, 90, 92].

2.3 Ausarbeitung und Politur von Kompositoberflächen

Die Ausarbeitung und Politur von Kompositoberflächen wird in insgesamt vier Schritte untergliedert, wobei jeder Arbeitsschritt besondere Anforderungen an das verwendete rotierende Instrument stellt [25, 61]:

- Grobausarbeiten

Dieser Arbeitsschritt dient dem Entfernen größerer Überschüsse, weshalb der hierfür verwendete Schleifkörper einen zügigen Substanzabtrag gewährleisten sollte. Die Grobausarbeitung erfolgt im allgemeinen durch verschiedene Schleifkörper, wie Diamantfinierer, Hartmetallfinierer, rotierende Steine aus Aluminiumoxid bzw. Siliciumcarbid oder durch flexible Disks.

- Konturieren

Das Konturieren dient der Wiederherstellung der Funktion und Ästhetik, indem die Kompositfüllung in die entsprechende anatomische Form gebracht wird. Die hierfür verwendeten Instrumente sollen einen geeigneten Substanzabtrag leisten, ohne die Kompositoberfläche aufzurauen oder die Schmelzoberfläche des Zahnes zu beschädigen. Beim Konturieren werden Diamant- oder Hartmetallfinierer angewendet.

- Finieren

Beim Finieren wird die Kompositoberfläche für die nachfolgende Politur vorgeglättet. Unregelmäßigkeiten wie Kanten oder Riefen sollen beseitigt und größeren Rauigkeiten geglättet werden. Auch hierbei kommen Diamant- oder Hartmetallfinierer zum Einsatz.

- Politur

Die Politur sorgt durch nochmalige Reduktion der Rauigkeiten mit Hilfe feiner Abrasivstoffe für eine Optimierung der Kompositoberfläche. Da das menschliche Auge Oberflächenrautiefen R_a unter $1 \mu\text{m}$ [14] bzw. $0,5 \mu\text{m}$

[109] nicht wahrnehmen kann, erscheint die polierte Oberfläche glänzend und homogen. Für die Politur von Kompositoberflächen stehen verschiedene rotierende Instrumente zur Verfügung, wobei sich prinzipiell Gummipolierer auf Silikonbasis, diamantprägnierte Filzpolierer, flexible Disks, siliciumcarbidprägnierte Polierbürsten sowie Polierpasten auf Diamant- oder Aluminiumoxidbasis unterscheiden lassen [42].

2.3.1 Ausarbeitungsinstrumente

Für das rotierende Ausarbeiten von Kompositfüllungen im Seitenzahnbereich kommen in der Praxis entweder diamantierte Finierer in unterschiedlichen Korngrößen oder Hartmetallfinierer zum Einsatz, die in der Anzahl und Form der Schneiden variieren können [54, 77].

Der Einsatz von Diamantfinieren zur Ausarbeitung von Kompositoberflächen hat sich in einer Vielzahl von Untersuchungen bewährt, da sie aufgrund ihrer im Vergleich zu Hartmetallfinierern größeren Abtragsleistung gut zur Überschussbeseitigung und Konturierung geeignet sind [3, 5, 38, 39, 40, 53].

Allerdings führt das aggressive Schneidverhalten von diamantierten Instrumenten beim Bearbeiten von Zahnschmelz zu Mikrorissen, so dass beim Finieren des Randbereiches der Kompositfüllung mit Diamantinstrumenten die angrenzenden Schmelzbezirke nach Möglichkeit geschont werden sollten [29, 111]. Eine iatrogene Zahnschmelzabrasion wurde von Mitchell et al. [66] jedoch nicht nur bei ultrafeinen Diamantfinierern, sondern auch bei Hartmetallfinierern beobachtet.

Ebenso wurden die nach Anwendung von Diamantfinierern auftretenden, größeren Oberflächenrauigkeiten in der Literatur mehrfach als Nachteil dieses Verfahrens genannt [25, 38, 40, 47, 56]. Im Gegensatz dazu konnten andere Autoren keinen Unterschied zwischen den Rautiefen nach Einsatz von Dia-

mant- und Hartmetallfinierern feststellen [54, 61, 77]. Lediglich in einer Studie wurden mit Diamantfinierern sogar glattere Oberflächen erzielt als mit Hartmetallfinierern [29].

Hinsichtlich der Verwendung von Hartmetallfinieren zur Ausarbeitung von Kompositen gibt es in der Literatur unterschiedliche Auffassungen, wobei vor allem der Komposittyp eine Rolle spielt. Während sie bei Mikrofüllerkompositen überwiegend negativ beurteilt werden [54, 61], wird ihre Anwendung bei Hybridkompositen befürwortet [5, 6, 40, 43, 49, 56].

Die teilweise voneinander abweichenden Ergebnisse der verschiedenen Studien zur Ausarbeitung von Oberflächen sind daher möglicherweise einerseits auf die unterschiedlichen Materialeigenschaften der verwendeten Komposittypen zurückzuführen, andererseits aber auch auf die Vielzahl der auf dem Markt befindlichen Ausarbeitungsinstrumente, die fehlende Normierung der Untersuchungsbedingungen sowie die zum Teil stark differierenden Umdrehungszahlen, mit denen die einzelnen Ausarbeitungsinstrumente betrieben wurden.

Weitgehende Einigkeit besteht im Schrifttum darüber, dass rotierende Steine aus Aluminiumoxid oder Siliciumcarbid zur Ausarbeitung von Kompositoberflächen nicht geeignet sind, da sie häufig zu Mikrorissen führen. Ebenso werden Füller und Vorpolymerisate aus der Kompositoberfläche herausgeschlagen, was vermutlich durch den starren und unwuchtigen Instrumentenkörper und die daraus resultierende „schlagende“ Bearbeitungsweise zu erklären ist [54, 61].

2.3.2 Poliersysteme

Zur Politur von Kompositoberflächen können verschiedene rotierende Instrumente eingesetzt werden. Generell wird hierbei zwischen flexiblen aluminiumbeschichteten Disks, diamantimprägnierten Filzpolierern, Gummi- bzw. Silikon-

polieren, siliciumcarbidimprägnierten Polierbürsten sowie Polierpasten auf Diamant- oder Aluminiumoxidbasis unterschieden [42].

Die Eignung dieser Systeme zur Politur von Kompositoberflächen wurde in einer Vielzahl von Studien untersucht. Die Ergebnisse sollen als Grundlage für die Bewertung der Resultate der vorliegenden Untersuchung im Diskussionsteil zusammengefasst werden, wobei aufgrund der Vielzahl der auf dem Markt verfügbaren Verfahren in den tabellarischen Übersichten nur Poliersysteme Berücksichtigung finden, die auch in der vorliegenden Studie untersucht werden.

2.3.2.1 Flexible aluminiumoxidbeschichtete Disks

Bei Verwendung der flexiblen aluminiumoxidbeschichteten Disks konnte übereinstimmend ein sehr guter Glättungseffekt bei allen Komposittypen beobachtet werden, wobei in der Literatur bei alleiniger Verwendung des Sof-Lex-Poliersystems ohne vorherige Ausarbeitung Mittenrauwerte R_a zwischen $0,045 \mu\text{m}$ [102] und $0,70 \mu\text{m}$ [45] erzielt wurden (Tabelle 1). Die Uneinheitlichkeit der Rauigkeitswerte ist auf unterschiedliche Studienansätze (z.B. Verwendung unterschiedlicher Komposite, Art der Prüfkörper, Bearbeitungsmethoden, Messmethoden, Messgeräte) zurückzuführen, die das Ergebnis der quantitativen Rauigkeitsmessung deutlich beeinflussen können. In einigen Studien erfolgte vor der Politur mit flexiblen Disks eine Ausarbeitung mit Diamant- ($0,0034 \mu\text{m}$ [36] bis $0,61 \mu\text{m}$ [1]) oder Hartmetallfinierern ($0,08 \mu\text{m}$ [99] bis $0,67 \mu\text{m}$ [33]) bzw. mit einer Kombination aus beiden Verfahren ($0,6 \mu\text{m}$ [44] bis $0,69 \mu\text{m}$ [43]), was jedoch nicht zu einer zusätzlichen Verbesserung der Oberflächenqualität im Vergleich zur alleinigen Anwendung der Disks führte. Da die flexiblen Disks abgestuft nach Körnung in verschiedenen Größen angeboten werden, sind Ausarbeitung und Politur unter Einsatz eines einzigen Systems möglich.

Tjan und Chan [100] führten den guten Glättungseffekt der Disks auf die im Vergleich zu den üblichen Kompositfüllstoffen signifikant größere Härte der Aluminiumoxidpartikel zurück. Kaplan et al. [49] konnten zeigen, dass die aluminiumoxidbeschichteten Disks die Füllkörper und die organische Matrix gleichmäßig einebnen, was zu einer qualitativ hochwertigen Oberfläche führt.

Ein Nachteil der flexiblen Disks besteht darin, dass sie zur Ausarbeitung und Politur konkaver oder anatomisch geformter Flächen wie z.B. dem Fissurenrelief von Seitenzähnen, nur bedingt geeignet sind, da aufgrund der großflächigen Auflage der Disks eine punktuelle Oberflächenbearbeitung nicht möglich ist [12, 39, 61, 88, 100]. Ein weiterer Nachteil des Sof-Lex-Disk-Systems ist, dass der zentrale Metallring, welcher die flexible Scheibe auf dem Halter fixiert, bei der Bearbeitung zu Destruktionen auf der Kompositoberfläche führen kann [20].

Aufgrund ihres sehr guten Poliereffektes bei glatten und konvexen Flächen werden Sof-Lex-Disks wie auch in der vorliegenden Studie häufig als Referenzverfahren zur Evaluierung neuer Komposittypen herangezogen [1, 43, 44, 45, 55, 97].

2.3.2.2 Diamantimprägnierte Filzpolierer

Die Eignung von diamantimprägnierten Filzpolierern zur Politur von Feinpartikelhybridkompositen wurde von Jung [43, 44, 45] in verschiedenen Studien untersucht. Bei vorangegangener Ausarbeitung mit zwei oder mehr Finierern in verschiedenen Kombinationen (nur Diamantfinierer verschiedener Korngrößen, nur Hartmetallfinierer mit verschiedener Schneidenanzahl, zwei Diamant- und ein Hartmetallfinierer) konnten mit dem Diafix-oral-Polierer stets niedrigere Mittenrauwerte erzielt werden als mit der Referenzmethode „Sof-Lex-Disks“. Lediglich bei der Ausarbeitung mit einem 30 µm-Diamantfinierer war die Oberflächenrauigkeit deutlich größer als bei der Verwendung flexibler Disks (Tabelle 2).

Tab. 1: Literaturübersicht: Arithmetischer Mittenrauwert nach Kompositbearbeitung mit Sof-Lex-Disks

Autor	Instrumente	R _a (µm)	Komposit	Profilometer
<i>ohne vorherige Ausarbeitung</i>				
Tjan und Chan [100]	Sof-Lex-Disks	0,11 ± 0,03	Herculite XRV, Kerr	Mitutoyo Surtest 3 Profilometer
Schmid et al. [88]	Sof-Lex-Disks	0,25	Brilliant Dentin, Coltène	Talysurf 10, Rank Taylor Hobson
Stoddard et al. [97]	Sof-Lex-Disks	0,45	Bis-Fil I, BISCO; Ful-Fil, Caulk; P-30 Heliomolar, 3M Vivadent	Surfanalyzer 4000, Federal Products
Berastegui et al. [5]	Sof-Lex-Disks	0,29 ± 0,18	Herculite XRV, Kerr	Tester T 20 Profilometer, Hommel
Jefferies et al. [34]	Sof-Lex-Disks	0,13 ± 0,03	Silux Plus 3M Dental	Surftest 201, Mitutoyo
Tate et al. [98]	Sof-Lex-Disks	0,12 ± 0,04	Herculite XR, Kerr	Talysurf 10, Rank Taylor Hobson
Bouvier et al. [8]	Sof-Lex-Disks	0,61 ± 0,27	Filtek Z100, 3M Dental	Perthometer S8P, Mahr
Hoelscher et al. [32]	Sof-Lex-Disks	0,50 ± 0,30	Prisma TPH Dentsply,	Surfanalyzer System 4000, Federal Products
Turssi et al. [102]	Sof-Lex-Disks	0,045	Charisma, Heraeus Kulzer	RUG 03, Prazis Aro S.A.
Rosen et al. [85]	Sof-Lex-Disks	0,36	Filtek Z100, 3M Dental	Talysurf 10, Rank Taylor Hobson
Marigo et al. [65]	Sof-Lex-Disks	0,134	Filtek Z250, 3M Dental	Zygo 3-D surfaprofiler, Zygo New View
	Sof-Lex-Disks	0,124	Silux Plus, 3M Dental	Zygo 3-D surfaprofiler, Zygo New View
Neme et al. [69]	Sof-Lex-Disks	0,21 ± 0,02	TPH Spektrum, Dentsply	Talysurf 10, Rank Taylor Hobson
Yap und Mok [112]	Sof-Lex-Disks	0,12 ± 0,02	TPH Spektrum, Dentsply	Surtest SV-400, Mitutoyo
Ryba et al. [87]	Sof-Lex-Disks	0,102 ± 0,041	Filtek Z100, 3M Dental	Surfanalyzer System 4000, Federal Products
Jung et al. [45]	Sof-Lex-Disks	0,70 ± 0,15	Herculite XRV, Kerr	Perthometer S8P, Mahr

Tab. 1 (Forts.): Literaturübersicht: Arithmetischer Mittenrauwert nach Kompositbearbeitung mit Sof-Lex-Disks

Autor	Instrumente	R _a (µm)	Komposit	Profilometer
<i>Vorherige Ausarbeitung mit Diamantfinierer</i>				
Ashe et al. [1]	DF (50/25 µm) + Sof-Lex-Disks	0,61 ± 0,20	Heliomolar-RO, Vivadent	Mitutoyo Surtest 401 Profilometer
Jung et al. [44]	DF (30 µm) + Sof-Lex-Disks	ca. 0,6 ± 0,05	Herculite XRV, Kerr	Perthometer S8P, Mahr
Jonoit et al. [36]	DF (20/15µm) + Sof-Lex-Disks	0,034 ± 0,013	Charisma, Heraeus Kulzer; Filtek Z100, 3M Dental; Prisma TPH, De Trey Dentsply	Nanosurf 488, SAS Technologies
Roeder et al. [84]	DF (30 µm) + Sof-Lex-Disks	0,16 ± 0,12	Filtek Z100, 3M Dental	Talysurf 10, Rank Taylor Hobson
Özgünaltay et al. [73]	DF (30 µm) + Sof-Lex-Disks	0,15 ± 0,02	Filtek Z250, 3M Dental	Surtest 402, Mitutoyo
<i>Vorherige Ausarbeitung mit Hartmetallfinierer</i>				
Tate und Powers [99]	HMF (12 Schneiden) + Sof-Lex-Disks	0,08 ± 0,05	Charisma, Heraeus Kulzer	Talysurf 10, Rank Taylor Hobson
Hondrum und Fernandez [33]	HMF (12 Schneiden) + Sof-Lex-Disks	0,67 ± 0,17	Prisma APH Dentsply	Surfanalyzer System 4000, Ferederal Products
Özgünaltay et al. 2003	HMF (30 Schneiden) + Sof-Lex-Disks	0,16	Filtek Z250, 3M Dental	Surtest 402, Mitutoyo
<i>Vorherige Ausarbeitung mit Diamant- und Hartmetallfinierer</i>				
Jung et al. [44]	DF (24-40/15-30 µm) + HMF (16 Schneiden) + Sof-Lex-Disks	0,6	Herculite XRV, Kerr	Perthometer S8P, Mahr
Jung [43]	DF (30 µm) + HMF (16 Schneiden) + Sof-Lex-Disks	0,69	Tetric Ceram, Vivadent	Perthometer S8P, Mahr

Tab. 2: Literaturübersicht: Arithmetischer Mittenrauwert nach Kompositbearbeitung mit diamantimprägnierten Filzpolierern

Autor	Instrumente	R _a (µm)	Komposit	Profilometer
Jung et al. [44]	DF (30 µm) + Diafix-oral	1,7	Herculite XRV, Kerr	Perthometer S8P, Mahr
	DF (30/15 µm) + Diafix-oral	0,45	Herculite XRV, Kerr	Perthometer S8P, Mahr
	DF (30/15/8 µm) + Diafix-oral	0,35	Herculite XRV, Kerr	Perthometer S8P, Mahr
	HF (12 Schneiden) + Diafix-oral	0,35	Herculite XRV, Kerr	Perthometer S8P, Mahr
	HF (12/30 Schneiden) + Diafix-oral	0,25	Herculite XRV, Kerr	Perthometer S8P, Mahr
	DF (30 µm) + HF (30 Schneiden) + Diafix-oral	0,25	Herculite XRV, Kerr	Perthometer S8P, Mahr
	DF (30 µm) + Sof-Lex-Disks	0,6	Herculite XRV, Kerr	Perthometer S8P, Mahr
Jung [43]	DF (30 µm) + Diafix-oral	1,11	Tetric Ceram, Vivadent	Perthometer S8P, Mahr
	DF (30/20 µm) + Diafix-oral	0,54	Tetric Ceram, Vivadent	Perthometer S8P, Mahr
	DF (30 µm) + HF (16 Schneiden) + Diafix-oral	0,50	Tetric Ceram, Vivadent	Perthometer S8P, Mahr
	DF (30 µm) + Sof-Lex-Disks	0,70	Tetric Ceram, Vivadent	Perthometer S8P, Mahr
	DF (30/20 µm) + Sof-Lex-Disks	0,71	Tetric Ceram, Vivadent	Perthometer S8P, Mahr
	DF (30 µm) + HF (16 Schneiden) + Sof-Lex-Disks	0,69	Tetric Ceram, Vivadent	Perthometer S8P, Mahr
Jung et al. [45]	DF (30 µm) + Diafix-oral	2,1	Herculite XRV, Kerr	Perthometer S8P, Mahr
	DF (30/20 µm) + Diafix-oral	0,8	Herculite XRV, Kerr	Perthometer S8P, Mahr
	DF (30 µm) + HF (16 Schneiden) + Diafix-oral	0,5	Herculite XRV, Kerr	Perthometer S8P, Mahr
	Sof-Lex-Disks	0,7	Herculite XRV, Kerr	Perthometer S8P, Mahr
Jung et al. [46]	DF (30 µm) + HF (8-20 Schneiden) + Diafix-oral	1,11	Herculite XRV, Kerr	Perthometer S8P, Mahr

2.3.2.3 Gummi- bzw. Silikonpolierer

Die auf dem Dentalmarkt erhältlichen Gummi- bzw. Silikonpolierer unterscheiden sich zum Teil beträchtlich in ihrer Zusammensetzung, wobei in eine Gummi- oder Silikonmatrix Partikel verschiedenster Körngrößen eingebunden sein können. Bislang am häufigsten untersucht sind Gummi- bzw. Silikonpolierer mit Silicium- [25, 70, 88, 97, 100] oder Aluminiumoxidpartikeln [1, 32, 65, 84, 97].

Bei der Politur eines Hybridkomposites mit einem Polierer mit Siliciumoxidabrasivpartikeln konnten sowohl Northeast und van Noort [70] als auch Tjan und Chan [100] rasterelektronenmikroskopisch einen selektiven Abtrag der weichen Kompositmatrix beobachten, wobei die Füllkörper praktisch unbearbeitet blieben. Auch in quantitativen Studien wurden mit Gummi- bzw. Silikonpolierern mit Siliciumoxidpartikeln größere Mittenrauwerte erzielt als bei Verwendung von Sof-Lex-Disks [97, 100], die auch hier als Referenzverfahren herangezogen wurden. Da Polierer mit Abrasivpartikeln aus Siliciumoxid eine geringe Härte aufweisen, wird ihre Anwendung nur für mikrogefüllte Komposite empfohlen [25, 70, 88, 97, 100].

Ebenso ist nach bisherigen Ergebnissen ist der Poliereffekt bei Verwendung von Silikonpolierern mit Abrasivpartikeln aus Aluminiumoxid (Shofu CompoSite, Enhance) nicht zufriedenstellend. In der Mehrheit der durchgeführten Untersuchungen wurden mit diesem Verfahren höhere Mittenrauwerte erzielt als mit dem Sof-Lex-Poliersystem [1, 8, 32, 84, 87, 97], während ein besseres Abschneiden der Polierer mit Aluminiumoxidpartikeln eher selten beobachtet werden konnte [36, 65]. Sehr gute Ergebnisse wurden mit dem mehrstufigen Silikonpoliersystem Astropol mit Partikeln aus SiC, Al₂O₃, TiO₂, FeO und Diamant erzielt [45] (Tabelle 3).

Ebenso auf dem Markt erhältlich sind einstufige Gummi- bzw. Silikonpolierer mit Diamant-, Siliciumcarbid- und Zirconiumoxidpartikeln, für die keine vergleichenden Studien zum Poliereffekt ausfindig gemacht werden konnten. Ihr Einfluss auf die Qualität von Feinpartikelhybridkompositoberflächen wurde in der vorliegenden Studie untersucht.

Tab. 3: Literaturübersicht: Arithmetischer Mittenrauwert nach Kompositbearbeitung mit Gummi- bzw. Silikonpolierern

Autor	Instrumente	R _a (µm)	Komposit	Profilometer
<i>Siliciumoxidpartikel</i>				
Tjan und Chan [100]	Vivadent	0,19 ± 0,06	Herculite, Kerr	Surftest III, Mitutoyo
	Sof-Lex-Disks	0,11 ± 0,03	Herculite, Kerr	Surftest III, Mitutoyo
Stoddard und Johnson [97]	Vivadent	0,70	Bis-Fil I, BISCO	Surfanalyzer 4000, Federal Products
	Sof-Lex-Disks	0,40	Bis-Fil I, BISCO	Surfanalyzer 4000, Federal Products
<i>Aluminiumoxidpartikel</i>				
Bouvier et al. [8]	Enhance	1,01 ± 0,25	Z-100, 3M	Perthometer, Mahr
	Sof-Lex-Disks	0,61 ± 0,27	Z-100, 3M	Perthometer, Mahr
Hoelscher et al. [32]	Enhance	0,65 ± 0,30	Prisma TPH, Caulk/Dentsply	Surfanalyzer 4000, Federal Products
	Sof-Lex-Disks	0,50 ± 0,30	Prisma TPH, Caulk/Dentsply	Surfanalyzer 4000, Federal Products
Joniot et al. [36]	DF + Enhance	0,023 ± 0,0092	Charisma, Kulzer; Prisma TPH, Caulk/Dentsply; Z-100, 3M	Nanosurf 488, SAS Technologies
	DF + Hawe Neos Disks	0,026 ± 0,0066	Charisma, Kulzer; Prisma TPH, Caulk/Dentsply; Z-100, 3M	Nanosurf 488, SAS Technologies
	DF + Sof-Lex-Disks	0,034 ± 0,013	Charisma, Kulzer; Prisma TPH, Caulk/Dentsply; Z-100, 3M	Nanosurf 488, SAS Technologies
Roeder et al. [84]	DF + Enhance	0,42 ± 0,10	Z-100, 3M	Talysurf 10, Taylor-Hobson
	DF + Sof-Lex-Disks	0,16 ± 0,12	Z-100, 3M	Talysurf 10, Taylor-Hobson
Marigo et al. [65]	Enhance	0,105	Filtek Z250, 3M Vivadent	Zygo New View 5000, Lot Oriel
	Sof-Lex-Disks	0,134	Filtek Z250, 3M Vivadent	Zygo New View 5000, Lot Oriel
Ryba et al. [87]	Enhance	0,147	Z-100, 3M	Surfanalyzer 4000, Federal Products
	Sof-Lex-Disks	0,102	Z-100, 3M	Surfanalyzer 4000, Federal Products

Tab. 3 (Forts.): Literaturübersicht: Arithmetischer Mittenrauwert nach Kompositbearbeitung mit Gummi- bzw. Silikonpolierern

Autor	Instrumente	R _a (µm)	Komposit	Profilometer
<i>Aluminiumoxidpartikel</i>				
Stoddard und Johnson [97]	Shofu CompoSite	0,90	Bis-Fil I, BISCO	Surfanalyzer 4000, Federal Products
	Sof-Lex-Disks	0,40	Bis-Fil I, BISCO	Surfanalyzer 4000, Federal Products
Ashe et al. [1]	DF (50/25 µm) + Shofu CompoSite	0,87 ± 0,26	Heliomolar-RO, Vivadent	Mitutoyo Surtest 401 Profilometer
	DF (50/25 µm) + Sof-Lex-Disks	0,61 ± 0,20	Heliomolar-RO, Vivadent	Mitutoyo Surtest 401 Profilometer
<i>Mehrstufiges Poliersystem mit verschiedenen Partikeln aus SiC, Al₂O₃, TiO₂, FeO, Diamant</i>				
Jung et al. [45]	DF (30 µm) + Astropol	0,5	Herculite XRV, Kerr	Perthometer S8P, Mahr
	DF (30/20 µm) + Astropol	0,3	Herculite XRV, Kerr	Perthometer S8P, Mahr
	DF (30 µm) + HF (16 Schneiden) + Astropol	0,3	Herculite XRV, Kerr	Perthometer S8P, Mahr
	Sof-Lex-Disks	0,7	Herculite XRV, Kerr	Perthometer S8P, Mahr

2.3.2.4 Polierbürsten mit eingearbeiteten Abrasivkörpern

Die Politur von Kompositoberflächen mit Polierbürsten, bei denen der Abrasivkörper in Borsten eingearbeitet ist, stellt ein neueres Verfahren zur Oberflächenpolitur dar, so dass es hierzu bislang kaum Untersuchungen gibt. In einer Untersuchung von Krejci et al. [55] waren die Rautiefen bei Verwendung des Occlubrush-Polierbürstchens mit einem R_a-Wert von 0,31 geringfügig größer als bei einer Politur mit flexiblen Disks (R_a = 0,18), jedoch lagen beide Werte unterhalb der Rauigkeit von natürlichem Zahnschmelz [55]. Jung et al. [46] konnten in einer In-vivo-Studie zeigen, dass sich bei der Politur von je 10 direkten Klasse II-Restaurationen aus dem Hybridkomposite Herculite die verwendeten Verfahren (Diafix-oral, MPS-Gel, P 403-W, Occlubrush) nicht statistisch signifikant hinsichtlich der erzielten Oberflächenrauigkeit unterschieden. Dennoch war der bei Einsatz des Occlubrush-Bürstchens ermittelte Mittenrau-

wert mit 1,19 μm tendenziell am höchsten (Tabelle 4). Schmidlin et al. [89] belegten in einer qualitativen Untersuchung ebenfalls die gute Effizienz von siliciumcarbidimprägnierten Polierbürsten bei der Politur von Kompositoberflächen unter Wasserkühlung. Riefen oder Rillen waren nicht zu beobachten.

Tab. 4: Literaturübersicht: Arithmetischer Mittenrauwert nach Kompositbearbeitung mit dem Occlubrush-Polierbürstchen

Autor	Instrumente	R _a (μm)	Komposit	Profilometer
Krejci et al. [55]	DF (40/15/8 μm) + Occlubrush-Polierbürstchen	0,31	Tetric Ceram, Vivadent	Talysurf 50, Rank Taylor Hobson
	Sof-Lex-Disks	0,18	Tetric Ceram, Vivadent	Talysurf 50, Rank Taylor Hobson
Jung et al. [46]	DF (30 μm) + HF (8-20 Schneiden) + Occlubrush-Polierbürstchen	1,19	Herculite XRV, Kerr	Perthometer S8P, Mahr

2.3.2.5 Polierpasten

Die Effizienz und Eignung von Polierpasten zur Politur von Kompositoberflächen war nicht Gegenstand der vorliegenden Studie, so dass auf eine ausführliche tabellarische Literaturübersicht an dieser Stelle verzichtet wird. In der Mehrzahl der Studien schnitten Polierpasten etwa genauso gut ab wie flexible Disks [36, 65, 87, 102]. Nur wenige Untersuchungen zeigten Unterschiede auf, wobei von Roeder et al. [84] schlechtere und von Hoelscher et al. [32] bessere Ergebnisse erzielt wurden als bei Verwendung von Sof-Lex-Disks.

2.4 Methoden zur Beurteilung von Kompositoberflächen

2.4.1 Quantitative Verfahren

Die in der Zahnheilkunde am häufigsten eingesetzte Methode zur quantitativen Beurteilung von Oberflächen ist die sogenannte Profilometrie, bei der Profilunregelmäßigkeiten im elektronischen Tastschnittverfahren erfasst werden.

Das Abtasten der Oberfläche kann mechanisch mittels einer Tastspitze erfolgen, wobei Mikrotaster mit Tastspitzenradien in einer Größenordnung von 2,5-10 μm [33, 56, 100] zur Verfügung stehen. In Anbetracht der Tatsache, dass der Tastspitzenradius häufig ein Vielfaches der gemessenen Rautiefen beträgt, muss davon ausgegangen werden, dass die Messwerte nicht der Realität entsprechen [33, 56, 100]. Darüber hinaus sind mechanische Taster aufgrund der Tastspitzengeometrie nicht in der Lage, steile Profile abzugreifen, weshalb es zu einem Abflachen von steilen oder negativen Profilwinkeln kommt [37].

Als Alternative zum mechanischen Abtasten stehen optische Mikrotaster (sog. Lasertaster) zur Verfügung, die ein berührungsloses Erfassen kleiner Profilunregelmäßigkeiten ermöglichen [36, 40, 41, 83]. Hierbei wird ein Laserstrahl mit einer Wellenlänge von 780 nm auf die Probenoberfläche geleitet. Diese wird von einem Mikroobjektiv abgebildet und führt im Fokusedetektor zu einem Signal, das einen im Tastgehäuse integrierten Elektromotor so steuert, dass der Fokus (Durchmesser 1 μm) auf dem abgetasteten Oberflächenpunkt zu liegen kommt. Die Profilunregelmäßigkeiten auf der zu messenden Kompositoberfläche führen zu einer Nachfokussierung des Lasers durch Vertikalbewegungen der Tastspitze. Diese Auslenkungen werden mit Hilfe eines Messsystems in ein analoges, elektrisches Signal umgewandelt und zur Messwertermittlung verarbeitet. Die Vorteile des Lasertasters liegen in der berührungslosen Abtastung der zu messenden Oberfläche. So lassen sich Destruktionen auf der Oberfläche vermeiden, wie sie bereits nach einmaliger Abtastung unter Oberflächen-

kontakt mit einem mechanischen Taster nachweisbar sind. Weiterhin kann durch das berührungslose Abtasten das Phänomen der Oberflächenpressung vermieden werden, das beim mechanischen Abtasten durch die elastische Verformung der Oberfläche infolge des Tasterkontaktes mit der zu messenden Oberfläche entsteht. Sowohl die Oberflächendestruktion als auch die Oberflächenpressung führen zu Messungenauigkeiten [41, 75].

Die Beschreibung von Oberflächenrauigkeiten erfolgt durch definierte Oberflächenparameter wie dem arithmetischen Mittenrauwert (R_a), der maximalen Rautiefe (R_{max}) oder der gemittelten Rautiefe (R_z). Diese werden auch als Vertikalparameter bezeichnet, da sie die Oberflächen nur durch Profilamplituden charakterisieren. In der Mehrzahl der Studien zur profilometrischen Beurteilung dentaler Oberflächen werden die Ergebnisse anhand des arithmetischen Mittenrauwertes (R_a) dargestellt (siehe Tabellen 1 bis 4), während andere Parameter wie R_{max} [5, 33, 38, 103] oder R_z [5, 38, 106, 107] in der Literatur nur eine untergeordnete Rolle spielen.

Im Gegensatz zu den genannten Vertikalparametern handelt es sich beim Profillängenverhältnis (LR) sowohl um ein Vertikal- als auch um ein Horizontalmaß. Das Profillängenverhältnis gibt nach DIN 4762 [17] das Verhältnis der gestreckten Länge des Profils zur Bezugsstrecke an, wobei die gestreckte Länge des Oberflächenprofils definiert ist als die Länge, die sich ergeben würde, wenn man das innerhalb der Bezugsstrecke liegende Profil zu einer geraden Linie streckt. Da das Profillängenverhältnis sowohl die vertikale und horizontale Oberflächendimension als auch die veränderte Anzahl von Profilunregelmäßigkeiten erfasst, ist seine Aussagekraft bezüglich der Oberflächenrauigkeit den Vertikalparametern überlegen. Dennoch kommt das Profillängenverhältnis in der Literatur nur selten zur Anwendung [38, 40, 43, 44].

Weitere Möglichkeiten, die Oberflächenrauigkeit dreidimensional zu beschreiben, sind z.B. der von Pantke et al. [74, 81] entwickelte Zerklüftungsfaktor, welcher Profilunregelmäßigkeitsdichte und Rautiefe miteinander kombiniert. Mar-

gio et al. [65] setzten zur dreidimensionalen Oberflächenauswertung Parameter wie „root mean square value“ (rms), „greatest distance peak valley“ (PV), „measure of profile about the center line“ (Rsk) und „measure of steepness of the amplitude density curve of the roughness profile“ (Rku) ein.

Insgesamt liegen die Vorteile der profilometrischen Untersuchung in der großen Genauigkeit der Messmethode, die durch Auswertung unterschiedlicher Kenngrößen eine exakte Quantifizierung der Oberflächenrauigkeiten ermöglicht. Die zeilenartige Abtastung der zu messenden Oberfläche ist hingegen als Nachteil der profilometrischen Untersuchung anzusehen, da eine flächenartige Erfassung nur näherungsweise durch mehrere parallele Tastschnitte möglich ist. Darüber hinaus haben Faktoren wie das verwendete Tastsystem (Laser vs. mechanische Tastspitze) starken Einfluss auf die Größe der gemessenen Rautiefen [106, 107], so dass die Vergleichbarkeit der Ergebnisse aus verschiedenen Untersuchungen eingeschränkt ist.

Neben der profilometrischen Untersuchung gibt es mit der Lichtreflexionsmessung und der Gasadsorption noch weitere quantitative Untersuchungsmethoden. Die Lichtreflexionsmessung nutzt das Phänomen, dass eine raue Oberfläche das einfallende Licht stärker streut als eine glatte. Eine glatte, ideale Oberfläche würde bei der Lichtreflexionsmessung das Licht im gleichem Winkel und in der gleichen Intensität reflektieren, wie es eingefallen ist. Eine Veränderung des Ausfallswinkels oder eine Verminderung der Lichtintensität deuten dagegen auf Rauigkeiten der zu beurteilenden Oberfläche hin. Da bei dieser Methode keine Messung der tatsächlichen Rautiefen möglich ist, wird sie zur Beurteilung von Kompositoberflächen nur selten verwendet [33, 71]. Darüber hinaus kann mittels Gasadsorption das Gasvolumen gemessen werden, das zur Bildung eines Monolayers auf der Oberfläche erforderlich ist. Das Verfahren liefert jedoch keine definitive Aussage über vorhandene Rautiefen [72].

2.4.2 Qualitative Verfahren

Zusätzlich zur quantitativen Oberflächenbeurteilung sollte nach Auffassung einer Vielzahl von Autoren eine qualitative Untersuchung vorgenommen werden, wobei aufgrund der im Vergleich zum Lichtmikroskop um den Faktor 300 größeren Tiefenschärfe am häufigsten eine rasterelektronenmikroskopische Auswertung der Oberfläche durchgeführt wird [1, 32, 33, 40, 43, 44, 45, 47, 55, 70, 73, 84, 88, 89, 97, 99, 100].

Beispielsweise konnten, wie an anderer Stelle bereits erwähnt, Northeast und van Noort [70] sowie Tjan und Chan [100] bei der Politur eines Hybridkomposites mit einem Silikonpolierer einen rein selektiven Abtrag der weichen Kompositmatrix beobachten, während die Füllkörper praktisch unbearbeitet blieben. Dieser relevante Sachverhalt hätte mit einer rein quantitativen Auswertung nicht erfasst werden können. Umgekehrt ist eine quantitative Beurteilung der Oberflächenrauigkeiten bei der rasterelektronenmikroskopischen Auswertung nur bedingt möglich, da die Betrachtung der Oberfläche von mehreren Faktoren, wie z.B. dem Neigungswinkel der Oberfläche, abhängig ist [25]. Aus diesem Grund sollte die rasterelektronenmikroskopische Untersuchung stets nur in Ergänzung der quantitativen Untersuchung durchgeführt werden [61, 74, 100, 103].

Aufgrund der Vor- und Nachteile beider Verfahren kamen in den meisten Studien sowohl die Profilometrie als auch die rasterelektronenmikroskopische Untersuchung zur Anwendung [1, 33, 38, 40, 43, 44, 45, 47, 55, 65, 70, 73, 84, 88, 89, 97, 99, 100].

3 Material und Methode

3.1 Verwendetes Komposit

In der vorliegenden Untersuchung wurde das Feinpartikelhybridkomposit Tetric Ceram (Vivadent, Schaan, Liechtenstein) verwendet, das in Drehtubenform zu je 4 g in den Farben A2 und A3 vorlag (Charge 546244 (A2) und 546245 (A3)).

Die Monomermatrix von Tetric Ceram besteht aus Bis-GMA, Urethandimethacrylat und Triethylenglycoldimethacrylat (20,2 Gew.%). Die anorganischen Füllstoffe bestehen aus Bariumglas, Ytterbiumfluorid, Ba-Al-Fluorsilikatglas, hochdisperssem Siliciumdioxid und sphäroidem Mischoxid (79,0 Gew.%). Zusätzlich enthalten sind Katalysatoren, Stabilisatoren und Pigmente (0,8 Gew.%).

Der Gesamtgehalt an anorganischem Füller beträgt 80 Gew.% bzw. 60 Vol.%. Die Partikelgröße liegt zwischen 0,04-3,0 µm. Die mittlere Partikelgröße beläuft sich auf 0,7 µm.

3.2 Herstellung der Prüfkörper

Aus dem Kompositmaterial wurden insgesamt 95 Prüfkörper mit den Ausmaßen 7 x 7 x 4 mm hergestellt. Diese wurden mit dem neuwertigen Polymerisationsgerät Optilux 400, Modell VCL 401 (Demetron, Danbury, USA) an ihrer Ober- und Unterseite jeweils 40 sec lang ausgehärtet.

Nach der Polymerisation wurde die füllstoffarme Oberflächenschicht eines jeden Prüfkörpers mit Hilfe eines Polierrotors A-250 (Jean Wirtz, Düsseldorf) bei einer Umdrehungszahl von 120 U/min abgetragen, wobei jeweils über eine Dauer von 20 sec unter Wasserkühlung zuerst eine 600-Grit- (Korngröße 22 μm) und anschließend eine 400-Grit-Sandpapierscheibe (Korngröße 14 μm) (Leco Corporation, St. Joseph, USA) zur Anwendung kam.

Die Probekörper wurden durch einen Luftstrom getrocknet und anschließend mit einem Stereomikroskop auf Fehler wie Lufteinschlüsse oder Fremdkörpereinlagerungen untersucht. Fehlerhafte Prüfkörper wurden verworfen und so lange neu angefertigt, bis 95 einwandfreie Kompositprüfkörper für die Untersuchung zur Verfügung standen. Diese wurden bis zur Durchführung der Experimente bei Zimmertemperatur und 100% Luftfeuchtigkeit aufbewahrt.

3.3 Instrumente der rotierenden Bearbeitung

3.3.1 Instrumente der Ausarbeitung

Die initiale Bearbeitung als Simulation der Ausarbeitung erfolgte mit drei Finierern eines Herstellers (Geb. Brassler, Lemgo), wobei es sich um zwei Diamantfinierer (DF) und einen Hartmetallfinierer (HMF) handelte. Die Abbildungen 1 bis 3 zeigen die verwendeten Finierer in makroskopischer und rasterelektronenmikroskopischer Darstellung. Die Diamantfinierer hatten Schleifkörperkornungen von 24-40 μm bzw. 15-30 μm , der Hartmetallfinierer wies 16 gerade Schneiden auf (Tabelle 5). Alle Finierer hatten die Form einer langausgezogenen Spitze mit einem Arbeitsteil von 9 mm.

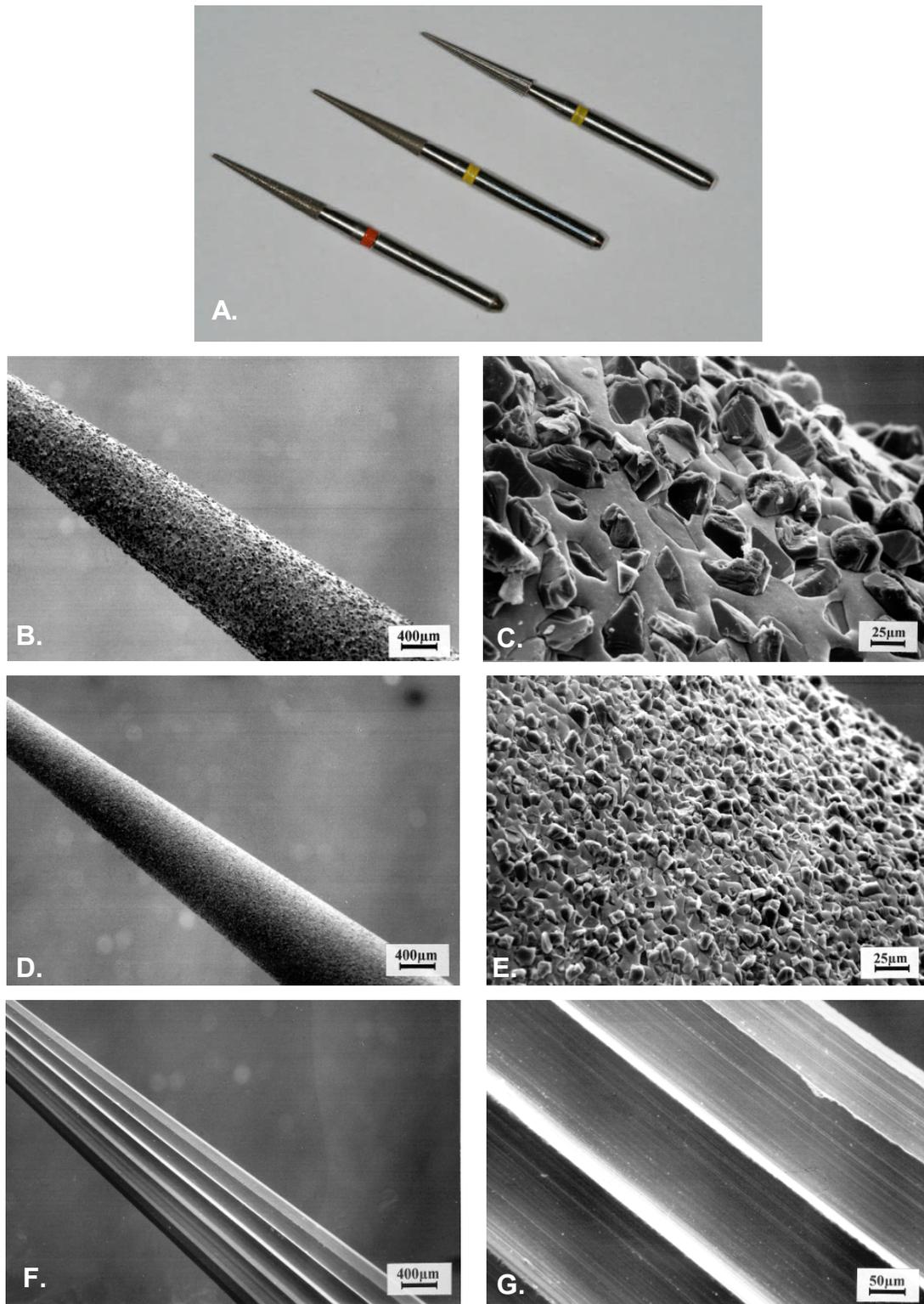


Abb. 1: Ausarbeitungsinstrumente

- A. Makroskopische Darstellung: Diamantfinierer 24-40 μm (links), Diamantfinierer 15-30 μm (mitte), Hartmetallfinierer mit 16 Schneiden (rechts)
B., C. REM-Aufnahmen der Diamantfinierer 24-40 μm
D., E. REM-Aufnahme der Diamantfinierer 15-30 μm
F., G. REM-Aufnahmen der Hartmetallfinierer mit 16 Schneiden

Tab. 5: Eigenschaften der verwendeten Finierer

Nr.	Kenn-Nr.	Typ	Finierertyp	Schneiden bzw. Korngrößen	Farbcode
1	8859 314 014	Finierer	Diamant	24-40 µm	rot
2	859 EF 314 014	Finierer	Diamant	15-30 µm	gelb
3	135 F 314 014	Finierer	Hartmetall	16 Schneiden	gelb

3.3.2 Instrumente für die Politur

Bei der Politur der Prüfkörper kamen sehr verschiedene Polierverfahren zum Einsatz. Es waren dies im einzelnen (Tabelle 6):

- Shofu CompoSite/CompoSite Fine (Shofu Dental GmbH, Ratingen)
Die Polierer Shofu CompoSite/CompoSite Fine (Abbildung 2) gehören zu der Gruppe der Silikonpolierer. Das Set setzt sich aus zwei Einheiten zusammen, die sich farblich unterscheiden. Der graue Vorpolierer hat eine Korngröße von 35 µm, wobei die in das Silikon eingebetteten Abrasivpartikel aus Aluminiumoxid bestehen. Beim zweiten Polierer handelt es sich um einen Hochglanzpolierer, der Zirconiumoxid mit einer Korngröße von 25 µm als Abrasivmittel enthält. Er ist durch einen weißen Schaftring gekennzeichnet. Das Poliersystem wird in acht Formvarianten angeboten. In dieser Studie wurde für die Bearbeitung der Prüfkörper die Kelchform gewählt.

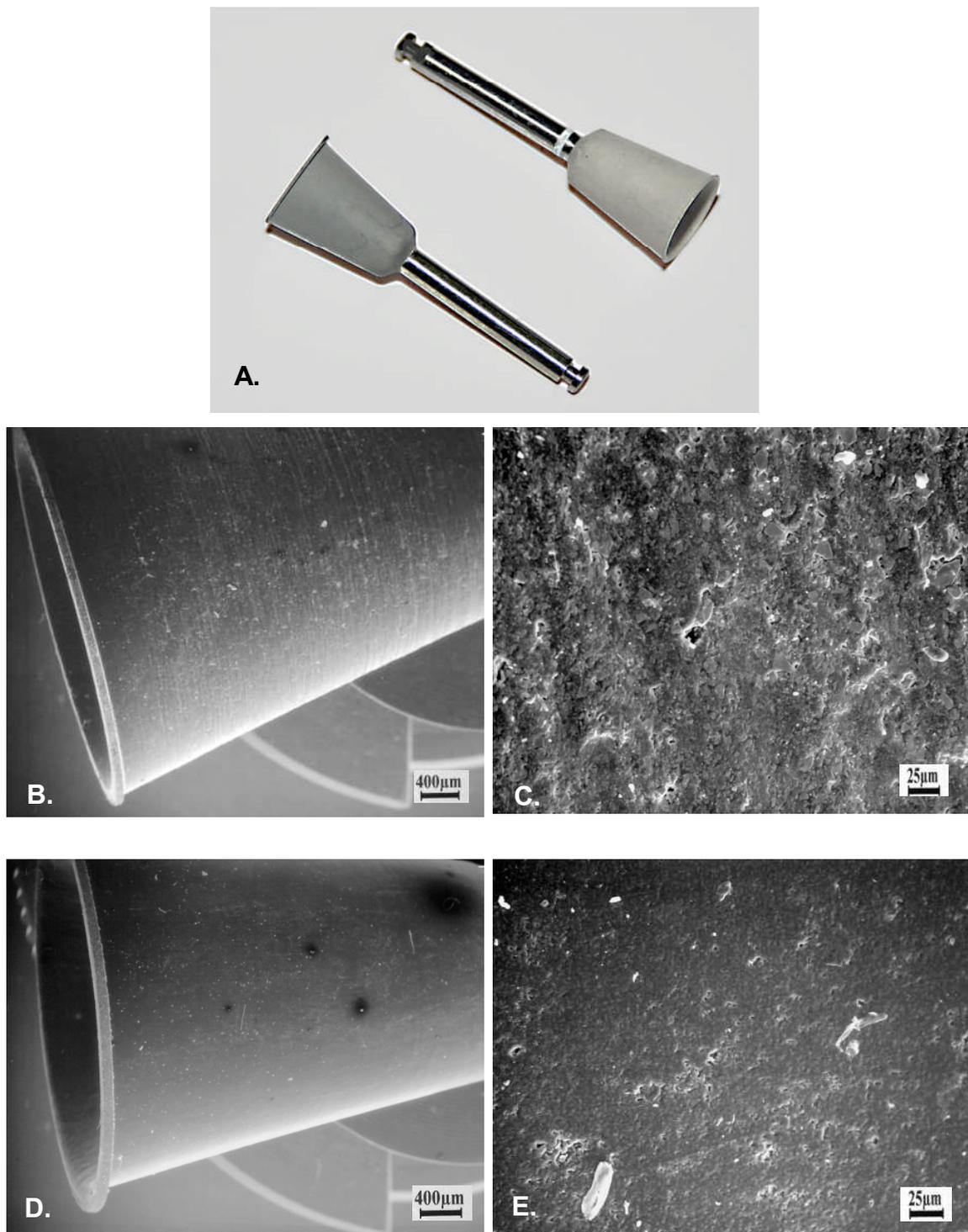


Abb. 2: Shofu CompoSite/CompoSite Fine

- A. Makroskopische Darstellung von Vorpolierer (ohne weißen Ring) und Hochglanzpolierer (mit weißem Ring)
- B., C. REM-Aufnahmen des Vorpolierers
- D., E. REM-Aufnahmen des Hochglanzpolierers

- **Hawe Composite Polishers (Hawe Neos Dental, Biaggio, Schweiz)**
Bei dem Hawe Composit Polisher (Abbildung 3) sind Aluminiumoxidpartikel in Naturgummi eingebettet. Das Poliersystem besteht aus vier Polierern, die nach Korngrößen farblich geordnet sind. Der grobe Polierer (weiß) weist eine Körnung von 74 μm auf, der mittlere (blau) eine Körnung von 37 μm , der feine (gelb) eine Körnung von 13 μm und der extra feine (rosa) eine Körnung von 3 μm . Das Poliersystem steht in vier verschiedenen Formen zur Verfügung; auch hier wurde die Kelchform gewählt.
- **Gummipolierer mit Diamantkorn (Gebr. Brasseler, Lemgo)**
Der Gummipolierer mit Diamantkorn (Abbildung 4) besteht aus in Kautschuk eingelassenen Diamantpartikeln. Der Vorpolierer (grün) hat eine Partikelgröße von 37-40 μm , der Hochglanzpolierer (grau) von 3 μm . Beide Polierer werden in Spitzen- oder Kelchform angeboten, wobei für die Politur in dieser Untersuchung die Kelchform benutzt wurde.
- **Silikonpolierer mit Siliciumcarbid (Gebr. Brasseler, Lemgo)**
Dieser Silikonpolierer verfügt über Abrasivkörper aus Siliciumcarbid (Abbildung 5), wobei der Vorpolierer (braun) eine Partikelgröße von 50 μm und der Hochglanzpolierer (grün) eine Partikelgröße von 7-8 μm aufweist. Die Polierinstrumente werden als Polierspitze oder Polierkelch angeboten; bei beiden Polierern wurde die Kelchform gewählt.
- **Hawe Occlubrush (Hawe Neos Dental, Biaggio, Schweiz)**
Der Poliereffekt des Occlubrush-Polierers (Abbildung 6) beruht auf Siliciumcarbid-Abrasivkörper, die in aromatische Polyamid-Borsten eingelassen sind. Diese werden während der Politur freigesetzt und haben eine mittlere Korngröße von 5 μm . Der Polierer wird in der spitzen, der kleinen und der regulären Kelchform angeboten; für die Politur wurde die reguläre Kelchform verwendet.

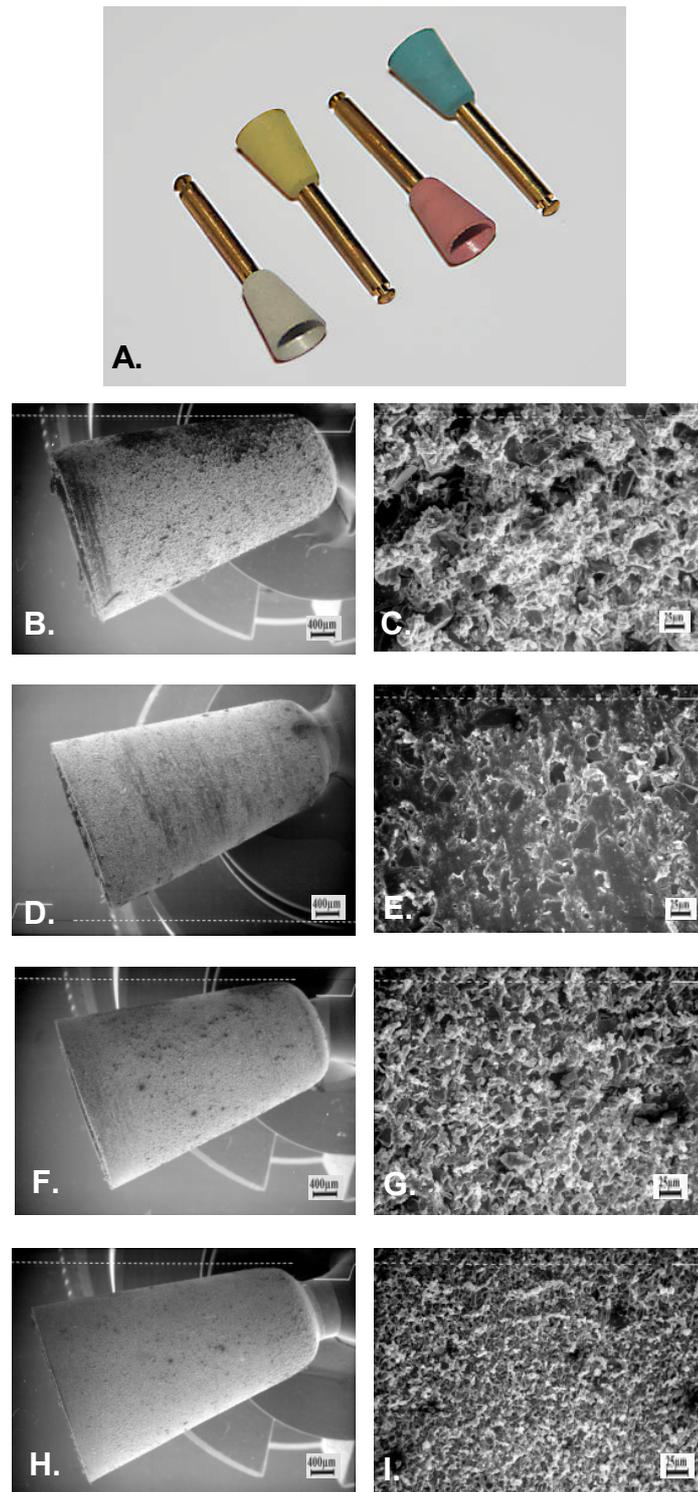


Abb. 3: Hawe Composite Polishers

- A. Makroskopische Darstellung des Poliersystems bestehend aus vier Polierern in den Korngrößen grob (weiß), mittel (blau), fein (gelb) und extra fein (rosa)
- B., C. REM-Aufnahmen des groben Polierers
- D., E. REM-Aufnahmen des mittleren Polierers
- F., G. REM-Aufnahmen des feinen Polierers
- H., I. REM-Aufnahmen des extra feinen Polierers

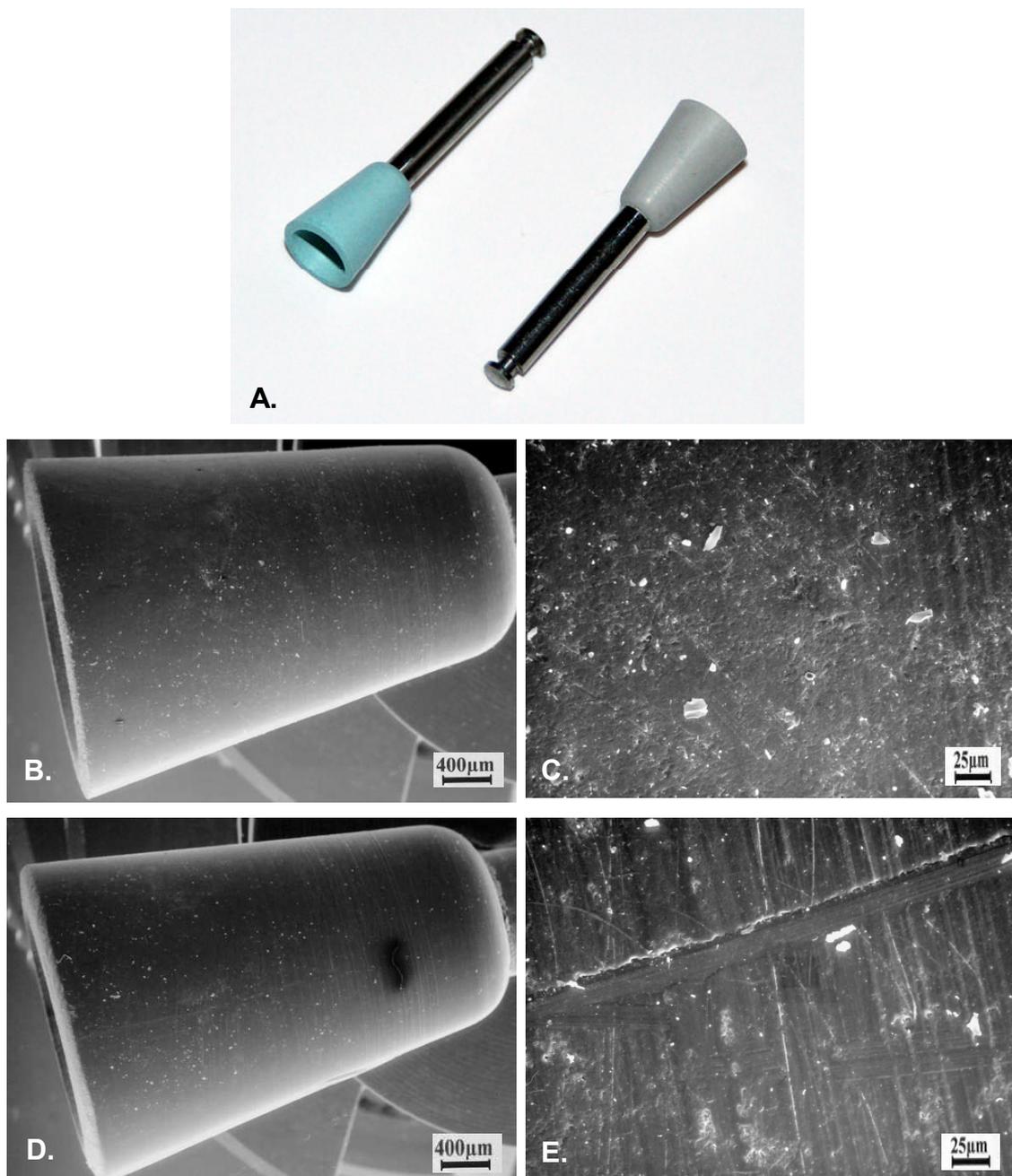


Abb. 4: Gummipolierer mit Diamantkorn

A. Makroskopische Darstellung des Poliersystems bestehend aus Vorpolierer (grün) und Hochglanzpolierer (grau)

B., C. REM-Aufnahmen des Vorpolierers

D., E. REM-Aufnahmen des Hochglanzpolierers

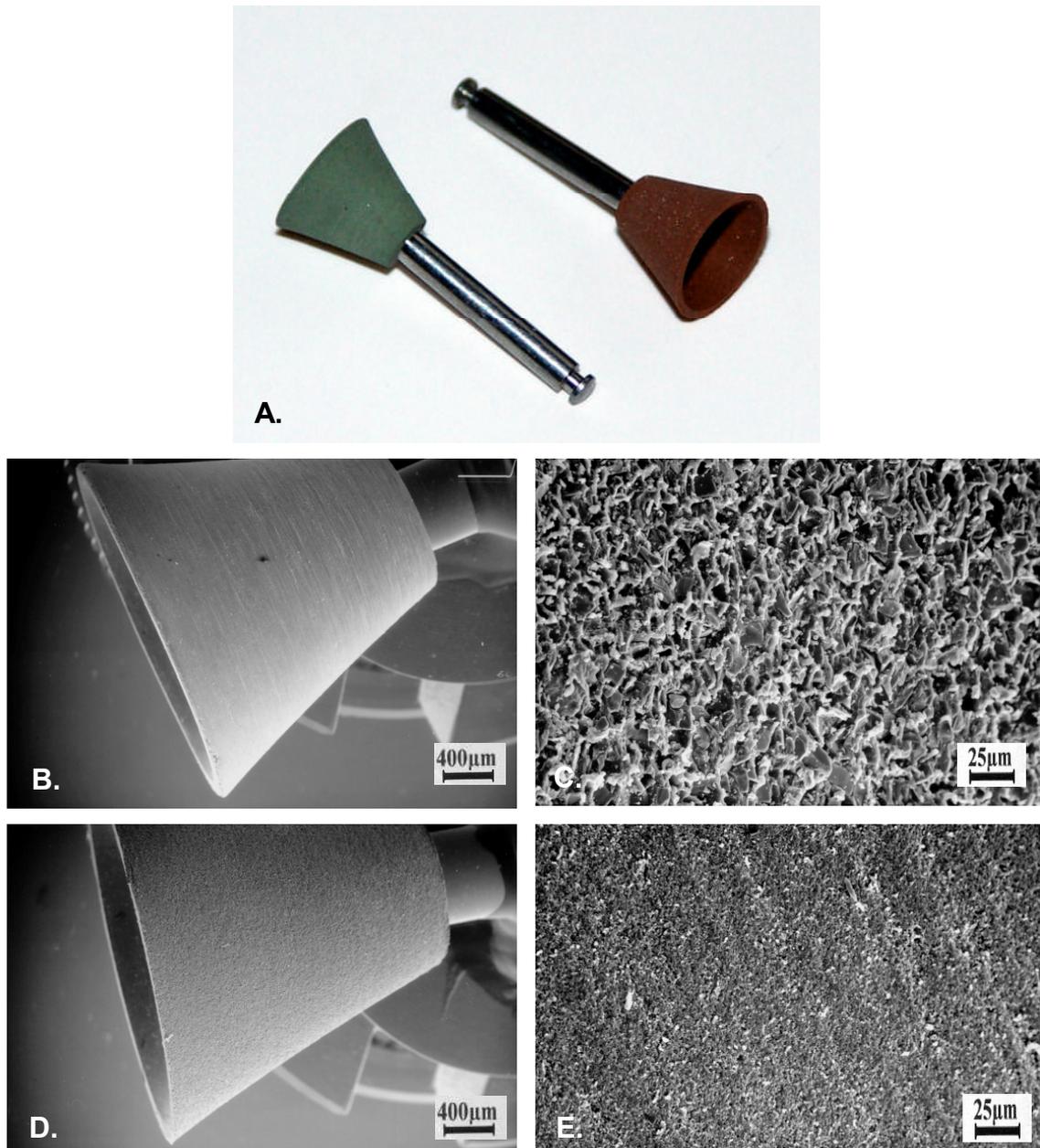


Abb. 5: Silikonpolierer mit Siliciumcarbid

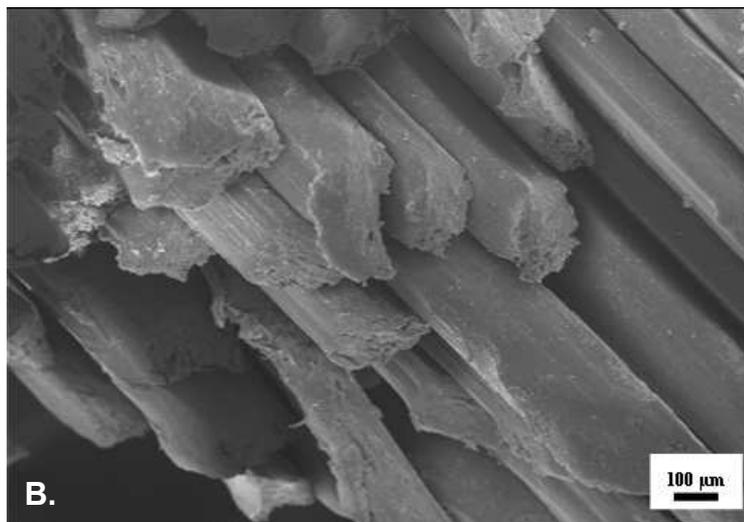
A. Makroskopische Darstellung des Poliersystems bestehend aus Vorpolierer (braun) und Hochglanzpolierer (grün)

B., C. REM-Aufnahmen des Vorpolierers

D., E. REM-Aufnahmen des Hochglanzpolierers



A.



B.

Abb. 6: Hawe Occlubrush-Polierbürstchen

- A. Makroskopische Darstellung des Occlubrush-Polierbürstchens
- B. REM-Aufnahme des Occlubrush-Polierbürstchens

- Diamantimprägnierter Filzpolierer Diafix-oral (Müller Dental Vertrieb, Lindlar)
Der Diafix-oral Polierer (Abbildung 7) besteht aus einer Filzmatrix, in die Diamantpartikel einer Größe von 3-5 μm mit Hilfe von Wachs eingelassen sind. Der Polierkörper ist walzenförmig und wird auf einen Winkelstück aus Kunststoff montiert. Der Filzpolierer wird in den Stärken 2 mm und 4 mm angeboten; zur Politur der Prüfkörper wurde der Polierer mit der Stärke von 4 mm verwendet.

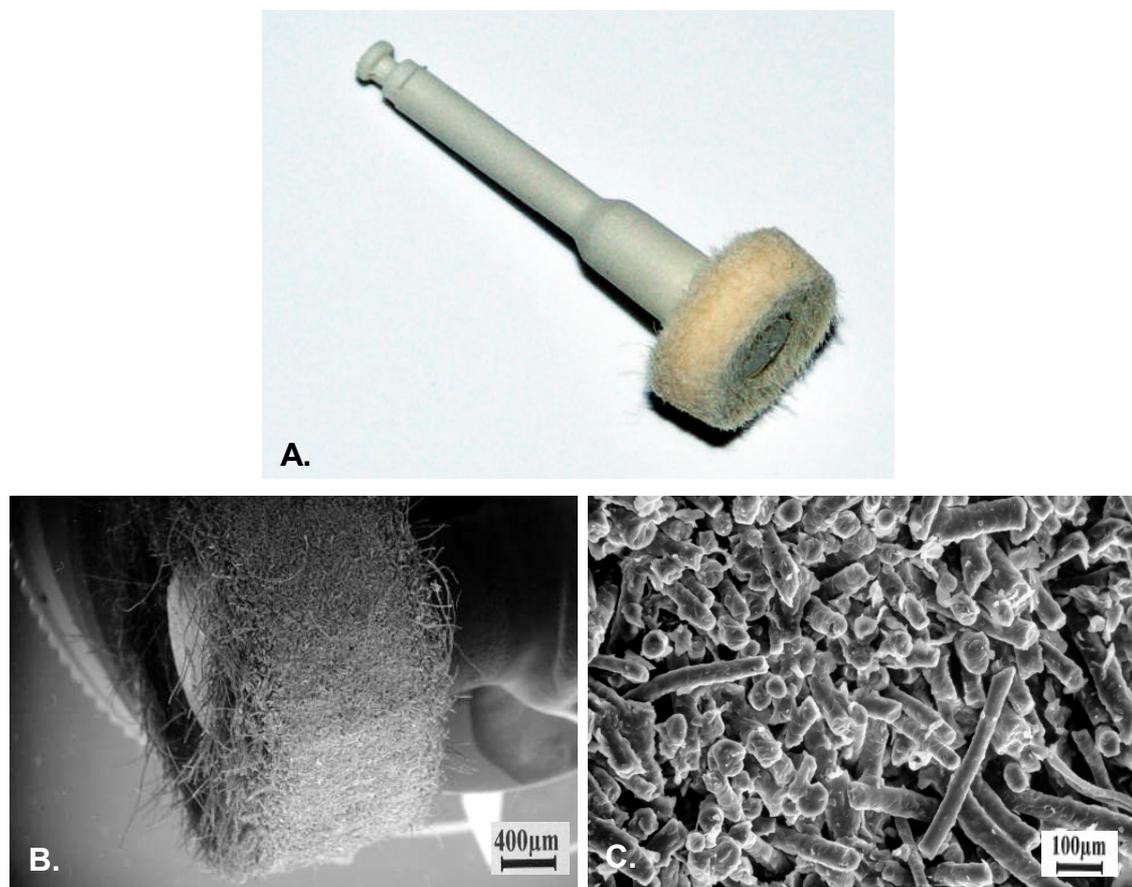


Abb. 7: Diamantimprägnierter Filzpolierer Diafix-oral
A. Makroskopische Darstellung des Diafix-oral-Polierers
B. REM-Aufnahme des Diafix-oral-Polierers

Tab. 6: Verwendete Poliersysteme

Nr.	Bezeichnung	Kenn-Nr.	Abrasivpartikel und Matrix	Korngröße [µm]	Farbcode	Hersteller
4	Shofu CompoSite/ CompoSite Fine	0195	Aluminiumoxid in Silikon	35	grau	Shofu Dental GmbH, Ratingen, BRD
		0295	Zirkoniumoxid in Silikon	25	weiß	
5	Hawe Composite Polisher	1061	Aluminiumoxid- partikel in Natur- gummi und Sub- stanzen vulkani- schen Ursprungs	74	weiß	Hawe Neos Composite, Biaggio, Schweiz
		1062		37	blau	
		1063		13	gelb	
		1064		3	rosa	
6	Hawe Occlubrush		Siliciumcarbid in aromatischem Polyamid	5		Hawe Neos Composite, Biaggio, Schweiz
7	Komet Diamant	9664 204 055	Diamantkorn in Kautschuk	37-40	grün	Geb. Brasseler, Lemgo, BRD
		9664 205 055		3	grau	
8	Komet Siliciumcarbid	9607 204 090	Siliciumcarbid in Silikon	50	braun	Geb. Brasseler, Lemgo, BRD
		9617 204 090		7-8	grün	
9	Diafix-oral	80099	Diamantpartikel in Filz	3-5		Müller Dental Vertrieb, Lindlar, BRD

3.3.3 Instrumente der Referenzbearbeitungsmethode

Die Politur mit Sof-Lex-Disk-System (3M Medica, Borken) gilt als klinisch akzeptierter Standard und diente in dieser Studie als Referenz für die übrigen Polierverfahren. Bei den Sof-Lex-Disks handelt es sich um mit Aluminiumoxidpartikeln bestückte flexiblen Scheiben im Durchmesser von 9,5 mm oder 12,5 mm, die auf ein entsprechendes Mandrell aus Stahl montiert werden. In

der vorliegenden Studie wurde ein Durchmesser von 12,5 mm gewählt. Für die Oberflächenbearbeitung stehen vier verschiedene Korngrößen zur Verfügung (grob: ca. 100 μm , mittel: ca. 29 μm , fein: ca. 14 μm , extra fein: ca. 3 μm), die in der vorliegenden Studie in der genannten Reihenfolge allesamt zur Anwendung kamen (Abbildung 8, Tabelle 7).



Abb. 8: Sof-Lex-Disks

- A. Makroskopische Darstellung des Sof-Lex-Poliersystems bestehend aus Mandrell (links) und vier mit Aluminiumoxidpartikeln bestückten flexiblen Scheiben der Korngrößen grob (schwarz), mittel (dunkelblau), fein (mittelblau) und extra fein (hellblau)
- B. REM-Aufnahme der mittleren Sof-Lex-Disk
- C. REM-Aufnahme der feinen Sof-Lex-Disk
- D. REM-Aufnahme der extra feinen Sof-Lex-Disk

Tab. 7: Referenzbearbeitungsmethode Sof-Lex-Disk-System

Nr.	Bezeichnung	Kenn-Nr.	Abrasivpartikel	Korngrößen	Farbcode	Hersteller
10	Sof-Lex-Disk-System	1982 C	Aluminiumoxid	100 µm (50-90)	schwarz	3 M Medica, Borken
		1982 M		29 µm (10-40)	dunkelblau	
		1982 F		14 µm (3-9)	blau	
		1982 SF		5 µm (1-7)	hellblau	

3.4 Ausarbeitung und Politur des Komposits

3.4.1 Ausarbeitung

Für die Ausarbeitung der Prüfkörper wurden drei Verfahren gewählt.

- Das erste Ausarbeitungsverfahren (AV 1) war durch die alleinige Verwendung des Diamantfinierers mit der Diamantkörnung von 30 µm gekennzeichnet (Tabelle 5 auf S. 27, Nr. 1).
- Das zweite Ausarbeitungsverfahren (AV 2) setzte sich aus der Anwendung des Diamantfinierers mit der Diamantkörnung von 30 µm (Tabelle 5 auf S. 27, Nr. 1) und der anschließenden Verwendung des Diamantfinierers mit der Diamantkörnung von 20 µm (Tabelle 5 auf S. 27, Nr. 2) zusammen.
- Das dritte Ausarbeitungsverfahren (AV 3) basierte ebenfalls auf dem Einsatz zweier Finierer, wobei zuerst der Diamantfinierer mit der Diamantkörnung von 30 µm (Tabelle 5 auf S. 27, Nr. 1) und anschließend der 16-blättrige Hartmetallfinierer (Tabelle 5 auf S. 27, Nr. 3) verwendet wurde.

Unabhängig vom gewählten Ausarbeitsverfahren wurde die Ausarbeitung der Probekörper stets mit einem fabrikneuen roten Schnellaufwinkelstück 24 LN Intra Matic Lux 2 (KaVo, Biberach) mit 3-Düsen-Spraykühlung vorgenommen. Das Winkelstück hatte eine Leerlaufdrehzahl von 40000 U/min und wies einen „friction-grip“-Mechanismus auf, mit dem die Finierer fixiert wurden. Die Leerlaufdrehzahl wurde mit dem elektronischen Messgerät Moviport D711 (Braun GmbH, Waiblingen) kontrolliert. Die Dauer der Ausarbeitung wurde für jeden Finierer auf 20 Sekunden festgelegt. Nach dreimaliger Benutzung wurde jeder Finierer verworfen.

3.4.2 Politur

Zur Politur der Oberflächen wurde ein fabrikneues blaues Winkelstück (Unterteil 20 LH Intra Matic Lux 3, Oberteil 68 LDN (KaVo, Biberach)) mit einer 3-Düsen-Spraykühlung verwendet. In Hinblick auf Drehzahlhöhe und Verwendung von Wasserkühlung wurden die in Tabelle 8 zusammengefassten Herstellerangaben berücksichtigt. Die Einstellung der Umdrehungszahlen erfolgte unter Einsatz eines elektronischen Messgerätes (Moviport D711, Braun GmbH, Waiblingen). Die Dauer der Oberflächenpolitur war wie die Dauer der Ausarbeitung auf 20 Sekunden pro Instrument begrenzt. Jeder Polierer wurde nach einmaligem Gebrauch ersetzt.

Tab. 8: Anwendung der Polierverfahren

Nr.	Bezeichnung/Instrument	Drehzahl in U/min	Wasserkühlung
1	Shofu CompoSite / CompoSite Fine	10000	ja
2	Hawe Composite Polisher	3000	nein
3	Hawe Occlubrush	5000	nein
4	Komet Diamant	6000	ja
5	Komet Siliciumcarbid	6000	ja
6	Diafix-oral	3200	nein
7	Sof-Lex Disk-System	4000	ja

3.4.3 Resultierende Bearbeitungsmethoden

Aus der Kombination der drei Ausarbeitsverfahren (Gliederungspunkt 3.4.1) mit den sechs Poliersystemen (Gliederungspunkt 3.4.2) ergaben sich 18 Bearbeitungsmethoden. Zusätzlich wurde als Referenzmethode das Sof-Lex-Disk-System untersucht, bei dem Ausarbeitung und Politur ohne Einsatz eines Finierers erfolgten.

Mit den in Tabelle 9 zusammengefassten 19 Bearbeitungsmethoden wurden randomisiert jeweils fünf Kompositprüfkörper bearbeitet, so dass insgesamt 95 polierte Oberflächen zur Evaluierung zur Verfügung standen.

Tab. 9: Bearbeitungsmethoden 1-19

Abkürzungen:

DF 30 = Diamantfinierer 30 µm

DF 20 = Diamantfinierer 20 µm

HMF 16 = Hartmetallfinierer mit 16 Schneiden

Bearbeitungs- methode (M)	Ausarbeitung	Politur	Instrumenten- folge nach Nr.
M 1	DF 30	Shofu CompoSite / Composite Fine	1-4
M 2	DF 30	Hawe Composite Polisher	1-5
M 3	DF 30	Hawe Occlubrush	1-6
M 4	DF 30	Komet Diamant	1-7
M 5	DF 30	Komet Siliciumcarbid	1-8
M 6	DF 30	Diafix-oral	1-9
M 7	DF 30 / DF 20	Shofu CompoSite / Composite Fine	1-2-4
M 8	DF 30 / DF 20	Hawe Composite Polisher	1-2-5
M 9	DF 30 / DF 20	Hawe Occlubrush	1-2-6
M 10	DF 30 / DF 20	Komet Diamant	1-2-7
M 11	DF 30 / DF 20	Komet Siliciumcarbid	1-2-8
M 12	DF 30 / DF 20	Diafix-oral	1-2-9

Tab. 9 (Forts.): Bearbeitungsmethoden 1-19

Abkürzungen:

DF 30 = Diamantfinierer 30 µm

DF 20 = Diamantfinierer 20 µm

HMF 16 = Hartmetallfinierer mit 16 Schneiden

Bearbeitungs- methode (M)	Ausarbeitung	Politur	Instrumenten- folge nach Nr.
M 13	DF 30 / HMF 16	Shofu CompoSite / Composite Fine	1-3-4
M 14	DF 30 / HMF 16	Hawe Composite Polisher	1-3-5
M 15	DF 30 / HMF 16	Hawe Occlubrush	1-3-6
M16	DF 30 / HMF 16	Komet Diamant	1-3-7
M 17	DF 30 / HMF 16	Komet Siliciumcarbid	1-3-8
M 18	DF 30 / HMF 16	Diafix-oral	1-3-9
M 19	keine, da Referenzmethode	Sof-Lex Disk-System	10

3.5 Evaluierung der Kompositoberflächen

3.5.1 Quantitative Beurteilung

3.5.1.1 Vorgehensweise

Zur quantitativen Beurteilung der Prüfkörperoberflächen wurden Rauigkeitsmessungen durchgeführt, wobei das elektronische Tastschnittverfahren zur Anwendung kam. Bei der Durchführung der Messung wurde darauf geachtet, dass die Abtastung jedes Prüfkörpers einmal senkrecht und einmal waagrecht zur Hauptbearbeitungslinie der Instrumente erfolgte. Um Verunreinigungen wie z.B. Bearbeitungsrückstände zu entfernen wurden die Prüfkörper vor jeder Messung mit einem Wasserstrahl abgesprüht und im Luftstrom getrocknet. Jede zu messende Kompositoberfläche wurde daraufhin so in der Messapparatur

fixiert, dass neun parallele Spuren im Zentrum der Oberfläche lagen. Auf diese Weise entstanden zweimal neun Messungen pro Kompositoberfläche. Da pro Bearbeitungsmethode fünf Prüfkörpern vermessen werden mussten, waren pro Bearbeitungsmethode 90 Einzelmessungen erforderlich.

3.5.1.2 Messapparatur

Die Rauigkeitsmessung nach dem elektronischen Tastschnittverfahren wurde mit dem Perthometer S8P (Feinprüf GmbH, Göttingen) durchgeführt. Die mikroprozessorgesteuerte Abtastung erfolgte durch den optischen Mikrotaster Focodyn (Rodenstock, München). Dieser verfügte über einen Laser der Wellenlänge 780 nm, wobei der Laserstrahl zu einem Fokus von 1 µm gebündelt, über Prismen auf die zu messende Probenoberfläche geleitet und dort reflektiert wurde. Ein im Tastergehäuse integrierter Mikromotor bewirkte eine ständige Korrektur des Messhebels, damit der Abstand zur Oberfläche konstant bei 0,9 mm lag. Die so entstehende Vertikalbewegung der Tastspitze wurde mit Hilfe eines Wegmesssystems in ein analoges elektrisches Signal umgewandelt und zur Auswertungseinheit S8P (Mahr, Göttingen) geleitet. Dort wurde es in profilometrische Messgrößen umgewandelt und direkt durch einen integrierten Drucker in einem Messprotokoll ausgedruckt.

Der Mikrotaster war mit der Vorschubeinheit PRK (Mahr, Göttingen) verbunden, die es ermöglichte, den Taster während der Messung mit einer konstanten Geschwindigkeit von 0,1 mm/s über die zu messende Kompositoberfläche zu führen. Vor jeder neuen Messung wurde der Taster mit dem Einstellnormal PEN-10-1 (Mahr, Göttingen) neu kalibriert.

Die komplette Messapparatur war auf einem schwingungsgedämpften Messisch VW-3036-OPT-0330 (Newport, Fountain Valley, USA) positioniert.

3.5.1.3 Versuchsbedingungen

Die Abtastung der Kompositoberflächen erfolgte als schrittmotorische vollautomatische Parallelaufzeichnung in neun Tastschnitten mit einem Abstand von jeweils 0,219 mm, woraus ein Messfeld von 1,75 mm x 1,25 mm resultierte. Der Schrittmotor war am Kreuzverstelltisch der Messapparatur montiert und sorgte nach jedem einzelnen Tastschnitt für einen konstanten Vorschub senkrecht zur Tastrichtung. Für jeden einzelnen Tastschnitt waren folgende Einstellungen festgelegt:

- Taststrecke (L_T): 1,75 mm
Für die Taststrecke stehen diverse Einstellungen nach DIN 4768 [18] zur Verfügung. Bei einer Prüfkörpergröße von 7 mm x 7 mm erschien eine Taststrecke von 1,75 mm als geeignet.
- Vorschubgeschwindigkeit: 0,1 mm/s; Grenzwellenlänge (λ_c): 0,25 mm
Der Taststrecke von 1,75 mm sind nach DIN 4768 [18] eine Vorschubgeschwindigkeit von 0,1 mm/s und eine Grenzwellenlänge von 0,25 mm zugeordnet.
- Messstrecke (L_M): 1,25 mm
Die Messstrecke ist der Teil der Taststrecke, der sich nach Abzug der aus messtechnischen Gründen erforderlichen Vorlauf- und Nachlaufstrecke ergibt. Die Messstrecke soll gemäß DIN 4768 [18] der fünffachen Länge der Grenzwellenlänge entsprechen.
- Vertikalbereich (VB): 62,5 μ m
Der Vertikalbereich gibt den Messbereich in vertikaler Richtung an und sollte der zu messenden Profilamplitude optimal angepasst werden. Er ist aus diesem Grund möglichst klein zu wählen, muss aber dennoch groß genug sein, um alle Oberflächenwerte zu erfassen. Die Größe des Vertikalbereiches ist von der Art und Empfindlichkeit des verwendeten Tasters abhängig, wobei für die Einstellung des Focodyn-Tasters drei Vertikalbereiche zur Verfügung standen (12,5 μ m / 62,5 μ m / 250 μ m).

3.5.1.4 Messgrößen

Die Evaluierung der bearbeiteten (ausgearbeiteten und polierten) Kompositoberflächen erfolgte durch Berechnung des arithmetischen Mittenrauwerts (R_a) und des Profillängenverhältnisses (LR).

Der arithmetische Mittenrauwert (R_a) ist der arithmetische Mittelwert der absoluten Beträge der Profilabweichungen y innerhalb der Messstrecke l [18]:

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx$$

Das Profillängenverhältnis ist nach DIN 4762 [16] eine dimensionslose Größe, die das Verhältnis zwischen der Länge der zu einer ebenen Linie ausgezogenen, vorher aus Profilerhebungen und -vertiefungen bestehenden Oberflächenkennlinie und der Länge der Messstrecke widerspiegelt (Abbildung 9). Je größer die Profilunregelmäßigkeiten sind, desto größer wird die Länge der Oberflächenkennlinie und somit auch LR. LR hat im Falle einer idealen Oberfläche den Wert 1, weil die Messstrecke und die Oberflächenkennlinie gleich lang sind.

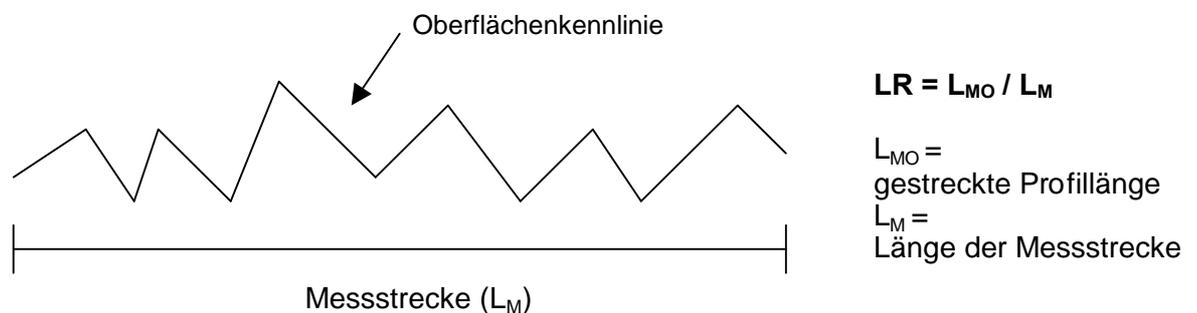


Abb. 9: Schematische Darstellung der Berechnung von LR

3.5.1.5 Auswertung

Obwohl bei einigen REM-Aufnahmen (Abb. 10c auf S. 47 und Abb. 15 ff ab S. 68) eine optische Differenzierung zwischen Längs- und Querriefen möglich ist, unterschieden sich die Messwerte, welche längs und quer zur Riefenrichtung gewonnen wurden, nicht statistisch signifikant. Aus diesem Grund erfolgte keine getrennte Auswertung der Daten.

3.5.2 Qualitative Beurteilung

Die für diese Studie durchgeführte rasterelektronenmikroskopische Beurteilung erfolgte mit dem PSEM 500 (Philipps, Eindhoven, Niederlande) bei einer Arbeitsspannung von 25 kV.

3.5.2.1 Auswahl der Proben

Von den je fünf Kompositprüfkörpern, die pro Bearbeitungsverfahren zur Verfügung standen, wurden per Zufallsprinzip jeweils drei ausgewählt und mittels Rasterelektronenmikroskop (REM) untersucht, so dass insgesamt 57 polierte Kompositoberflächen einer qualitativen Beurteilung unterzogen wurden.

3.5.2.2 Vorbereitung der Proben

Um Verunreinigungen zu entfernen, wurden die ausgewählten Proben vor der REM-Untersuchung mit einem Wasserstrahl abgesprüht und im Luftstrom getrocknet. Nach der Reinigung machte man die Kompositoberflächen für die REM-Untersuchung leitfähig, indem mit dem Gerät SCD 040 (Balzer Union, Liechtenstein) feiner Goldstaub aufgedampft wurde („Sputtern“). Folgende Geräteeinstellungen wurden gewählt:

- Leerlaufspannung 160 V
- Stromstärke 15 mA
- Dauer 6 min

- Temperatur 23,5°C
- Dreimaliges Fluten der Sputterkammer mit Stickstoff

Die vorbereiteten Proben wurden bis zur Beurteilung im Trockenschrank bei 20°C aufbewahrt. Für die Untersuchung im Rasterelektronenmikroskop mussten die Prüfkörper mit dem Spezialkleber Leit C nach Göcke (Neubauer, Münster) auf einem speziellen Trägerteller befestigt werden.

3.5.2.3 Dokumentation und Auswertung

Bei der REM-Untersuchung wurde im Sinne einer einheitlichen Orientierung der Kompositoberflächen darauf geachtet, dass die Hauptbearbeitungsrichtung der Proben im Rasterelektronenmikroskop horizontal verlief. Von jeder Kompositoberfläche wurde eine Aufnahme in 80-facher Monitorvergrößerung angefertigt.

Die Beurteilung der REM-Aufnahmen erfolgte anhand von Fotoabzügen im Format 16 cm x 12 cm. Um eine semiquantitative Bewertung zu gewährleisten, wurde eine Klarsicht-Bewertungsschablone angefertigt, die in zwölf quadratische Bewertungsfelder mit einer Kantenlänge von je 4 cm unterteilt war. Jedes dieser Felder wurde einer der folgenden Kategorien zur Bewertung der Oberflächenqualität zugeordnet:

- Kategorie 1 : glatt-homogene Oberfläche
- Kategorie 2 : leicht ausgeprägte Bearbeitungsspuren
- Kategorie 3 : deutlich ausgeprägte Bearbeitungsspuren

Beispiele für diese Einteilung sind in den Abbildungen 10A bis 10C dargestellt.

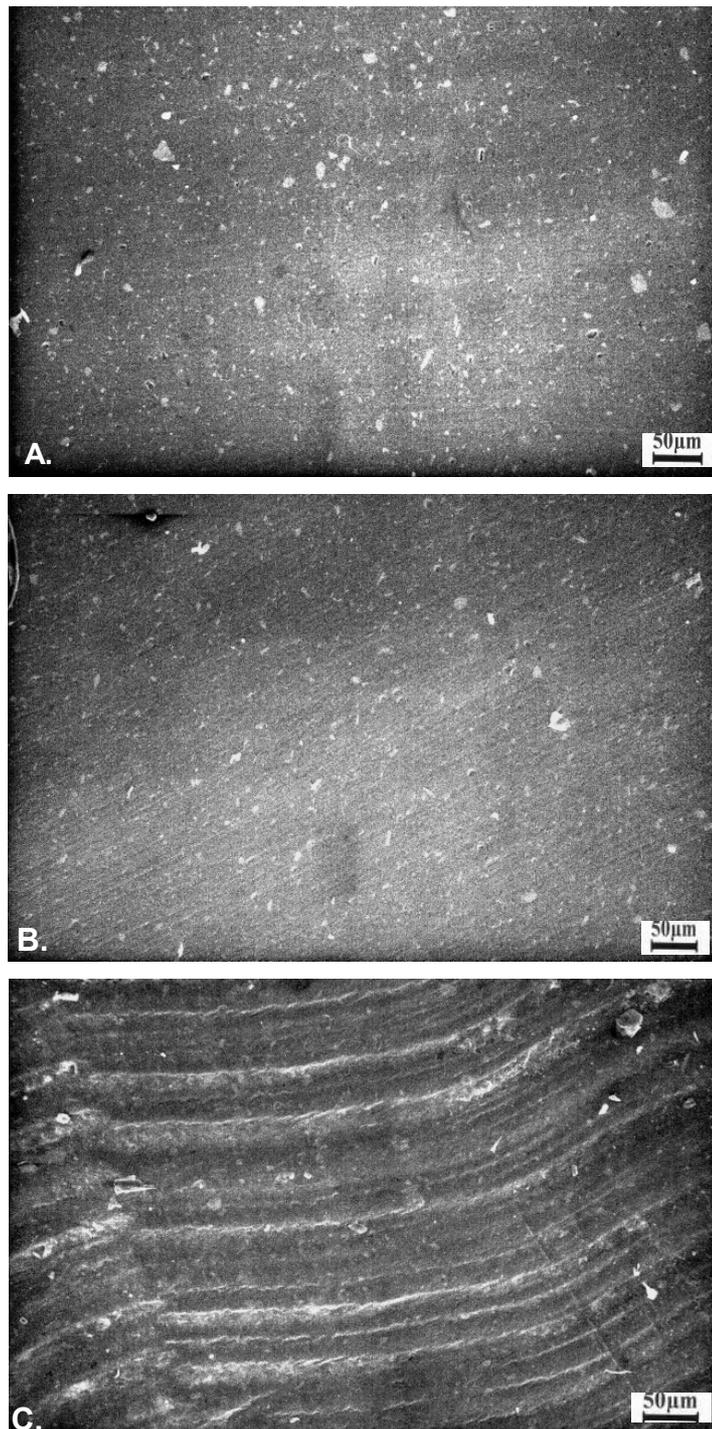


Abb. 10: REM-Aufnahmen als Beispiele für die Einteilung der Oberflächenqualität in die Kategorien 1-3

- A. Kategorie 1: glatt-homogene Oberfläche nach Bearbeitung mit DF 30 / HMF 16 / Diafix-oral
- B. Kategorie 2: leicht ausgeprägte Bearbeitungsspuren nach Bearbeitung mit DF 30 / DF 20 / Komet Silikon
- C. Kategorie 3: deutlich ausgeprägte Bearbeitungsspuren nach Bearbeitung mit DF 30 / Hawe Occlubrush

Die Zuordnung zu einer der drei Bewertungskategorien erfolgte verblindet, d.h. ohne Kenntnis der zugrundeliegenden Bearbeitungsmethode. Nach Durchführung der Bewertung wurden den drei Kategorien entsprechende Zahlenwerte von 1-3 zugeordnet, um anschließend die Summe aus den zwölf Zahlenwerten zu ermitteln. Die Zahlenwerte wurden in einer MS-Excel-Tabelle erfasst und ausgewertet, wobei der bei quantitativer Auswertung von jeweils drei Prüfkörpern zu erwartende Summenwert minimal 36 und maximal 108 betrug. Um einen Vergleich der verschiedenen Verfahren zu ermöglichen, wurden für jede Bearbeitungsmethode auch die prozentualen Anteile der drei Bewertungskategorien an der jeweiligen Gesamtpunktzahl berechnet.

3.6 Statistik

Die prüfstatistische Auswertung wurde mit dem Programm SPSS für Windows (Version 9.0.1) vorgenommen.

Die deskriptive Auswertung stetiger Variablen (z.B. arithmetischer Mittenrauwert R_a) erfolgte durch Berechnung von Mittelwert und Standardabweichung sowie durch Angabe von Minimum und Maximum. Bei diskreten Variablen wurde der Anteil des Absolutwertes an der Grundgesamtheit in Prozent angegeben.

Zum statistischen Vergleich der 18 Bearbeitungsverfahren mit dem Referenzverfahren wurde der zweiseitige Dunnett-T-Test herangezogen.

Der Einfluss von Ausarbeitungsverfahren und Poliersystem auf den arithmetischen Mittenrauwert R_a wurde mit Hilfe der Varianzanalyse (ANOVA) untersucht. Ergab diese einen statistisch signifikanter Effekt, wurde (bei mehr als 2

Untergruppen) mit Hilfe des LSD-Tests untersucht, welche Untergruppen sich statistisch signifikant unterscheiden.

Bei einem p -Wert $< 0,05$ wurde der Unterschied als statistisch signifikant bezeichnet.

4 Ergebnisse

4.1 Quantitative Beurteilung

4.1.1 Arithmetischer Mittenrauwert R_a

4.1.1.1 Ergebnisübersicht

Tabelle 10 gibt einen Überblick über Mittelwerte und Standardabweichungen sowie Minima und Maxima der arithmetischen Mittenrauwerte R_a , die bei Verwendung der 19 verschiedenen Bearbeitungsverfahren erzielt wurden.

Darüber hinaus wird der p-Wert für den Vergleich der einzelnen Bearbeitungsverfahren mit der Referenzmethode M19 (Sof-Lex-Disks) angegeben, wobei statistisch signifikant unterschiedliche Werte grau unterlegt sind. Hierzu wurde der zweiseitige Dunnett-T-Test eingesetzt, bei dem eine Gruppe als Kontrollgruppe herangezogen wird (Referenzbearbeitungsmethode M 19) und alle anderen Gruppen mit dieser Kontrollgruppe verglichen werden.

Der arithmetische Mittenrauwert fiel bei keiner der verwendeten Bearbeitungsverfahren statistisch signifikant niedriger aus als bei der Referenzmethode M19 ($0,660 \pm 0,018 \mu\text{m}$). Tendenziell kleinere Werte konnten bei Anwendung der Bearbeitungsverfahren DF 30 / DF 20 / Diafix-oral (M12: $0,642 \pm 0,065 \mu\text{m}$), DF 30 / HMF / Hawe CP (M14: $0,628 \pm 0,076 \mu\text{m}$) und DF 30 / HMF / Diafix-oral (M18: $0,577 \pm 0,149 \mu\text{m}$) beobachtet werden. Im Vergleich zur Referenzmethode signifikant größere Werte wurden für die Methoden DF 30 / Shofu (M1: $1,033 \pm 0,144 \mu\text{m}$), DF 30 / Hawe Occlubrush (M3: $1,387 \pm 0,146 \mu\text{m}$), DF 30 / DF 20 / Shofu (M7: $1,012 \pm 0,194 \mu\text{m}$) und DF 30 / HMF / Shofu (M13: $0,979 \pm 0,095 \mu\text{m}$) ermittelt.

Tab. 10: Arithmetische Mittenrauwerte (R_a) bei Verwendung der Bearbeitungsmethoden M1 bis M19

M	Bearbeitungsverfahren	MW [μm]	SD [μm]	Min	Max	p vs. M19
M1	DF 30 / Shofu	1,033	0,144	0,86	1,16	0,001
M2	DF 30 / Hawe CP	0,754	0,162	0,60	0,99	0,970
M3	DF 30 / Hawe Occlubrush	1,387	0,146	1,17	1,54	0,0001
M4	DF 30 / Komet Diamant	0,914	0,108	0,81	1,05	0,060
M5	DF 30 / Komet Siliciumcarbid	0,810	0,209	0,60	1,14	0,597
M6	DF 30 / Diafix-oral	0,827	0,331	0,59	1,40	0,455
M7	DF 30 / DF 20 / Shofu	1,012	0,194	0,80	1,23	0,002
M8	DF 30 / DF 20 / Hawe CP	0,704	0,073	0,63	0,81	1,000
M9	DF 30 / DF 20 / Hawe Occlubrush	0,861	0,181	0,65	1,03	0,232
M10	DF 30 / DF 20 / Komet Diamant	0,778	0,019	0,76	0,81	0,858
M11	DF 30 / DF 20 / Komet Siliciumcarbid	0,787	0,089	0,70	0,93	0,793
M12	DF 30 / DF 20 / Diafix-oral	0,642	0,065	0,57	0,73	1,000
M13	DF 30 / HMF / Shofu	0,979	0,095	0,82	1,05	0,008
M14	DF 30 / HMF / Hawe CP	0,628	0,076	0,53	0,74	1,000
M15	DF 30 / HMF / Hawe Occlubrush	0,744	0,066	0,64	0,81	0,989
M16	DF 30 / HMF / Komet Diamant	0,819	0,038	0,76	0,85	0,520
M17	DF 30 / HMF / Komet Siliciumcarbid	0,807	0,059	0,74	0,89	0,623
M18	DF 30 / HMF / Diafix-oral	0,577	0,149	0,41	0,81	0,990
M19	Sof-Lex-Disks	0,660	0,018	0,62	0,73	---

4.1.1.2 Varianzanalyse

Tabelle 11 fasst die Ergebnisse der Varianzanalyse zur Untersuchung von Einflussfaktoren auf den arithmetischen Mittenrauwert zusammen. Dabei konnte ein statistisch signifikanter Einfluss des Ausarbeitungsverfahrens ($p < 0,001$), des Poliersystems ($p < 0,001$) sowie eine Wechselwirkung zwischen Ausarbeitungsverfahren und Poliersystem ($p < 0,001$) nachgewiesen werden (Tab. 11). Die drei ermittelten Einflussfaktoren sollen in den folgenden drei Kapiteln ausführlich besprochen werden.

Tab. 11: Varianzanalyse: Einflussfaktoren auf den arithmetischen Mittenrauwert (R_a)

	Quadratsumme v. Typ III	df	Mittel der Quadrate	F-Wert	p-Wert
Korrigiertes Modell	2,944	17	0,173	8,472	< 0,001 (s.)
Konstanter Term	63,026	1	63,026	3083,553	< 0,001 (s.)
Ausarbeitungsverfahren	0,642	2	0,321	15,694	< 0,001 (s.)
Poliersystem	1,505	5	0,301	14,724	< 0,001 (s.)
Ausarbeitungsverfahren * Poliersystem	0,798	10	7,976E-02	3,902	< 0,001 (s.)
Fehler	1,472	72	2,044E-02		
Gesamt	67,442	90			
Korr. Gesamtvariation	4,416	89			

4.1.1.2.1 Einfluss des Ausarbeitungsverfahrens

Abbildung 11 stellt die durchschnittlichen arithmetischen Mittenrauwerte (R_a) unterschieden nach Ausarbeitungsverfahren dar. Bei den Bearbeitungsmethoden M1 bis M6 wurden zur Ausarbeitung Diamantfinierer mit einer Diamantkörnung von 30 μm eingesetzt (Ausarbeitungsverfahren 1). Bei den Bearbeitungsmethoden M7 bis M12 wurden konsekutiv 30 μm - und 20 μm -Diamantfinierer verwendet (Ausarbeitungsverfahren 2), während bei den Bearbeitungsmethoden M13 bis M18 die Ausarbeitung mit einem 30 μm -Diamant- und einem Hartmetallfinierer erfolgte (Ausarbeitungsverfahren 3).

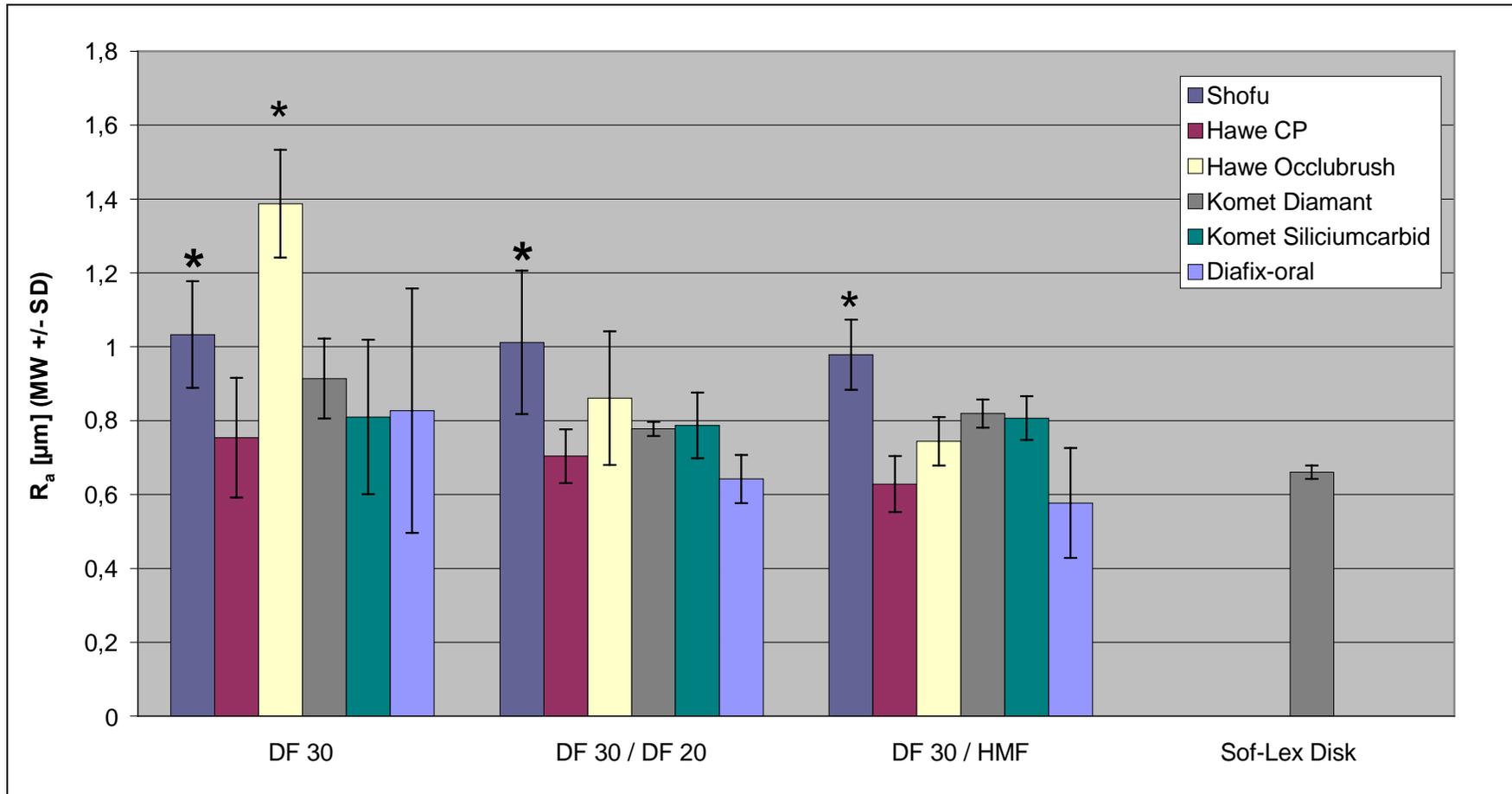


Abb. 11: Arithmetische Mittenrauwerte R_a ($MW \pm SD$) unterschieden nach Ausarbeitsverfahren

(Bearbeitungsmethoden mit signifikantem Unterschied zur Referenzmethode „Sof-Lex-Disks“ (dunkelblaue Säule) sind mit * gekennzeichnet)

Abkürzungen: DF 30 = Diamantfinierer 30 µm, DF 20 = Diamantfinierer 20 µm, HMF 16 = Hartmetallfinierer mit 16 Schneiden

Die grafische Darstellung der Durchschnittswerte in Abbildung 11 zeigt, dass mit dem Ausarbeitsverfahren 1 die größten arithmetischen Mittenrauwerte erzielt wurden. Bei Anwendung der Ausarbeitsverfahren 2 und 3 lagen die durchschnittlichen arithmetischen Mittenrauwerte dagegen stets niedriger.

Die Varianzanalyse konnte wie in Tabelle 11 dargestellt einen statistisch signifikanten Einfluss des Ausarbeitsverfahrens auf den arithmetischen Mittenrauwert (R_a) belegen ($p < 0,001$). Die paarweise Post-hoc-Analyse ergab einen statistisch signifikanten Unterschied sowohl zwischen den Ausarbeitsverfahren 1 und 2 ($p < 0,001$) als auch zwischen den Ausarbeitsverfahren 1 und 3 ($p < 0,001$), während zwischen den Ausarbeitsverfahren 2 und 3 kein statistisch signifikanter Unterschied bestand (Tabelle 12).

Tab. 12: Post-hoc-Analyse zum Einfluss des Ausarbeitsverfahrens auf den arithmetischen Mittenrauwert (R_a)

	Ausarbeitsverfahren 2	Ausarbeitsverfahren 3
Ausarbeitsverfahren 1	$p < 0,001$	$p < 0,001$
Ausarbeitsverfahren 2	---	$p = 0,303$

4.1.1.2.2 Einfluss des Poliersystems

Zusätzlich zur Referenzmethode kamen sechs Poliersysteme zur Auswertung: Shofu CompoSite/CompoSite Fine-Polierer (Poliersystem 1), Hawe Composite Polisher (Poliersystem 2), Hawe Occlubrush-Polierer (Poliersystem 3), der Silikonpolierer Komet Siliciumcarbid (Poliersystem 4), der Gummipolierer Komet Diamant (Poliersystem 5), Diafix-oral-Polierer (Poliersystem 6). Die Ergebnisse sind in Abbildung 12 dargestellt.

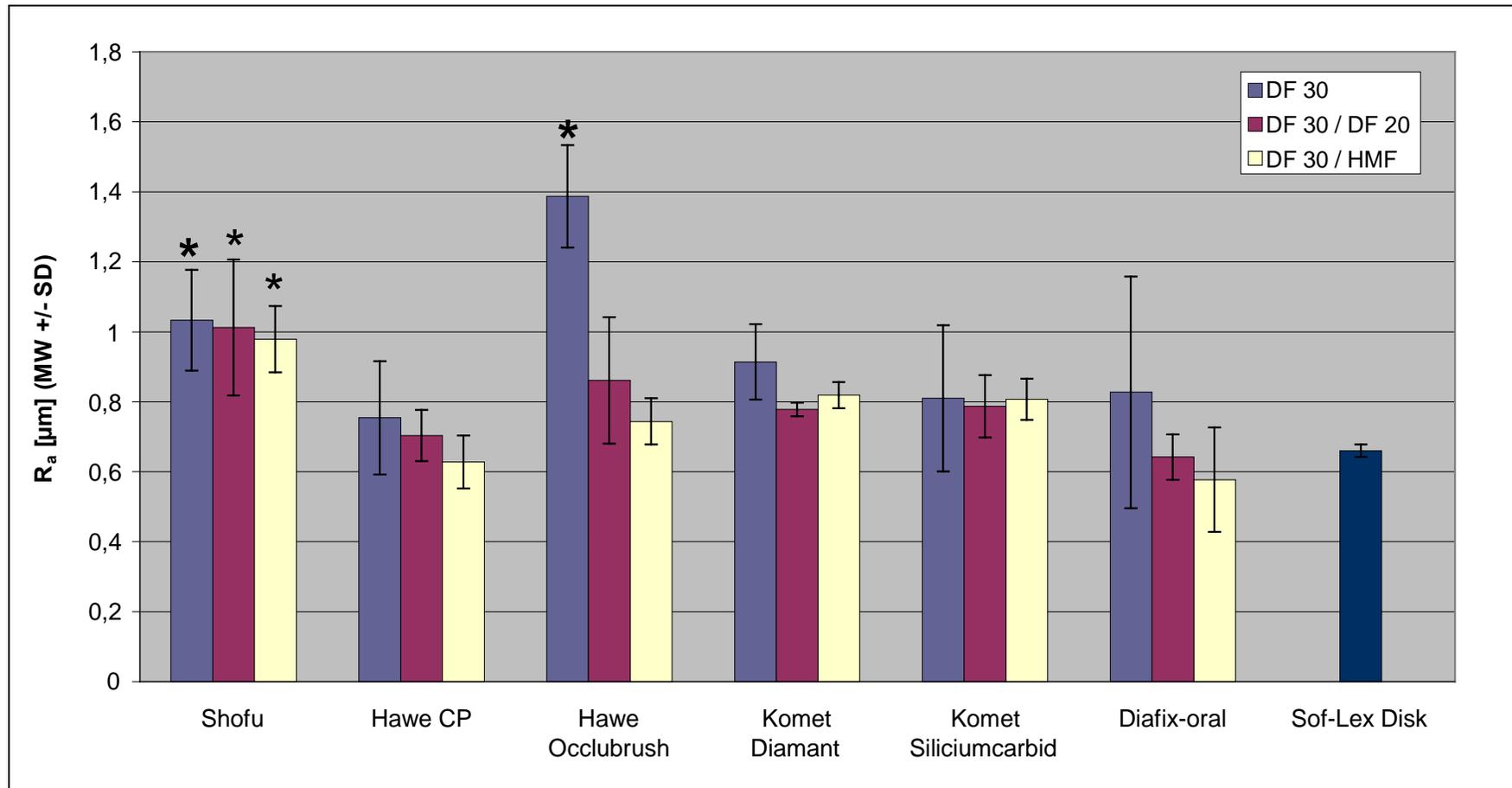


Abb. 12: Arithmetische Mittenrauwerte R_a (MW \pm SD) unterschieden nach Poliersystemen

(Bearbeitungsmethoden mit signifikantem Unterschied zur Referenzmethode „Sof-Lex-Disks“ (dunkelblaue Säule) sind mit * gekennzeichnet)

Abkürzungen: DF 30 = Diamantfinierer 30 µm, DF 20 = Diamantfinierer 20 µm, HMF 16 = Hartmetallfinierer mit 16 Schneiden

Bei Betrachtung der Abbildung 12 zeigt sich, dass die Verwendung der Shofu CompoSite/CompoSite Fine-Polierer, des Hawe Occlubrush-Polierbürstchens, des Komet-Silikonpolierers mit Siliciumcarbid und des Komet-Gummipolierers mit Diamant zu einem arithmetischen Mittenrauwert führte, der über dem mit der Referenzbearbeitungsmethode erzielten Wert lag. Lediglich bei der Verwendung des Hawe Composite Polisher und des Diafix-oral-Polierers konnte bei entsprechender Vorbehandlung mit 30 µm-/20 µm-Diamantfinierern (M12) bzw. 30 µm-Diamantfinierer und Hartmetallfinierer (M14, M18) ein geringerer arithmetischer Mittenrauwert als in der Referenzgruppe gemessen werden.

Der paarweise Vergleich im Post-hoc-Test konnte für das Poliersystem 1 (Shofu) signifikant größere R_a -Werte als bei den Poliersystemen 2 (Hawe Composite Polisher), 4 (Komet Siliciumcarbid), 5 (Komet Diamant) und 6 (Diafix-oral-Polierer) belegen; lediglich zum Poliersystem 3 (Hawe Occlubrush) bestand kein signifikanter Unterschied. Darüber hinaus gab es folgende statistische Gruppenunterschiede: Poliersystem 2 (Hawe Composite Polisher) unterschied sich signifikant von den Poliersystemen 3 (Hawe Occlubrush), 4 (Komet Siliciumcarbid) und 5 (Komet Diamant). Das Poliersystem 3 (Hawe Occlubrush) unterschied sich signifikant von den Poliersystemen 4 (Komet Siliciumcarbid), 5 (Komet Diamant) und 6 (Diafix-oral-Polierer). Weiterhin unterschieden sich das Poliersystem 4 (Komet Siliciumcarbid) und 5 (Komet Diamant) jeweils signifikant von Poliersystem 6 (Diafix-oral-Polierer) (Tabelle 13).

Tab. 13: Post-hoc-Analyse zum Einfluss des Poliersystems auf den arithmetischen Mittenrauwert (R_a)

	Polier-system 2	Polier-system 3	Polier-system 4	Polier-system 5	Polier-system 6
Poliersystem 1	$p < 0,001$	$p = 0,839$	$p = 0,002$	$p < 0,001$	$p < 0,001$
Poliersystem 2	---	$p < 0,001$	$p = 0,008$	$p = 0,046$	$p = 0,799$
Poliersystem 3	---	---	$p = 0,003$	$p < 0,001$	$p < 0,001$
Poliersystem 4	---	---	---	$p = 0,497$	$p = 0,004$
Poliersystem 5	---	---	---	---	$p = 0,025$

4.1.1.2.3 Wechselwirkung zwischen den Ausarbeitungsverfahren und den Poliersystemen

In der Varianzanalyse konnte darüber hinaus ein statistisch signifikanter Einfluss der Wechselwirkung „Ausarbeitungsverfahren*Poliersystem“ auf den arithmetischen Mittenrauwert (R_a) belegt werden. Auf eine paarweise Post-hoc-Analyse der 19 Untersuchungsgruppen wurde verzichtet. Bei rein deskriptiver Betrachtung von Tabelle 14 zeigte sich jedoch, dass sich die Rangfolge der sechs Polierverfahren bezogen auf die drei Ausarbeitungsverfahren ständig verändert hat, was auf die vorhandene Wechselwirkung zwischen Ausarbeitungsverfahren und Poliersystem hinweist.

Tab. 14: Rangfolge der Poliersysteme bezogen auf den arithmetischen Mittenrauwert (R_a) unterschieden nach dem Ausarbeitungsverfahren (beginnend beim niedrigsten Wert)

	Ausarbeitungsverfahren 1	Ausarbeitungsverfahren 2	Ausarbeitungsverfahren 3
Poliersystem 1	5.	6.	6.
Poliersystem 2	1.	2.	2.
Poliersystem 3	6.	5.	3.
Poliersystem 4	4.	3.	5.
Poliersystem 5	2.	4.	4.
Poliersystem 6	3.	1.	1.

4.1.2 Profillängenverhältnis LR

4.1.2.1 Ergebnisübersicht

Tabelle 15 fasst Mittelwerte, Standardabweichungen sowie Minimal- und Maximalwerte des Profillängenverhältnisses LR zusammen, welches nach Anwendung der 19 Bearbeitungsverfahren ermittelt wurde. Die Tabelle enthält außerdem die Ergebnisse des zweiseitigen Dunnett-T-Tests, mit dem das Profillängenverhältnis der Referenzbearbeitungsmethode M19 mit den anderen Bearbeitungsverfahren verglichen wurde.

Das mittlere Profillängenverhältnis betrug bei den Sof-Lex-Disks als Referenzmethode (M19) $1,375 \pm 0,039$. Lediglich bei Verwendung des Diafix-oral Polierers (M18) in Verbindung mit DF 30 / HMF konnte mit $1,227 \pm 0,054$ ein statistisch signifikant niedrigerer Wert erzielt werden. Dagegen fiel das Profillängenverhältnis bei den Methoden DF 30 / Shofu (M1: $1,550 \pm 0,068$), DF 30 / Hawe Occlubrush (M3: $1,606 \pm 0,033$), DF 30 / Komet Diamant (M4: $1,575 \pm 0,074$), DF 30 / DF 20 / Shofu (M7: $1,518 \pm 0,053$) und DF 30 / HMF / Shofu (M13: $1,551 \pm 0,058$) signifikant größer aus (Tabelle 15).

Tab. 15: Profillängenverhältnis (LR) bei Verwendung der Bearbeitungsmethoden M1 bis M19

M	Bearbeitungsmethode	MW	SD	Min	Max	p versus M 19
M1	DF 30 / Shofu	1,550	0,068	1,44	1,61	0,001
M2	DF 30 / Hawe CP	1,362	0,112	1,22	1,49	1,000
M3	DF 30 / Hawe Occlubrush	1,606	0,033	1,58	1,66	<0,001
M4	DF 30 / Komet Diamant	1,575	0,074	1,50	1,66	<0,001
M5	DF 30 / Komet Siliciumcarbid	1,431	0,123	1,31	1,62	0,850
M6	DF 30 / Diafix-oral	1,370	0,086	1,25	1,48	1,000

Tab. 15 (Forts.): Profillängenverhältnis (LR) bei Verwendung der Bearbeitungsmethoden M1 bis M19

M	Bearbeitungsmethode	MW	SD	Min	Max	p versus M 19
M7	DF 30 / DF 20 / Shofu	1,518	0,053	1,45	1,58	0,014
M8	DF 30 / DF 20 / Hawe CP	1,309	0,046	1,25	1,38	0,702
M9	DF 30 / DF 20 / Hawe Occlubrush	1,398	0,091	1,30	1,51	1,000
M10	DF 30 / DF 20 / Komet Diamant	1,473	0,019	1,45	1,50	0,208
M11	DF 30 / DF 20 / Komet Siliciumcarbid	1,424	0,084	1,32	1,55	0,940
M12	DF 30 / DF 20 / Diafix-oral	1,311	0,041	1,27	1,37	0,739
M13	DF 30 / HMF / Shofu	1,551	0,058	1,45	1,60	0,001
M14	DF 30 / HMF / Hawe CP	1,261	0,045	1,19	1,32	0,094
M15	DF 30 / HMF / Hawe Occlubrush	1,346	0,049	1,30	1,42	1,000
M16	DF 30 / HMF / Komet Diamant	1,482	0,034	1,45	1,53	0,127
M17	DF 30 / HMF / Komet Siliciumcarbid	1,407	0,044	1,36	1,47	0,999
M18	DF 30 / HMF / Diafix-oral	1,227	0,054	1,14	1,28	0,010
M19	Sof-Lex-Disk	1,375	0,039	1,34	1,44	--

4.1.2.2 Varianzanalyse

Die Varianzanalyse konnte einen statistisch signifikanten Einfluss des Ausarbeitungsverfahrens ($p < 0,001$), des Poliersystems ($p < 0,001$) sowie Wechselwirkungen zwischen Ausarbeitungsverfahren und Poliersysteme ($p = 0,005$) belegen (Tabelle 16).

Tab. 16: Varianzanalyse: Einflussfaktoren auf das Profillängenverhältnis

	Quadrat- summe v. Typ III	df	Mittel der Quadrate	F-Wert	p-Wert
Korrigiertes Modell	1,040E-02	17	6,115E-04	13,391	< 0,001 (s.)
Konstanter Term	1,820	1	1,820	39861,214	< 0,001 (s.)
Ausarbeitsverfahren	1,731E-03	2	8,655E-04	18,953	< 0,001 (s.)
Poliersystem	7,356E-03	5	1,471E-03	32,218	< 0,001 (s.)
Ausarbeitsverfahren * Poliersystem	1,308E-03	10	1,308E-04	2,865	0,005 (s.)
Fehler	3,288E-03	72	4,566E-05		
Gesamt	1,834	90			
Korr. Gesamtvariation	1,368E-02	89			

4.1.2.2.1 Einfluss des Ausarbeitsverfahrens

Abbildung 13 stellt das durchschnittliche Profillängenverhältnis für die 19 Bearbeitungsmethoden dar, wobei die Anordnung der Darstellung den Einfluss des Ausarbeitsverfahrens wiedergeben soll.

Der grafische Vergleich lässt erkennen, dass das ermittelte Profillängenverhältnis bei Anwendung des Ausarbeitsverfahrens 1 insgesamt am größten war. Dagegen fielen die Werte für die Ausarbeitsverfahren 2 und 3 geringer aus.

Die Varianzanalyse hatte einen statistisch signifikanten Einfluss des Ausarbeitsverfahrens auf das Profillängenverhältnis gezeigt, wobei der Post-hoc-Test statistisch signifikante Unterschiede zwischen den Ausarbeitsverfahren 1 und 2 ($p < 0,001$) sowie 1 und 3 ($p < 0,001$) nachweisen konnte. Die Ausarbeitsverfahren 2 und 3 unterschieden sich hinsichtlich des Profillängenverhältnisses dagegen nicht statistisch signifikant ($p = 0,403$) (Tabelle 17).

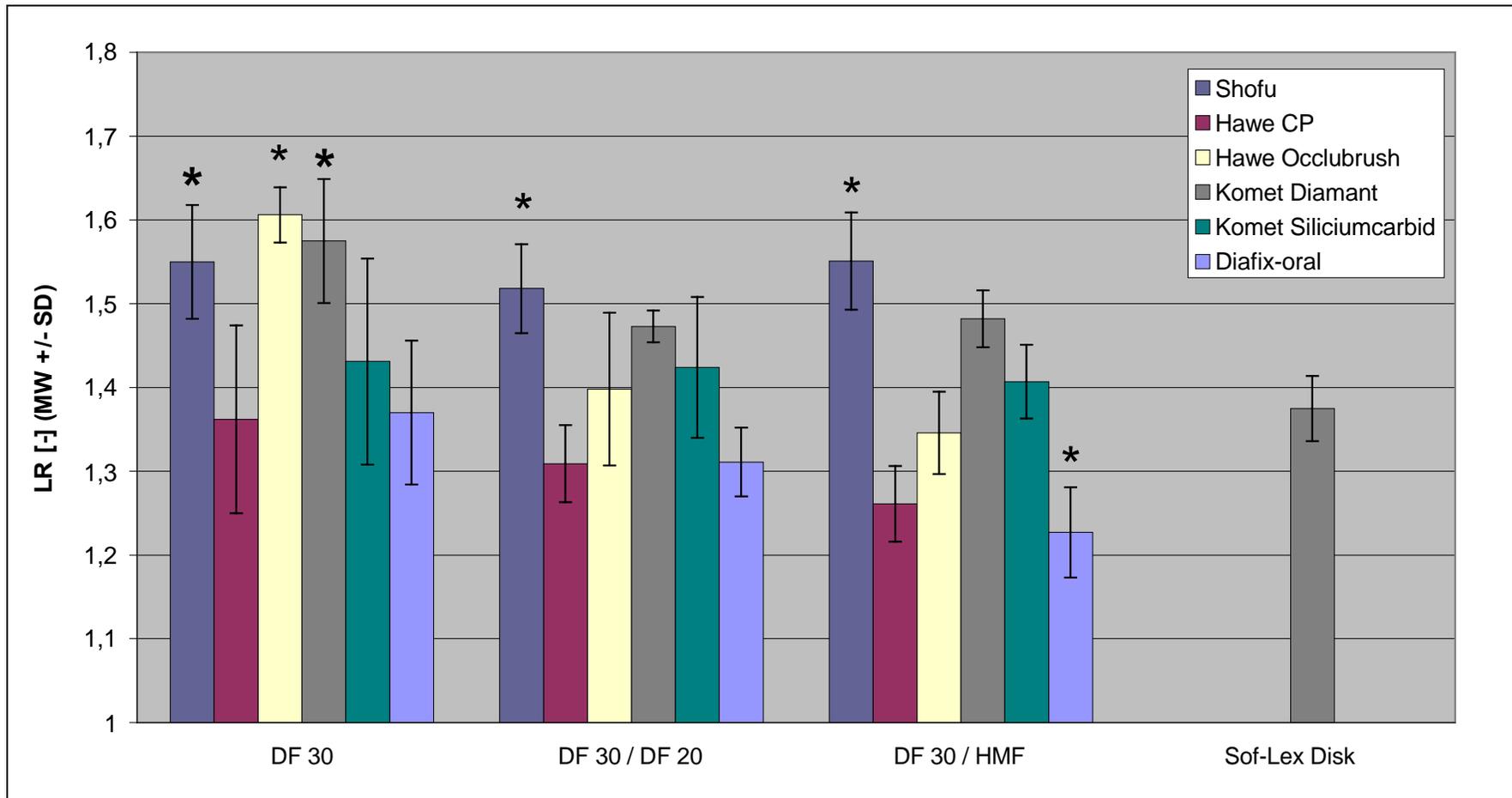


Abb. 13: Profillängenverhältnis LR (MW ± SD) unterschieden nach Ausarbeitsverfahren
 (Bearbeitungsmethoden mit signifikantem Unterschied zur Referenzmethode „Sof-Lex-Disks“ (dunkelblaue Säule) sind mit * gekennzeichnet)

Abkürzungen: DF 30 = Diamantfinierer 30 µm, DF 20 = Diamantfinierer 20 µm, HMF 16 = Hartmetallfinierer mit 16 Schneiden

Tab. 17: Post-hoc-Analyse zum Einfluss des Ausarbeitungsverfahrens auf das Profillängenverhältnis (LR)

	Ausarbeitungsverfahren 2	Ausarbeitungsverfahren 3
Ausarbeitungsverfahren 1	p < 0,001	p < 0,001
Ausarbeitungsverfahren 2	---	p = 0,403

4.1.2.2.2 Einfluss des Poliersystems

Das Profillängenverhältnis lag bei Verwendung des Hawe Composite Polishers und des Diafix-oral-Polierers unabhängig von der Art der Vorbehandlung unter dem für die Referenzbearbeitungsmethode ermittelten Messwert. Die Verwendung der Shofu CompoSite/CompoSite Fine-Polierer sowie der Komet-Polierer mit Siliciumcarbid und mit Diamant erbrachte dagegen nur Werte, die über dem mit der Referenzbearbeitungsmethode erzielten Profillängenverhältnis lagen. Mit dem Hawe Occlubrush-Polierbürstchen lag der Messwert lediglich bei Vorbearbeitung mit der Kombination DF 30 µm /HMF unterhalb des Referenzwertes (Abbildung 14).

Die ANOVA hatte einen signifikanten Einfluss des Poliersystems auf das Profillängenverhältnis belegt ($p = 0,001$). Im Einzelnen bestanden folgende in Tabelle 18 dargestellten signifikanten Unterschiede zwischen den verschiedenen Polierverfahren: Das Poliersystem 1 (Shofu) hatte ein signifikant größeres Profillängenverhältnis als die Poliersysteme 2 (Hawe Composite Polisher), 3 (Hawe Occlubrush), 5 (Komet Diamant) und 6 (Diafix-oral-Polierer). Das Poliersystem 2 (Hawe Composite Polisher) wies ein signifikant größeres Profillängenverhältnis auf als die Poliersysteme 3 (Hawe Occlubrush), 4 (Komet Siliciumcarbid) und 5 (Komet Diamant). Weiterhin gab es folgende statistische Gruppenunterschiede: Poliersystem 3 (Hawe Occlubrush) vs. 6 (Diafix-oral-Polierer). Poliersystem 4 (Komet Siliciumcarbid) vs. 5 (Komet Diamant) und 6 (Diafix-oral-Polierer) sowie Poliersystem 5 (Komet Diamant) vs. Poliersystem 6 (Diafix-oral-Polierer) (Tabelle 18).

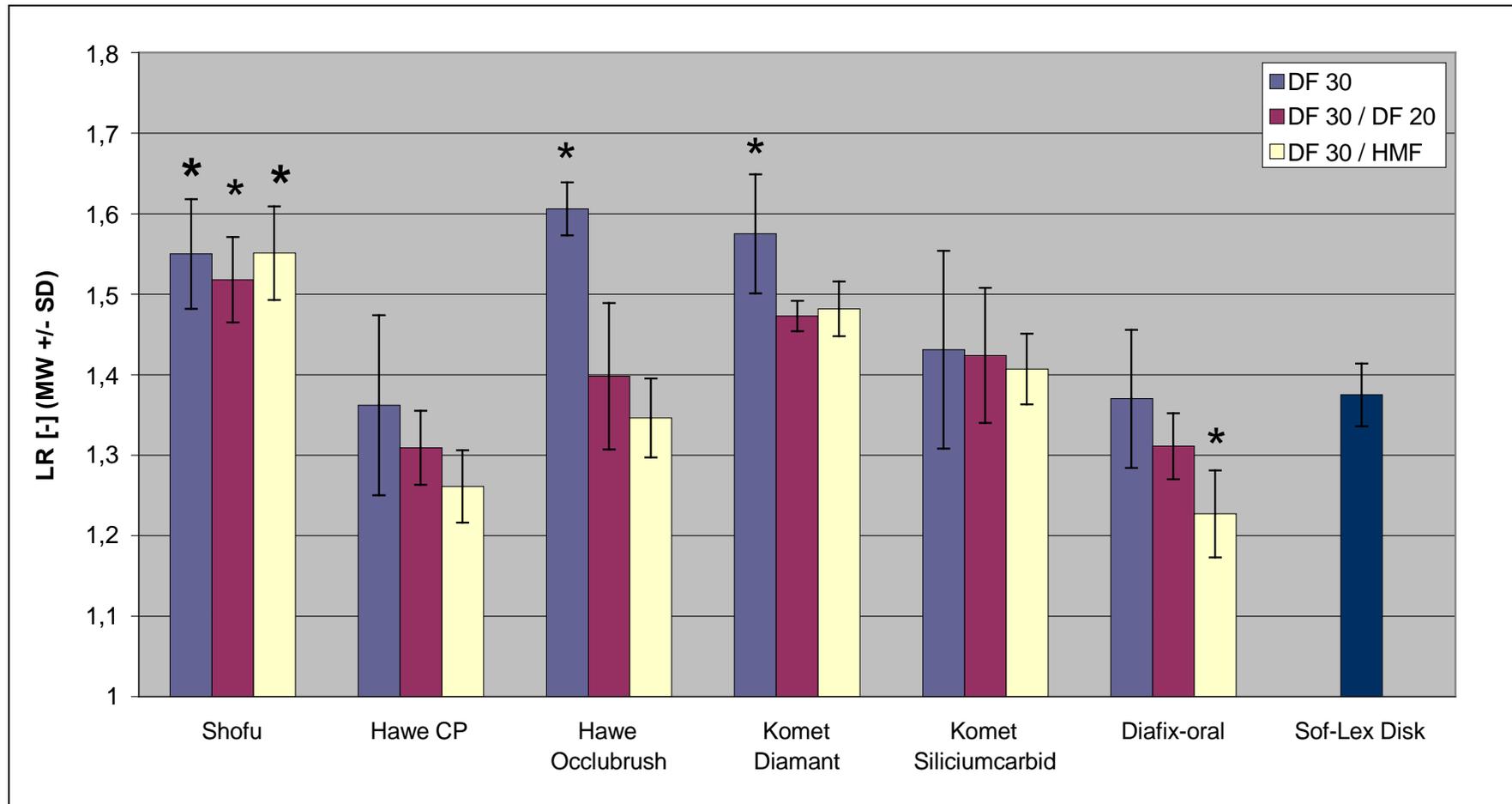


Abb. 14: Profilängenverhältnis LR (MW \pm SD) unterschieden nach Poliersystemen

(Bearbeitungsmethoden mit signifikantem Unterschied zur Referenzmethode „Sof-Lex-Disks“ (dunkelblaue Säule) sind mit * gekennzeichnet)

Abkürzungen: DF 30 = Diamantfinierer 30 μ m, DF 20 = Diamantfinierer 20 μ m, HMF 16 = Hartmetallfinierer mit 16 Schneiden

Tab. 18: Post-hoc-Analyse zum Einfluss des Poliersystems auf das Profillängenverhältnis

	Polier-system 2	Polier-system 3	Polier-system 4	Polier-system 5	Polier-system 6
Poliersystem 1	p < 0,001	p = 0,008	p = 1,000	p < 0,001	p < 0,001
Poliersystem 2	---	p < 0,001	p < 0,001	p < 0,001	p = 1,000
Poliersystem 3	---	---	p = 0,268	p = 1,000	p < 0,001
Poliersystem 4	---	---	---	p = 0,008	p < 0,001
Poliersystem 5	---	---	---	---	p < 0,001

4.1.2.2.3 Wechselwirkungen zwischen den Ausarbeitungsverfahren und den Poliersystemen

In der Varianzanalyse war ein statistisch signifikanter Einfluss der Wechselwirkung „Ausarbeitungsverfahren*Poliersystem“ auf das Profillängenverhältnis nachgewiesen worden. Eine paarweise Post-hoc-Analyse der 19 Untersuchungsgruppen wurde nicht durchgeführt. Die Auswertung des Profillängenverhältnisses bei Anwendung der sechs Poliersysteme zeigte jedoch, dass sich deren Rangfolge bei Unterscheidung nach den drei Ausarbeitungsverfahren jeweils veränderte (Tabelle 19).

Tab. 19: Rangfolge der Poliersysteme bezogen auf das Profillängenverhältnis unterschieden nach dem Ausarbeitungsverfahren (beginnend beim niedrigsten Wert)

	Ausarbeitungsverfahren 1	Ausarbeitungsverfahren 2	Ausarbeitungsverfahren 3
Poliersystem 1	4.	6.	6.
Poliersystem 2	1.	1.	2.
Poliersystem 3	6.	3.	3.
Poliersystem 4	5.	5.	5.
Poliersystem 5	3.	4.	4.
Poliersystem 6	2.	2.	1.

4.1.3 Vergleich der beiden Untersuchungsparameter

4.1.3.1 Ergebnisübersicht

Tabelle 20 stellt für die 19 Bearbeitungsverfahren die Mittelwerte des arithmetischen Mittenrauwertes und des Profillängenverhältnis sowie den Rang dar, den das Bearbeitungsverfahren innerhalb des jeweiligen Bewertungsverfahrens erzielte.

Die beiden quantitativen Bewertungsverfahren zeigten eine Übereinstimmung in den ersten beiden Rängen, wobei die Bearbeitungsmethoden M18 (DF 30 / HMF / Diafix-oral) und M14 (DF 30 / HMF/ Hawe CP) am besten abschnitten.

Ebenso bestand Übereinstimmung hinsichtlich der letzten 5 Ränge, wo sich - wenn auch in unterschiedlicher Reihenfolge - folgende Bearbeitungsmethoden wiederfanden: M1 (DF 30 / Shofu), M3 (DF 30 / Hawe Occlubrush), M4 (DF 30 / Komet Diamant), M7 (DF 30 / DF 20 / Shofu), M13 (DF 30 / HMF / Shofu).

Tab. 20: Rangfolge der 19 Bearbeitungsmethoden in der Auswertung des arithmetischen Mittenrauwertes (R_a) und des Profillängenverhältnisses (LR)

Fettdruck: Referenzmethode „Sof-Lex-Disk“;
graue Schattierung: signifikanter Unterschied zur Referenzmethode

M	Bearbeitungsverfahren	R_a [μm] MW	Rang	LR [-] MW	Rang
M1	DF 30 / Shofu	1,033	18	1,550	16
M2	DF 30 / Hawe CP	0,754	7	1,362	6
M3	DF 30 / Hawe Occlubrush	1,387	19	1,606	19
M4	DF 30 / Komet Diamant	0,914	15	1,575	18
M5	DF 30 / Komet Siliciumcarbid	0,810	11	1,431	12
M6	DF 30 / Diafix-oral	0,827	13	1,370	7

Tab. 20 (Forts.): Rangfolge der 19 Bearbeitungsverfahren in der Auswertung des arithmetischen Mittenrauwertes (R_a) und des Profillängenverhältnisses (LR)

Fettdruck: Referenzmethode „Sof-Lex-Disk“;
graue Schattierung: signifikanter Unterschied zur Referenzmethode

M	Bearbeitungsverfahren	R_a [μm] MW	Rang	LR [-] MW	Rang
M7	DF 30 / DF 20 / Shofu	1,012	17	1,518	15
M8	DF 30 / DF 20 / Hawe CP	0,704	5	1,309	3
M9	DF 30 / DF 20 / Hawe Occlubrush	0,861	14	1,398	9
M10	DF 30 / DF 20 / Komet Diamant	0,778	8	1,473	13
M11	DF 30 / DF 20 / Komet Siliciumcarbid	0,787	9	1,424	11
M12	DF 30 / DF 20 / Diafix-oral	0,642	3	1,311	4
M13	DF 30 / HMF / Shofu	0,979	16	1,551	17
M14	DF 30 / HMF / Hawe CP	0,628	2	1,261	2
M15	DF 30 / HMF / Hawe Occlubrush	0,744	6	1,346	5
M16	DF 30 / HMF / Komet Diamant	0,819	12	1,482	14
M17	DF 30 / HMF / Komet Siliciumcarbid	0,807	10	1,407	10
M18	DF 30 / HMF / Diafix-oral	0,577	1	1,227	1
M19	Sof-Lex-Disks	0,660	4	1,375	8

4.1.3.2 Ausarbeitsverfahren

Sowohl für die Bestimmung des arithmetischen Mittenrauwertes (R_a) als auch für die Berechnung des Profillängenverhältnisses (LR) belegte die Varianzanalyse einen statistisch signifikanten Einfluss des Ausarbeitsverfahrens auf die Rauigkeit der Kompositoberfläche ($p < 0,001$). Die beiden quantitativen Messmethoden zeigten übereinstimmend, dass mit dem Ausarbeitsverfahren 1 (30 μm -Diamantfinierer) die größten Oberflächenrauigkeiten erzielt werden, wobei der Unterschied zu den Ausarbeitsverfahren 2 und 3 jeweils

statistisch signifikant war ($p < 0,001$). Die Ausarbeitsverfahren 2 und 3 unterschieden sich dagegen bei beiden Messmethoden nicht signifikant.

4.1.3.3 Poliersystem

Arithmetischer Mittenrauwert (R_a) und Profillängenverhältnis (LR) stimmten auch in der Bewertung der Poliersysteme überein. Bei zweistufiger Vorbehandlung (Ausarbeitsverfahren 2 und 3) und Verwendung von Diafix-oral-Polierern (M12, M18) oder Hawe Composite Polishers (M8, M14) konnten Ergebnisse erzielt werden, die in der Größenordnung der Referenzbearbeitungsmethode (M19) lagen oder besser waren. Dagegen zeigten unabhängig vom Ausarbeitsverfahren die Shofu CompoSite/CompoSite Fine-Polierer und der Komet-Gummipolierer mit Diamant sowie das Hawe Occlubrush-Polierbürstchen in Verbindung mit dem 30 μm -Diamantfinierer sowohl beim arithmetischen Mittenrauwert (R_a) als auch beim Profillängenverhältnis (LR) übereinstimmend höhere Werte.

4.2 Qualitative Beurteilung

4.2.1 Deskriptive Auswertung der REM-Aufnahmen

4.2.1.1 Shofu CompoSite / CompoSite Fine

Bei der Verwendung der Polierer Shofu CompoSite / CompoSite Fine zeigten sich unabhängig vom Ausarbeitungsverfahren deutliche Riefen, die der Polierer nicht einebnen konnte. Abbildung 15 stellt exemplarisch die REM-Aufnahme einer mit der Methode M1 (DF 30 / Shofu) bearbeiteten Kompositoberfläche dar.

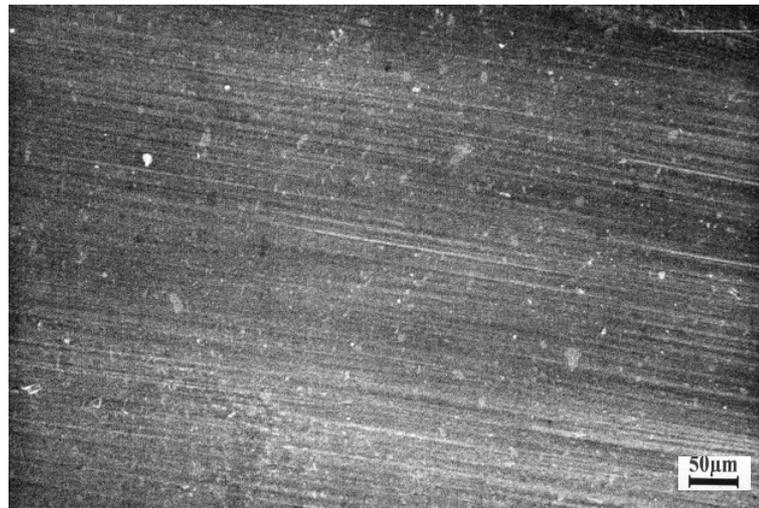


Abb. 15: REM-Aufnahme einer mit "Shofu" polierten Kompositoberfläche - Bearbeitungsmethode M1 (DF 30 / Shofu)

4.2.1.2 Hawe Composite Polisher

Der Hawe CP-Polierer war in der Lage, die bei der Ausarbeitung mit einem 30 µm-Diamantfinierer entstandenen Riefen weitgehend zu glätten (M2). Die Finiererkombination DF 30 / DF20 hinterließ deutlich geringere Spuren, so dass nach Politur eine nahezu glatte Oberfläche vorlag (M8). Ebenso führte die Verwendung eines Hartmetallfinierers im Verfahren M14 zu einer fast homogenen Kompositoberfläche mit nur vereinzelt Finiererspuren (Abb. 16).

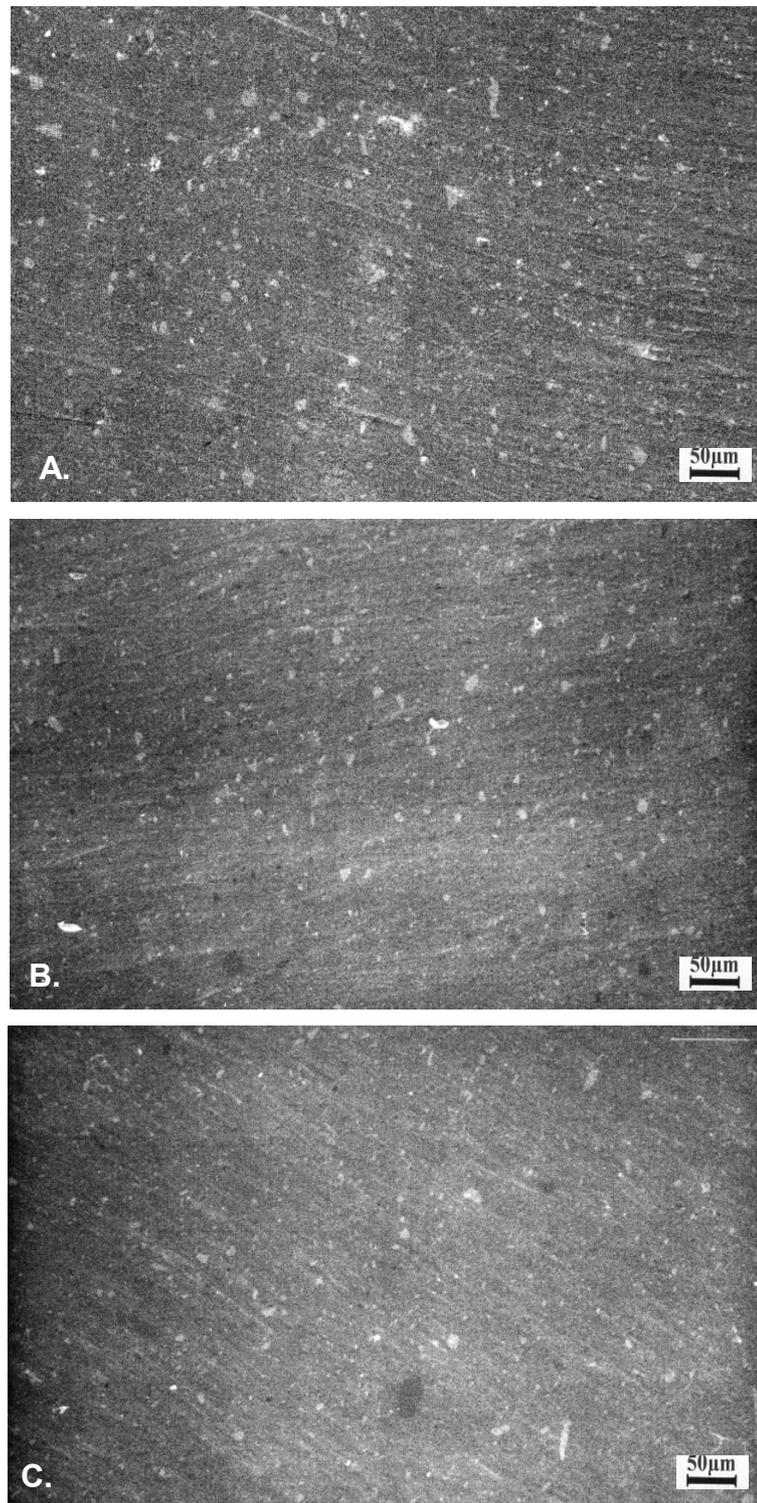


Abb. 16: REM-Aufnahmen von mit "Hawe CP" polierten Kompositoberflächen

A. Bearbeitungsmethode M2 (DF 30 / Hawe CP)

B. Bearbeitungsmethode M8 (DF 30 / DF 20 / Hawe CP)

C. Bearbeitungsmethode M14 (DF 30 / HMF / Hawe CP)

4.2.1.3 Hawe Occlubrush

Ein deutlicher Zusammenhang zwischen Ausarbeitsverfahren und Politurergebnis bestand auch bei Verwendung von Hawe Occlubrush-Polierbürstchen. Bei der Ausarbeitung mit einem 30 µm-Diamantfinierer waren in der REM-Aufnahme deutliche Furchen zu beobachten, die vom Polierer nicht geätzt werden konnten (M3). Etwas feiner waren die Bearbeitungsspuren, welche die Kombination aus DF 30/ DF 20 zurückgelassen hatte. Jedoch konnten auch diese Riefen nicht vollständig beseitigt werden (M9). Abb. 17B zeigt zusätzlich Spuren des Polierers, welche vom Metallring des Polierbürstchens stammen könnten. Bei Ausarbeitung durch die Kombination DF 30 / HMF hingegen konnte durch das Occlubrush-Polierbürstchen eine glatte und homogene Oberfläche erzielt werden (M15) (Abb. 17).

4.2.1.4 Komet Diamant

Der Gummipolierer mit Diamantpartikeln von Komet war nicht in der Lage, die Spuren des 30 µm-Diamantfinierers zu beseitigen. In der REM-Aufnahme zeigten sich deutliche Riefen (M4). Bei Kombination der Finierer DF 30 / DF 20 zeigten sich ebenfalls Riefen parallel zur Bearbeitungsrichtung, die jedoch weniger stark ausgeprägt waren. Zudem waren zentral leichte Vertiefungen zu beobachten, die vom Gummipolierer stammten (M10). Kam als zweiter Finierer ein Hartmetallfinierer zur Anwendung, waren die trotz Politur weiterhin zu erkennenden Ausarbeitungsspuren ebenfalls geringer als bei Verwendung von nur einem Finierer (M16). Die Politurergebnisse des Komet-Gummipolierers mit Diamantpartikeln fielen demnach bei Ausarbeitung mit zwei Finierern besser aus als bei alleiniger Verwendung eines Diamantfinierers (Abb. 18).

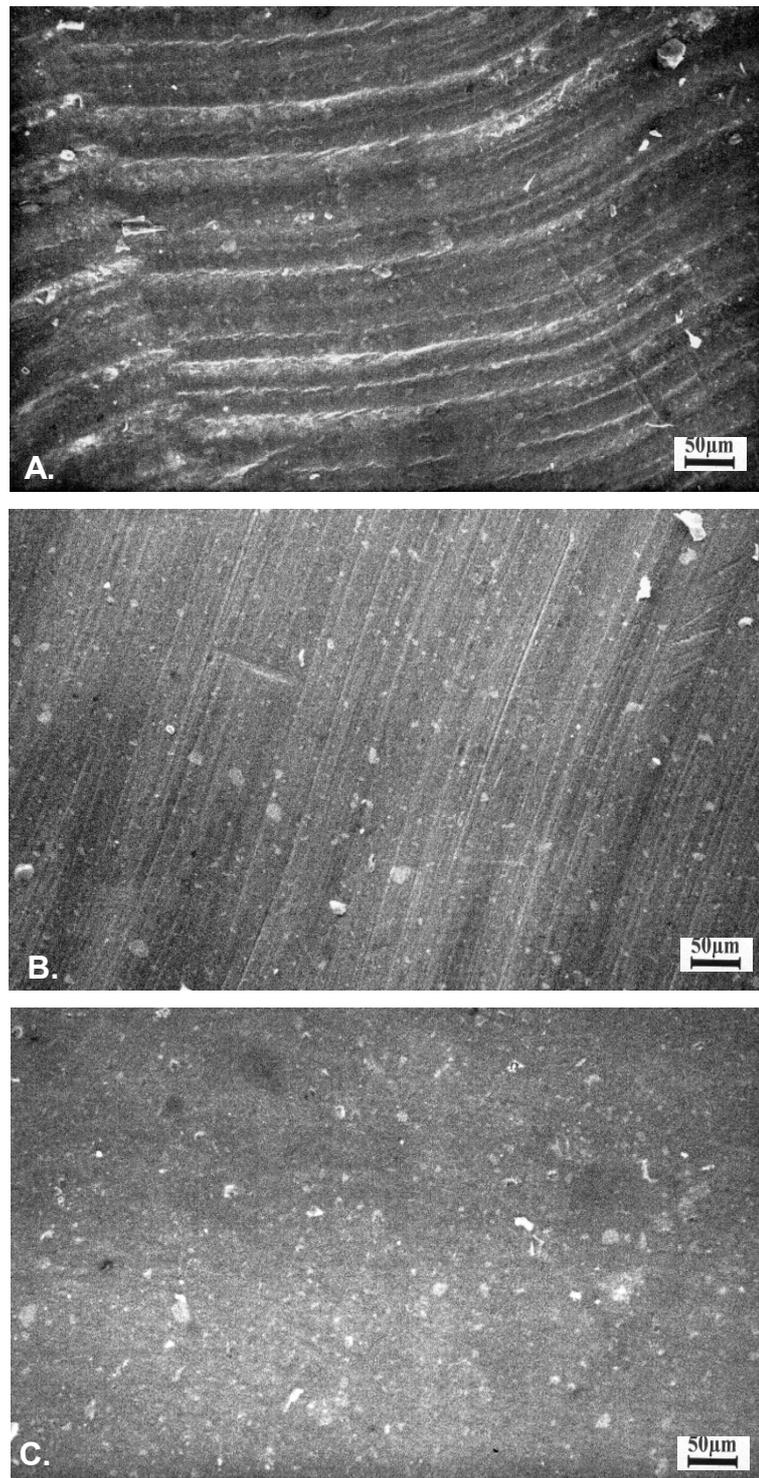


Abb. 17: REM-Aufnahmen von mit "Hawe Occlubrush" polierten Kompositoberflächen

A. Bearbeitungsmethode M3 (DF 30 / Hawe Occlubrush)

B. Bearbeitungsmethode M9 (DF 30 / DF 20 / Hawe Occlubrush)

C. Bearbeitungsmethode M15 (DF 30 / HMF / Hawe Occlubrush)

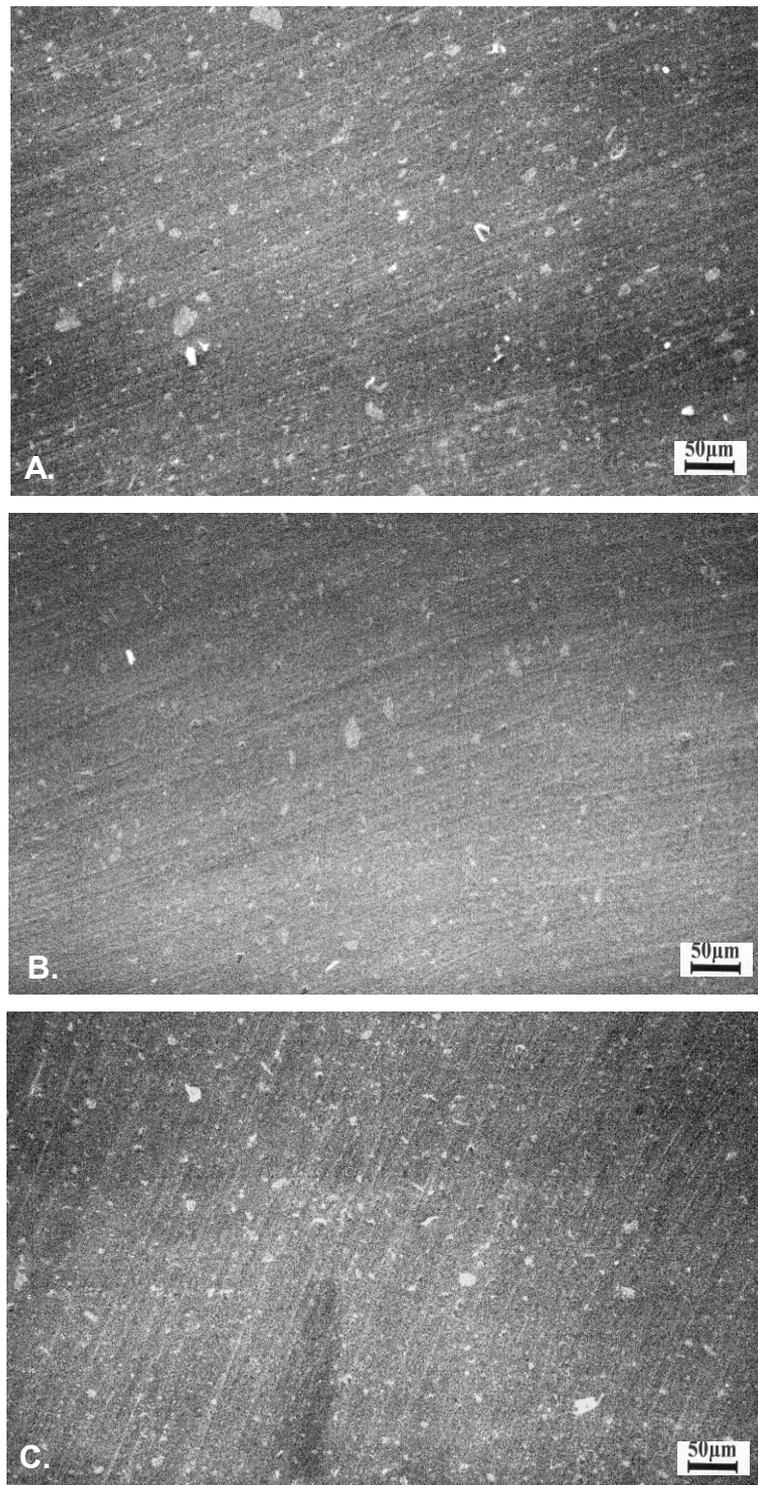


Abb. 18: REM-Aufnahmen von mit "Komet Diamant" polierten Kompositoberflächen

- A. Bearbeitungsmethode M4 (DF 30 / Komet Diamant)
- B. Bearbeitungsmethode M10 (DF 30 / DF 20 / Komet Diamant)
- C. Bearbeitungsmethode M16 (DF 30 / HMF / Komet Diamant)

4.2.1.5 Komet Siliciumcarbid

Bei der Politur der Kompositoberflächen mit einem Komet-Silikonpolierer mit Abrasivpartikeln aus Siliciumcarbid hatte das verwendete Ausarbeitungsverfahren keinerlei Einfluss auf das Politurergebnis. Exemplarisch zeigt Abb. 19 die REM-Aufnahme einer Kunststoffoberfläche, die mit der Methode M5 bearbeitet wurde. Es sind leichte Spuren des Finierers zu erkennen, die von dem verwendeten Silikonpolierer nicht vollständig geglättet wurden.



Abb. 19: REM-Aufnahme einer mit "Komet Siliciumcarbid"polierten Kompositoberfläche - Bearbeitungsmethode M5 (DF 30 / Komet Siliciumcarbid)

4.2.1.6 Diafix-oral

Mit Diafix-oral polierte Kompositoberflächen zeigten bei Ausarbeitung mit einem 30 µm-Diamantfinierer nur leichte Riefen bei ansonsten sehr guter Politurleistung (M6). Wurden zum Ausarbeiten zwei Finierer verwendet, war der Diafix-oral-Polierer in der Lage, eine sehr glatte und homogene Kompositoberfläche zu erzeugen (M12, M18) (Abb. 20).

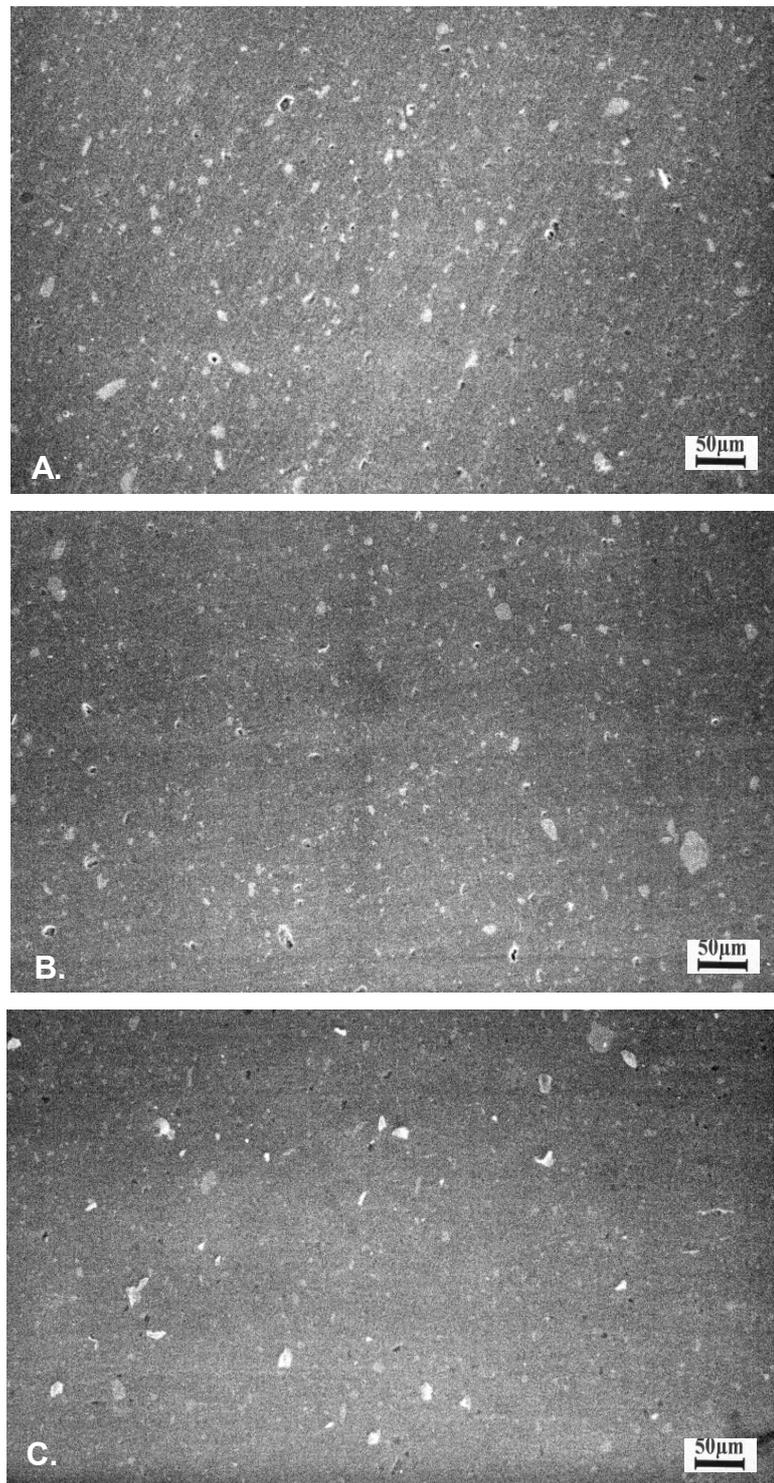


Abb. 20: REM-Aufnahmen von mit "Diafix-oral" polierten Kompositoberflächen

- A. Bearbeitungsmethode M6 (DF 30 / Diafix oral)
- B. Bearbeitungsmethode M12 (DF 30 / DF 20 / Diafix oral)
- C. Bearbeitungsmethode M18 (DF 30 / HMF / Diafix oral)

4.2.1.7 Sof-Lex-Disk-System

Sof-Lex-Disks, die in der vorliegenden Studie als Referenzverfahren herangezogen wurden, erzeugten glatte, homogene Kompositoberflächen (Abb. 21).

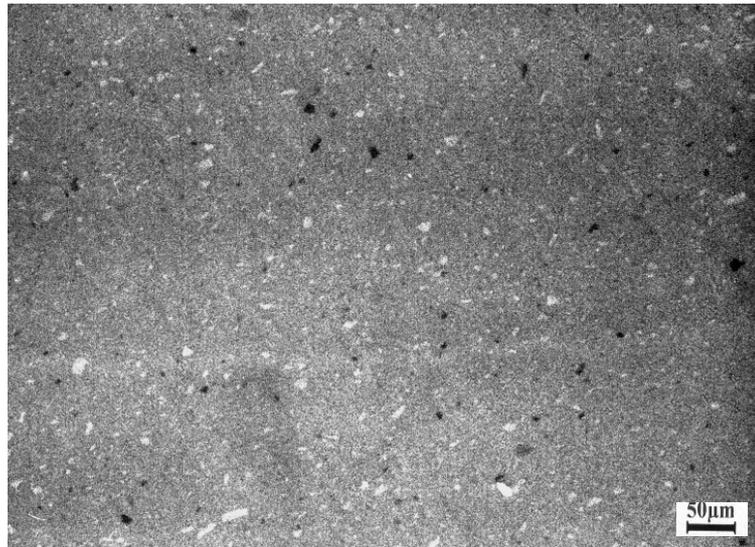


Abb. 21: REM-Aufnahme einer mit Sof-Lex-Disks polierten Kompositoberfläche - Bearbeitungsmethode M19 (Sof-Lex-Disks)

4.2.2 Semiquantitative Auswertung der REM-Aufnahmen

Tabelle 21 fasst die Ergebnisse der semiquantitativen Auswertung der Kompositoberflächen bezogen auf alle drei Prüfkörper zusammen. Abbildung 22 illustriert die prozentuale Verteilung der Kategorien 1 bis 3 über die insgesamt 36 quadratischen Prüffelder.

Tab. 21: Semiquantitative Bewertung der Kompositoberflächen bei Verwendung der Bearbeitungsmethoden M1 bis M19 – Mittelwerte aus drei Prüfkörpern

M	Bearbeitungsmethode	MW	SD	Min	Max	p vs. M19
M1	DF 30 / Shofu	29,3	6,4	22,0	34,0	0,081
M2	DF 30 / Hawe CP	22,0	3,6	19,0	26,0	0,788
M3	DF 30 / Hawe Occlubrush	25,3	12,2	12,0	36,0	0,353
M4	DF 30 / Komet Diamant	21,0	7,0	13,0	26,0	0,898
M5	DF 30 / Komet Siliciumcarbid	19,3	6,4	12,0	24,0	0,988
M6	DF 30 / Diafix-oral	12,7	1,2	12,0	14,0	1,000
M7	DF 30 / DF 20 / Shofu	24,0	5,0	19,0	29,0	0,515
M8	DF 30 / DF 20 / Hawe CP	18,7	5,1	13,0	23,0	0,997
M9	DF 30 / DF 20 / Hawe Occlubrush	34,0	3,5	30,0	36,0	0,009
M10	DF 30 / DF 20 / Komet Diamant	25,3	4,2	22,0	30,0	0,353
M11	DF 30 / DF 20 / Komet Siliciumcarbid	19,0	5,0	14,0	24,0	0,994
M12	DF 30 / DF 20 / Diafix-oral	15,3	1,5	14,0	17,0	1,000
M13	DF 30 / HMF / Shofu	32,3	6,4	25,0	36,0	0,021
M14	DF 30 / HMF / Hawe CP	15,7	3,5	12,0	19,0	1,000
M15	DF 30 / HMF / Hawe Occlubrush	20,3	13,6	12,0	36,0	0,949
M16	DF 30 / HMF / Komet Diamant	26,0	12,5	12,0	36,0	0,285
M17	DF 30 / HMF / Komet Siliciumcarbid	17,0	1,7	16,0	19,0	1,000
M18	DF 30 / HMF / Diafix-oral	12,0	0,0	12,0	12,0	1,000
M19	Sof-Lex-Disk	14,3	2,1	12,0	16,0	---

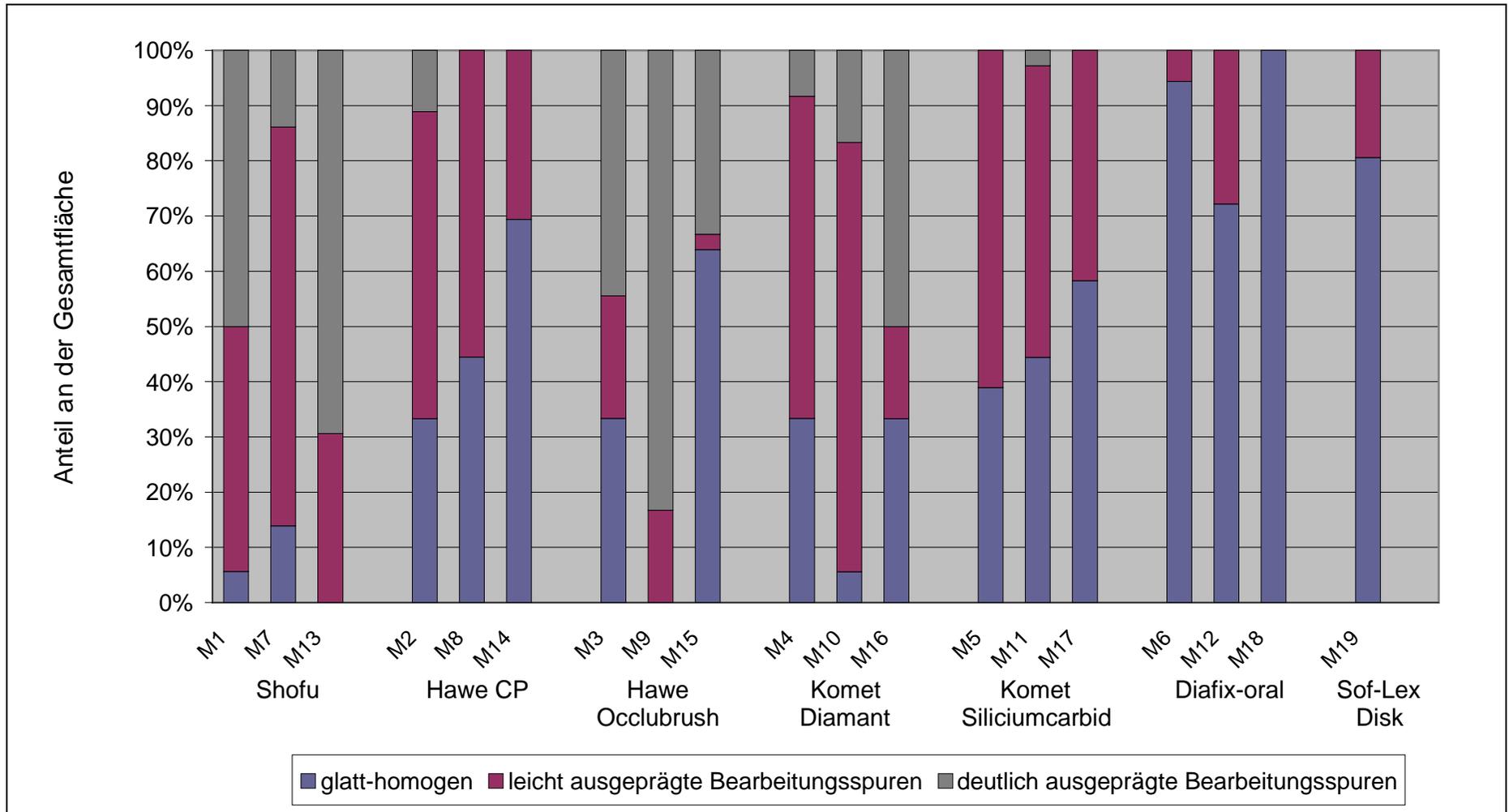


Abb. 22: Semiquantitative Bewertung der Kompositoberflächen bei Verwendung der Bearbeitungsmethoden M1 bis M19 (prozentuale Darstellung)

Die semiquantitative Auswertung der REM-Aufnahmen zeigte sowohl in der prozentualen Darstellung als auch in der Mittelwertberechnung die besten Ergebnisse für die Bearbeitungsmethode M18 (DF 30 / HMF / Diafix-oral). Alle 36 quadratischen Bewertungsfelder der drei Prüfkörper konnten der Kategorie 1 („glatt-homogen“) zugeordnet werden. Dementsprechend lag die durchschnittliche Punktzahl bezogen auf die drei Prüfkörper bei 12 ± 0 . Ein statistisch signifikanter Unterschied zur Referenzbearbeitungsmethode M19 (Sof-Lex-Disks) bestand nicht, bei der 80,6% der Bewertungsfelder als „glatt-homogen“ und 19,4% „mit leicht ausgeprägten Bearbeitungsspuren“ eingestuft wurden (Mittelwert: $14,3 \pm 2,1$).

Der mit 94,4% zweithöchste Anteil an glatt-homogenen Arealen konnte mit der Bearbeitungsmethode 6 (DF 30 / Diafix-oral) erzielt werden, wobei die restlichen 5,6% der Kategorie 2 („leicht ausgeprägte Bearbeitungsspuren“) zugeordnet wurden (Mittelwert: $12,7 \pm 1,2$). Mit deutlicherem Abstand folgten die Bearbeitungsmethoden M12 (DF 30 / DF 20 / Diafix-oral) und M14 (DF 30 / HMF / Hawe CP) mit Anteilen an der Kategorie 1 von 72,2% bzw. 69,4% und Mittelwerten von $15,3 \pm 1,5$ bzw. $15,7 \pm 3,5$.

Überhaupt keine glatt-homogenen Areale wiesen Kompositoberflächen auf, bei denen die Bearbeitungsmethoden M9 (DF 30 / DF 20 / Hawe Occlubrush) und M13 (DF 30 / HMF / Shofu) zum Einsatz gekommen waren, während 83,3% bzw. 69,4% der Bewertungsfelder der Kategorie 3 („deutlich ausgeprägte Bearbeitungsspuren“) zugeordnet wurden. Entsprechend hoch war auch die durchschnittliche Bewertungszahl je Prüfkörper mit $34,0 \pm 3,5$ (M9) bzw. $32,3 \pm 6,4$ (M13). Beide Bearbeitungsmethoden schnitten statistisch signifikant schlechter ab als die Referenzmethode ($p = 0,009$ bzw. $p = 0,021$) (Tabelle 21, Abbildung 17).

5 Diskussion

5.1 Methodenkritik

5.1.1 Studiendesign

Die vorliegende Untersuchung stellt eine In-vitro-Studie an planen Prüfkörpern dar, was möglicherweise die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die klinische Situation einschränkt. Untersuchungen an extrahierten natürlichen Zähnen unter praxisähnlichen Bedingungen gibt es jedoch nur wenige [4, 5, 55, 66, 88]. Noch seltener finden sich in der Literatur klinische Studien zu dieser Fragestellung, da diese aufgrund der erforderlichen Replikatechnik nur mit großem Aufwand durchzuführen sind [46, 48].

5.1.2 Auswahl der untersuchten Ausarbeitsverfahren und Poliersysteme

Ziel der vorliegenden In-vitro-Studie war es, den Einfluss verschiedener Ausarbeitsverfahren und Poliersysteme auf die Qualität von Feinpartikelhybridkompositoberflächen zu untersuchen.

Da die Eignung von Diamant- und Hartmetallfinierern zur initialen Bearbeitung von Kompositoberflächen in der Literatur kontrovers diskutiert wird, sollten beide Finierertypen im Rahmen dieser Untersuchung erprobt werden. Bei den Bearbeitungsmethoden 1-6 wurde vor Anwendung des jeweiligen Poliersystems ausschließlich ein Diamantfinierer der Körnung 30 μm verwendet, während bei den Bearbeitungsmethoden 7-12 konsekutiv zwei Diamantfinierer der Körnungen 30 μm und 20 μm zum Einsatz kamen. Bei den Bearbeitungsmethoden 13-

18 schließlich erfolgte die Ausarbeitung mit der Kombination eines Diamantfinierers (30 µm) und eines Hartmetallfinierers.

Bei der Auswahl der Poliersysteme sollte ein möglichst großes Spektrum der auf dem Markt angebotenen Polierer erprobt werden, wobei sowohl neuere Entwicklungen als auch klassische Polierkörper Berücksichtigung fanden. Zu den klassischen Poliersystemen zählen beispielsweise das Hawe Composite Polisher-System, das Abrasivpartikel aus Aluminiumoxid enthält, oder der Gummipolierer von Komet mit Diamantkorn. Ein Poliersystem der neueren Generation stellt das Shofu CompoSite/CompoSite Fine-Poliersystem dar, bei dem Zirconiumoxid als Abrasivstoff für die Oberflächenbearbeitung eingesetzt wird. Ebenfalls zu den neueren Polierern gehören der Hawe Occlubrush-Polierer mit Borsten aus aromatischem Polyamid und Siliciumcarbid als Abrasivstoff sowie der Silikonpolierer Siliciumcarbid von Komet. Darüber hinaus sollte der Diafix-oral-Polierer, ein Polierverfahren mit diamantimprägniertem Filzrad, auf Grund der bislang positiven Ergebnisse in anderen Untersuchungen [43, 44, 45] in der vorliegenden Studie ebenfalls nicht fehlen.

Flexible Disks sind das am häufigsten untersuchte Ausarbeitungs- und Politurverfahren, das in zahlreichen Studien profilometrischen und/oder rasterelektronenmikroskopischen Evaluierungen unterworfen wurde, wobei für alle Kompositstypen auf planen bzw. konvexen Flächen ein guter Glättungseffekt nachgewiesen werden konnte [1, 5, 8, 32, 33, 34, 36, 43, 44, 45, 65, 69, 73, 84, 85, 87, 88, 97, 98, 99, 100, 102, 112]. Da flexible Disks in der Bearbeitung und Politur von Kompositoberflächen als klinischer Standard gelten, wurden das Sof-Lex-Disk-System im Rahmen dieser Studie als Referenzbearbeitungsmethode herangezogen.

5.1.3 Bearbeitung der Prüfkörper

Die Verwendung verschiedener Finierer und Polierer zur Bearbeitung der Kompositprüfkörper erfolgte stets entsprechend der Herstellerangaben, um das optimale Leistungspotential eines jeden Instrumentes auszuschöpfen. Zur Gewährleistung von vergleichbaren Untersuchungsbedingungen kam jeder Finierer nur dreimal zum Einsatz. Die Polierer hingegen wurden nur einmal verwendet, um eine Beeinflussung des Ergebnisses durch Materialverschleiß sicher ausschließen zu können. Zudem wurde im Sinne vergleichbarer Studienbedingungen versucht, als Vertreter der verschiedenen Poliersysteme jeweils Polierinstrumente in Kelchform auszuwählen, da in dieser Form die meisten Polierer verfügbar waren. Ausnahmen stellten das Diafix-oral-Polierrad sowie die scheibenförmigen Sof-Lex-Disks dar.

5.1.4 Methoden zur Evaluierung der Kompositoberflächen

5.1.4.1 Quantitative Beurteilung

An eine ideale Methode zur quantitativen Beurteilung von Oberflächen sind folgende Anforderungen zu stellen:

- Keine Beschädigung des Präparats durch die Untersuchung
- Flächenhafte Erfassung der Oberfläche
- Möglichkeit der Erfassung verschiedener Oberflächenparameter
- Geringer apparativer Aufwand
- Hohe Genauigkeit der Messvorrichtung
- Einfache Auswertung der Ergebnisse
- Quantifizier- und Reproduzierbarkeit der Ergebnisse

Eine gleichzeitige Erfüllung von allen genannten Kriterien ist nicht möglich, da beispielsweise eine hohe Genauigkeit nur mit einem entsprechend großen apparativen Aufwand erzielt werden kann. Aus diesem Grund müssen die ge-

nannten Forderungen im Hinblick auf die jeweils interessierende Fragestellung modifiziert werden. In der vorliegenden Studie wurde zur quantitativen Evaluierung der Kompositoberflächen die sog. Profilometrie eingesetzt, bei der es sich um ein etabliertes und in der Zahnmedizin häufig verwendetes Verfahren zur Beurteilung von Oberflächen handelt. Auf die Vor- und Nachteile dieser Methode wurde bereits im Gliederungspunkt 2.3.1 ausführlich eingegangen.

Zur Durchführung der Tastschnittuntersuchung kam in dieser Studie anstatt des in anderen Untersuchungen häufig verwendeten mechanischen Abtasters ein Focodyn-Lasertaster zum Einsatz, um einerseits eine möglichst große Messgenauigkeit zu erreichen und andererseits eine berührungslose Abtastung zu gewährleisten. Mechanische Taster weisen oft eine im Verhältnis zu den zu erwartenden Messergebnissen zu groß dimensionierte Tastspitze auf und können auf diese Art und Weise das Ergebnis verfälschen. In Untersuchungen mit mechanischen Tastsystemen fällt oftmals auf, dass die Spitzenradien ein Vielfaches der gemessenen Rautiefe betragen. Beispielsweise publizierte die Arbeitsgruppe um Tjan [100] einen arithmetischen Mittenrauwert (R_a) von 0,11 μm bei einem Tastspitzenradius von 10 μm , Berastegui et al. [5] gaben einen arithmetischen Mittenrauwert von 0,29 μm bei einem Spitzenradius von 5 μm an. Optische Tastsysteme wie der hier verwendete Focodyn-Lasertaster gestatten mit einem Fokusdurchmesser von 1 μm eine hohe Genauigkeit bei der Auflösung der zu prüfenden Kompositoberfläche und leisten damit einen wesentlichen Beitrag zur Zuverlässigkeit der im Rahmen der vorliegenden Studie durchgeführten Messungen [36, 40, 41, 83]. Einen weiteren Vorteil der optischen Taster stellt die berührungslose Abtastung der Oberfläche dar, da es bei mechanischen Abtastsystemen durch die Oberflächenberührung des mechanischen Tasters zu einer Verformung der Oberfläche, der sogenannten Oberflächenpressung, kommen kann. Dies schränkt die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse ein und macht die Durchführung weiterer Untersuchung unmöglich. Die Auswahl des Tastsystems hat demnach einen gewissen Einfluss auf die Messergebnisse der profilometrischen Untersuchung.

Zur Darstellung der Ergebnisse der profilometrischen Untersuchung wurden in der vorliegenden Studie der arithmetische Mittenrauwert R_a und das Profillängenverhältnis herangezogen. Der arithmetische Mittenrauwert R_a ist ein vertikaler Parameter, der in der Literatur sehr häufig zur Anwendung kommt. Er beurteilt die Oberfläche durch Messung des Abstandes der ertasteten Profilkennlinie von einer konstruierten Ausgleichsgeraden, wobei nur Profilamplituden in der Y-Richtung berücksichtigt werden. Oberflächenrauigkeiten zeichnen sich jedoch nicht nur durch ihre vertikale, sondern auch durch ihre horizontale Dimension aus, wobei insbesondere die Zahl der Profilunregelmäßigkeiten eine Rolle spielt. In der vorliegenden Untersuchung wurde daher zur Darstellung der profilometrischen Untersuchungsergebnisse zusätzlich das Profillängenverhältnis (LR) herangezogen, das beide Dimensionen berücksichtigt [38, 40, 43, 44].

5.1.4.2 Qualitative Beurteilung

Die qualitative Beurteilung der Kompositoberflächen wurde in dieser Studie mit Hilfe eines Rasterelektronenmikroskops vorgenommen. Diese Form der Beurteilung wurde in der Literatur als Ergänzung der profilometrischen Untersuchungsergebnisse mehrfach als sinnvoll und nötig beschrieben.

Aufgrund des großen Auflösungsvermögens und der Tiefenschärfe des Rasterelektronenmikroskops werden die Oberflächengeometrie und die Feinstrukturen der Oberflächen besonders gut dargestellt. So kann beispielsweise beurteilt werden, welche Oberflächenstrukturen durch welche Bearbeitungsmethoden entstanden sind und Rückschlüsse auf deren Eignung gezogen werden. Ebenso werden Oberflächendestruktionen erkennbar, die durch das Herausbrechen von Füllkörpern aus der weicheren Kunststoffmatrix entstanden sind [70, 100].

Die Tatsache, dass bei ausreichender Detailgröße in einer REM-Aufnahme nicht gleichzeitig die komplette Oberfläche erfasst werden kann und hierzu

mehrere Ansichten erforderlich sind, stellt einen Nachteil der raster-elektronenmikroskopischen Untersuchung dar. Ein weiterer Nachteil des in dieser Studie verwendeten REM-Verfahrens liegt in der Notwendigkeit der Oberflächenvorbehandlung, dem sog. Sputtern, bei dem die Oberfläche mit Gold bedampft wird, was jedoch bei den moderneren Feldemissionsgeräten nicht erforderlich ist. Der Prüfkörper kann im Anschluss an die rasterelektronenmikroskopische Beurteilung für weitere Untersuchungen nicht mehr verwendet werden. Zudem ist die Beurteilung der Oberflächenrauigkeiten von verschiedenen objektiven Faktoren, wie z.B. dem Neigungswinkel des Präparates, beeinflusst [25]. Ebenso sollte bei der Bewertung der qualitativen Untersuchungsergebnisse beachtet werden, dass die Beurteilung der Oberflächen stets subjektiv ist und daher nur schwer mit den Resultaten anderer Studien verglichen werden kann.

5.2 Interpretation der Ergebnisse

5.2.1 Quantitative Beurteilung

Exakte metrische Angaben für die mit der Politur anzustrebende Rautiefe finden sich in der Literatur nicht. Eine Möglichkeit zur Bewertung des Poliererfolges ist der Vergleich der Oberflächenrauigkeit der Kompositoberflächen mit der Oberflächenrauigkeit des Zahnschmelzes. Der arithmetische Mittenrauwert des Zahnschmelzes wird in der Literatur mit Werten zwischen 0,4 und 0,7 μm genannt [55, 108, 110]. Diese Angaben liegen etwa in der Größenordnung, in welcher auch die menschliche Zunge Oberflächenrauigkeiten differenzieren kann (0,25-0,50 μm) [35].

In der vorliegenden Studie wurde mit 3 der 18 untersuchten Bearbeitungsverfahren niedrigere Mittenrauwerte erzielt als mit der Referenzmethode Sof-Lex-Disks ($0,660 \pm 0,018 \mu\text{m}$), jedoch erwies sich keiner der Unterschiede als stati-

stisch signifikant. Die niedrigsten Mittenrauwerte wurden bei den Bearbeitungsverfahren M18 ($0,577 \pm 0,149 \mu\text{m}$), M14 ($0,628 \pm 0,076 \mu\text{m}$) und M12 ($0,642 \pm 0,065 \mu\text{m}$) beobachtet. Bei den beiden erstgenannten Verfahren erfolgte die Ausarbeitung mit der Kombination 30 μm -Diamantfinierer/Hartmetallfinierer, zur Politur wurde der Diafix-oral-Polierer (M18) bzw. der Hawe Composite Polisher (M14) herangezogen. Bei der Bearbeitungsmethode M12 kam bei der Ausarbeitung konsekutiv ein 30 μm - und ein 20 μm -Diamantfinierer zum Einsatz, poliert wurde mit einem Diafix-oral-Polierer.

Zusätzlich zum arithmetischen Mittenrauwert wurde bei der Auswertung der Profilometriedaten das Profillängenverhältnis berechnet. Hierbei erzielten insgesamt 6 der 18 Bearbeitungsmethoden geringere Werte als die Referenzmethode Sof-Lex-Disks ($1,375 \pm 0,039$), wobei der Unterschied lediglich bei Verwendung des Diafix-oral-Polierers (M18) in Verbindung mit DF 30 / HMF statistisch signifikant war ($1,227 \pm 0,054$). Im Vergleich zu den Sof-Lex-Disks nicht signifikant niedriger war das Profillängenverhältnis bei den Bearbeitungsmethoden M14 ($1,261 \pm 0,045$), M8 ($1,309 \pm 0,046$), M12 ($1,311 \pm 0,041$), M15 ($1,346 \pm 0,049$), M2 ($1,362 \pm 0,112$) und M6 ($1,370 \pm 0,086$). Mit Ausnahme des Bearbeitungsverfahrens M15 (DF 30 / HMF/ Hawe Occlubrush) handelt es sich hierbei ausschließlich um Kombinationen der Poliersysteme Hawe Composite Polisher und Diafix-oral mit den drei möglichen Ausarbeitungsverfahren.

Die zwei in der vorliegenden unserer Studie gewählten Rauigkeitsparameter zeigten in der Bewertung der 19 Bearbeitungsmethoden eine exakte Übereinstimmung in den ersten beiden Rängen, wobei die Bearbeitungsmethoden M18 (DF 30 / HMF / Diafix-oral) und M14 (DF 30 / HMF/ Hawe CP) am besten abschnitten. Das Bearbeitungsverfahren M12 (DF 30 / DF 20 / Diafix-oral), das unter Zugrundelegung des Mittenrauwertes an dritter Stelle rangierte, nahm bei Auswertung nach dem Profillängenverhältnis den vierten Platz ein. Demzufolge war eine hohe Übereinstimmung von arithmetischem Mittenrauwert und Profillängenverhältnis bei Prüfkörpern mit einer hohen Oberflächenqualität zu beobachten. Ebenso deckten sich die Ergebnisse von arithmetischem Mittenrau-

wert und Profillängenverhältnis auf den letzten fünf Rängen, wo sich - wenn auch in unterschiedlicher Reihenfolge - folgende Bearbeitungsmethoden wiederfanden: M1 (DF 30 / Shofu), M3 (DF 30 / Hawe Occlubrush), M4 (DF 30 / Komet Diamant), M7 (DF 30 / DF 20 / Shofu), M13 (DF 30 / HMF / Shofu).

Da das Profillängenverhältnis sowohl die vertikale und horizontale Oberflächendimension als auch die veränderte Anzahl von Profilunregelmäßigkeiten erfasst, ist seine Aussagekraft bezüglich der Oberflächenrauigkeit höher einzustufen als die des arithmetischen Mittenrauwertes [38]. Dennoch ließ sich in der vorliegenden Studie eine gute Übereinstimmung in der Oberflächenbeurteilung mittels arithmetischem Mittenrauwert und Profillängenverhältnis beobachten.

Die gute Übereinstimmung von arithmetischem Mittenrauwert und Profillängenverhältnis spiegelte sich auch in den Ergebnissen der Varianzanalyse wider, wobei für beide Darstellungsformen ein statistisch signifikanter Einfluss des Ausarbeitsverfahrens und des Poliersystems sowie auch der Wechselwirkung zwischen Ausarbeitsverfahren und Poliersystem nachgewiesen wurde. Bei den Ausarbeitsverfahren führten die beiden untersuchten Kombinationen von jeweils zwei Finierern (30 µm-/20 µm-Diamantfinierer bzw. 30 µm-Diamantfinierer/Hartmetallfinierer) zu signifikant geringeren Oberflächenrauigkeiten als die alleinige Verwendung eines 30 µm-Diamantfinierers. Hinsichtlich des Einflusses des Poliersystems bestand ebenfalls weitgehende Übereinstimmung, wobei besonders die statistisch niedrigeren Werte des Diafix-oral-Polierers im Vergleich zu allen anderen Poliersystemen mit Ausnahme des Hawe Composite Polishers auffielen, die sich sowohl im arithmetischen Mittenrauwert als auch im Profillängenverhältnis ausdrückten.

Zusammenfassend ergab die quantitative Beurteilung der Kompositoberflächen in dieser Studie einerseits Vorteile für die Verwendung von zwei konsekutiven Finierern bei der Ausarbeitung, wobei sich statistisch kein Unterschied zwischen den Kombinationen 30 µm-/20 µm-Diamantfinierer und 30 µm-Diamantfinierer/Hartmetallfinierer nachweisen ließ.

Bei den Poliersystemen zeigten sich deutliche Vorteile für den Diafix-oral-Polierer und die Hawe Composite Polisher. Beim Diafix-oral-Polierer handelt es sich um ein diamantimprägniertes Filzrad, das bereits in anderen Studien untersucht und positiv beurteilt wurde [43, 44, 45]. Im Gegensatz zu diesem einstufigen Poliersystem werden bei den Hawe Composite Polierern vier Polierer verwendet, die eine unterschiedliche Korngröße der Aluminiumoxidpartikel aufweisen. Die daraus resultierende stufenweise Reduzierung der Rautiefen erleichtert dem einzelnen Polierer die volle Entfaltung seiner Polierwirkung, da mit einer bestimmten Körnung der Abrasivpartikel auch nur bestimmte Rauigkeiten der Ausgangsoberfläche geglättet werden können.

Am schlechtesten schnitt dagegen mit dem Shofu CompoSite/CompoSite Fine-Poliersystem ein zweistufiges Polierverfahren der neueren Generation ab. Diese Polierer, die Aluminium- und Zirconiumoxid als Abrasivstoffe verwenden, sind extrem weich und flexibel und daher - unabhängig vom verwendeten Ausarbeitungsverfahren - nicht in der Lage, den für die Glättung erforderlichen Abrieb auf der Kompositoberfläche zu erzeugen. Die gemessenen Rautiefen waren teilweise so hoch, dass von einer Politur eigentlich nicht gesprochen werden kann.

Ein teilweise sehr schlechtes Ergebnis erzielte auch der Hawe Occlubrush-Polierer, bei dem es sich ebenfalls um ein einstufiges Poliersystem der neueren Generation handelt. Der Hawe Occlubrush-Polierer verfügt über Borsten aus aromatischem Polyamid und Siliciumcarbid, die in der vorliegenden Studie nur bei vorangegangener Ausarbeitung mit zwei Finierern zu einer Glättung der Kunststoffoberfläche in der Lage waren. In Kombination mit einem 30 µm-Diamantfinierer erbrachte dieser Polierer in beiden profilometrischen Auswertungen die höchsten Werte. Bei vorangegangener Ausarbeitung mit einem 30 µm-Diamantfinierer und einem Hartmetallfinierer hingegen rangierte diese Bearbeitungsmethode in der profilometrischen Untersuchung an sechster (R_a) bzw. fünfter (LR) Stelle und lag beim Profillängenverhältnis (LR) sogar unter dem Wert der Sof-Lex-Disks. Bei der Vorbehandlung mit zwei Finierern ent-

stand also durch die Politur eine deutlich bessere Oberflächenqualität. Dies lässt den Schluss zu, dass bei Verwendung des Occlubrush-Polierbürstchens wie bei allen einstufigen Polierverfahren eine ausreichende vorbereitende Oberflächenglättung bereits beim Finieren von besonderer Bedeutung ist. Als Grund für die schlechte Polierwirkung des Occlubrush-Polierbürstchens kommt einerseits die zu geringe Abrasivität bzw. die Größe der in die Borstenfilamente eingearbeiteten Polierkörper in Frage. Ebenso ist es denkbar, dass die Siliciumcarbidpartikel nicht ausreichend fest mit den Borstenfilamenten verbunden sind.

Generell ist also bei der Bewertung der Ergebnisse auch die unterschiedliche Anzahl der Bearbeitungsschritte zu berücksichtigen, die bei Verwendung der verschiedenen Poliersysteme durchzuführen sind. Watanabe et al. [105] ermittelten im Rahmen eines In-vitro-Vergleichs verschiedener ein- und mehrstufiger Poliersysteme geringere arithmetische Mittenrauwerte bei Verwendung mehrstufiger Systeme. Beispielsweise lagen bei Verwendung der Hawe Composite Polisher, die in dieser Studie sehr geringe Oberflächenrauigkeiten erzielten, vier Bearbeitungsschritte vor, während es sich beim Hawe Occlubrush-Polierbürstchen mit den höchsten Rauigkeitswerten um ein einstufiges Verfahren handelte.

In Anbetracht der guten Ergebnisse des Diafix-oral-Polierers sollte an dieser Stelle jedoch erwähnt werden, dass es sich hierbei ebenfalls um ein einstufiges Poliersystem handelt. Allerdings war auch hier ein deutlicher Einfluss des verwendeten Ausarbeitungsverfahrens zu erkennen, da der Diafix-oral-Polierer und das Hawe Composite Polisher-System insbesondere nach zweistufiger Ausarbeitung mit 30 μm -/20 μm -Diamantfinierern oder der Kombination 30 μm -Diamantfinierer/Hartmetallfinierer einen guten Glättungseffekt auf Kompositoberflächen erzielten. Die beiden Poliersysteme stellen demnach unter den vorliegenden Bedingungen eine Alternative zu den bewährten Sof-Lex-Disks dar.

5.2.2 Qualitative Beurteilung

Die semiquantitative Auswertung der REM-Aufnahmen anhand der erzielten Beurteilungspunkte zeigte sowohl in der prozentualen Darstellung als auch in der Mittelwertberechnung in Übereinstimmung mit der quantitativen Auswertung die besten Ergebnisse für die Bearbeitungsmethode „DF 30 / HMF / Diafix-oral“, da alle 36 Bewertungsfelder der Kategorie 1 („glatt-homogen“) zugeordnet werden konnten. Nur geringfügig schlechter waren die Ergebnisse, die mit dem Diafix-oral-Polierer erzielt wurden, wenn die Oberfläche mit einem „DF 30“ allein (mittlere Gesamtpunktzahl: $12,7 \pm 1,2$) oder mit der Kombination „DF 30 / DF 20“ (mittlere Gesamtpunktzahl: $15,3 \pm 1,5$) ausgearbeitet worden war. Ein statistisch signifikanter Unterschied zur Referenzbearbeitungsmethode „Sof-Lex-Disks“, bei der 80,6% der Bewertungsfelder als „glatt-homogen“ und 19,4% „mit leicht ausgeprägten Bearbeitungsspuren“ eingestuft wurden (mittlere Gesamtpunktzahl: $14,3 \pm 2,1$), bestand für keine der drei genannten Bearbeitungsmethoden.

Bei der rasterelektronenmikroskopischen Betrachtung der mit Diafix-oral und mit Sof-Lex-Disks polierten Oberflächen fiel kaum ein Unterschied auf. Sowohl der Diafix-oral-Polierer als auch die Sof-Lex-Scheiben sind in der Lage, Matrix und Füllpartikel zu glätten und somit einen guten Poliereffekt zu erzielen.

Die Bearbeitungsmethode M14 (DF 30 / HMF/ Hawe CP) hatte in der profilometrischen Untersuchung insgesamt am zweitbesten abgeschnitten und erzielte in der semiquantitativen rasterelektronenmikroskopischen Beurteilung einen Mittelwert von $15,7 \pm 3,5$, der etwas über dem Referenzverfahren ($14,3 \pm 2,1$) lag. Das Hawe Composite-Poliersystem ließ generell in Kombination mit zwei Finierern (M8, M14) eine günstige Oberfläche entstehen. Dies ist möglicherweise durch die hohe Anzahl von insgesamt sechs Arbeitsschritten bei dieser Bearbeitungsmethode zu erklären. Rasterelektronenmikroskopisch war eine weitestgehend glatte, homogene Oberfläche ohne besondere Strukturen zu erkennen.

Keinerlei glatt-homogene Areale nach Kategorie 1 waren mit den Bearbeitungsmethoden „DF 30 / DF 20 / Hawe Occlubrush“ und „DF 30 / HMF / Shofu“ zu erzielen, während 83,3% bzw. 69,4% der Bewertungsfelder der Kategorie 3 („deutlich ausgeprägte Bearbeitungsspuren“) zugeordnet wurden. Entsprechend hoch war auch die durchschnittliche Bewertungszahl je Prüfkörper mit $34,0 \pm 3,5$ („DF 30 / DF 20 / Hawe Occlubrush“) bzw. $32,3 \pm 6,4$ („DF 30 / HMF / Shofu“). Beide Bearbeitungsmethoden schnitten im Vergleich zum Referenzverfahren statistisch signifikant schlechter ab, was beim Hawe Occlubrush-Poliersystem eine deutliche Abweichung zum Profilometrieergebnis darstellt. Bei beiden Poliersystemen wiesen die Rillen in der Oberfläche darauf hin, dass die Polierer hier nicht in der Lage sind, die durch das Finieren entstandene Oberfläche weiter zu glätten. Auf die möglichen Gründe für das schlechte Abschneiden dieser beiden Systeme wurde im Gliederungspunkt 5.2.1 bereits ausführlicher eingegangen.

Die Gummi- bzw. Silikonpolierer mit Diamant- oder Siliciumcarbidpartikeln von Komet lagen sowohl in der quantitativen als auch in der qualitativen Auswertung im Mittelfeld.

Zur Frage der Übereinstimmung der Ergebnisse von quantitativer und qualitativer Auswertung lässt sich folgendes festhalten: Das gute Abschneiden der Diafix oral-Polierer konnte sowohl in der Profilometrie als auch in der rasterelektronenmikroskopischen Untersuchung übereinstimmend belegt werden. Ebenso wurde in der rasterelektronenmikroskopischen Auswertung auch das insgesamt schlechte profilometrische Ergebnis bei Verwenden des „Shofu CompoSite / CompoSite Fine“ offensichtlich. Es gibt allerdings auch Bearbeitungsmethoden, die in der rasterelektronenmikroskopischen Untersuchung schlechtere Ergebnisse als in der Profilometrie erzielten. Besonders auffällig ist das abweichende Abschneiden bei den Poliersystemen Hawe Composite Polisher und Hawe Occlubrush jeweils in Kombination mit den 30 μm -/20 μm -Diamantfinierern (M8, M9).

Die teilweise abweichenden Bewertungen in der Profilometrie und in der Rasterelektronenmikroskopie belegen die Notwendigkeit einer ergänzenden Durchführung beider Untersuchungen, da keine der beiden Methoden alle Aspekte der Oberflächenmorphologie alleine ausreichend berücksichtigt. So wird der Nachteil der fehlenden flächenmäßigen Darstellung bei der profilometrischen Untersuchung durch die Beurteilung von REM-Aufnahmen ausgeglichen, da hier gerade die flächenmäßige Darstellung der Oberfläche besonders gut möglich ist. Dennoch sollte die Basis jeder Studie, die sich mit Oberflächenrauigkeiten beschäftigt, die profilometrische Untersuchung sein. Sie ermöglicht quantifizierbare Ergebnisse, die objektiv und hinreichend genau sind. Allerdings sollte auf die ergänzende Anfertigung von REM-Aufnahmen nicht verzichtet werden, da auf diese Weise auch eine Interpretation der Rauigkeiten möglich ist. Wird beispielsweise in der REM-Aufnahme ein selektiver Abtrag des Polierers nachgewiesen, ist das Politurverfahren als ungeeignet einzustufen, auch wenn die Ergebnisse der quantitativen einen insgesamt guten Poliereffekt belegen konnten. Das Phänomen des selektiven Polierens konnte jedoch in der vorliegenden Studie bei keinem der untersuchten Bearbeitungsverfahren beobachtet werden.

5.3 Literaturvergleich

5.3.1 Limitationen des Literaturvergleichs

Obwohl profilometrische Untersuchungen von Oberflächen innerhalb einer Studie objektive und reproduzierbare Resultate liefern, ist ein Literaturvergleich nur mit Einschränkung möglich, da die Untersuchungsergebnisse von einer Vielzahl von Faktoren beeinflusst werden:

- Verwendetes Kompositmaterial
- Verwendete Bearbeitungsinstrumente
- Vorgehensweise bei der Oberflächenbearbeitung, z.B.
 - manuelle oder maschinelle Bearbeitung
 - Wasserkühlung
 - Bearbeitungsdauer
 - Größe der Auflagefläche und Anpressdruck beim Bearbeiten
 - Umdrehungszahl der rotierenden Instrumente
- Messmethodik, z.B.
 - mechanischer Taster oder Lasertaster
 - Geräteeinstellungen
 - Messgrößen

Aufgrund der Vielzahl der möglichen Einflussfaktoren auf das Messergebnis sollte man sich Gedanken über eine Standardisierung der Messmethoden machen, da dies den Vergleich verschiedener Untersuchungen untereinander erleichtern würde.

Da das Schrifttum zur Effizienz von Politurverfahren aus den letzten zwei Jahrzehnten nahezu unüberschaubar ist, beschränkt sich der nachfolgende Literaturvergleich ausschließlich auf Studien, die sich ebenfalls mit den in der vorliegenden Untersuchung eingesetzten Poliersystemen befassten. Vergleichsgröße ist der arithmetische Mittenrauwert, da dieser in allen Vergleichsstudien angegeben wurde.

5.3.2 Vergleich mit den Ergebnissen anderer Autoren

5.3.2.1 Ausarbeitungsinstrumente

Unsere Ergebnisse konnten einen statistisch signifikanten Einfluss des Ausarbeitungsverfahrens sowohl auf den arithmetischen Mittenrauwert als auch auf

das Profillängenverhältnis belegen. Im Post-hoc-Test schnitten die beiden untersuchten Kombinationen von jeweils zwei Finierern (30 µm-/20 µm-Diamantfinierer bzw. 30 µm-Diamantfinierer/Hartmetallfinierer) signifikant besser ab als die alleinige Verwendung eines 30 µm-Diamantfinierers. Die Tatsache, ob als zweiter Finierer ein Diamant- oder ein Hartmetallfinierer verwendet wurde, hatte keinen Einfluss auf die Oberflächenrauigkeit.

Dies entspricht einerseits den Ergebnissen anderer Studien, die ebenfalls keinen Unterschied in der Obeflächenrauigkeit nach Einsatz von Diamant- oder Hartmetallfinierern feststellen konnten [54, 62, 77]. Andererseits werden durch das bessere Abschneiden der zweistufigen Ausarbeitungsverfahren auch die Resultate von Watanabe et al. [105] untermauert, die im Rahmen eines In-vitro-Vergleichs verschiedener ein- und mehrstufiger Ausarbeitungssysteme geringere arithmetische Mittenrauwerte bei Verwendung mehrstufiger Systeme nachweisen konnten.

5.3.2.2 Poliersysteme

Sof-Lex-Disks

Der durchschnittliche arithmetische Mittenrauwert, der in dieser Studie mit den Sof-Lex-Disks erzielt wurde, betrug $0,660 \pm 0,018$ µm. Dieser Wert liegt im oberen Bereich der Angaben zwischen 0,045 µm und 0,70 µm, die in der Literatur bei alleiniger Verwendung des Sof-Lex-Poliersystems ohne vorherige Ausarbeitung mit Finierern erzielt wurde [5, 8, 32, 34, 45, 65, 69, 85, 87, 88, 97, 98, 100, 102, 112].

Auf die eingeschränkte Vergleichbarkeit der absoluten Zahlenwerte und deren Ursachen wurde bereits in Kapitel 5.3.1. hingewiesen. Aus diesem Grund ist eine Bewertung der verschiedenen Poliersysteme in Relation zu einem Referenzverfahren sinnvoll.

Diafix-oral-Polierer

In Kombination mit einem zweistufigen Ausarbeitsverfahren (DF 30 / DF 20 oder DF 30 / HMF) wurden mit dem Diafix-oral-Polierer arithmetische Mittenrauwerte von $0,642 \pm 0,065 \mu\text{m}$ bzw. $0,577 \pm 0,149 \mu\text{m}$ erzielt. Das Politurergebnis fiel somit besser aus als bei Einsatz des Referenzverfahrens ($0,660 \pm 0,018 \mu\text{m}$). Erfolgte die Ausarbeitung nur mit einem $30 \mu\text{m}$ -Diamantfinierer, war der Mittenrauwert mit $0,827 \pm 0,331 \mu\text{m}$ deutlich höher.

Eine In-vitro-Studie von Jung et al. [44] an planen Prüfkörpern beschäftigte sich ebenfalls mit dem Poliereffekt diamantimprägnierter Filzscheiben bei der Politur von Hybridkompositen nach unterschiedlicher Ausarbeitung mit Diamantfinierern (Partikelgröße 30, 15 und $8 \mu\text{m}$) und/oder Hartmetallfinierern (12- und 30-blättrig), wobei die Politur mit Sof-Lex-Disks nach Vorbehandlung mit einem $30 \mu\text{m}$ -Diamantfinierer als Referenzmethode diente. Während der arithmetische Mittenrauwert nach Einsatz der Sof-Lex-Disks bei ca. $0,6 \mu\text{m}$ lag, wurden mit dem Diafix-oral-Polierer je nach Ausarbeitsverfahren niedrigere arithmetische Mittenrauwerte zwischen $0,25$ und $0,45 \mu\text{m}$ erzielt. Eine Ausnahme stellte lediglich die Untersuchungsgruppe dar, bei der vor Anwendung der diamantimprägnierten Filzscheiben eine Vorbehandlung mit einem $30 \mu\text{m}$ -Diamantfinierer erfolgt war; hier lag der durchschnittliche Mittenrauwert bei etwa $1,7 \mu\text{m}$.

In einer weiteren Untersuchung von Jung [43] an planen Prüfkörpern, die aus dem Hybridkomposit Tetric hergestellt waren, erfolgte ebenfalls ein Vergleich der Effektivität von Sof-Lex-Disks und Diafix-oral-Polierern nach Ausarbeitung mit Diamant- und/oder Hartmetallfinierern. Dabei lag der arithmetische Mittenrauwert R_a nach Vorbehandlung mit einem $30 \mu\text{m}$ -Diamantfinierer bei Verwendung der Sof-Lex-Disks niedriger als bei Diafix-oral-Filzpolierern, während bei Ausarbeitung mit einem $30 \mu\text{m}$ - und anschließend mit einem $20 \mu\text{m}$ -Diamantfinierer einerseits sowie mit einem $30 \mu\text{m}$ -Diamant- und einem 16-blättrigen Hartmetallfinierer andererseits das Diafix-oral-Poliersystem besser

abschnitt. Die profilometrischen Ergebnisse wurden rasterelektronenmikroskopisch bestätigt.

Eine andere Studie von Jung et al. [45] untersuchte den Poliereffekt von sechs verschiedenen Systemen an Probekörpern aus vier unterschiedlichen Kompositen. Bei Vorbehandlung mit einem 30 µm-Diamant- sowie einem Hartmetallfinierer war der arithmetische Mittenrauwert R_a nach Politur mit Diafix-oral-Polierern ebenfalls geringer als bei Verwendung von Sof-Lex-Disks. Eine Vorbehandlung mit einem 30 µm-Diamantfinierer allein sowie mit der Kombination 30 µm-/20 µm-Diamantfinierer erfolgte nur in der Gruppe der mit Diafix-oral polierten Prüfkörper. Auch hier zeigte sich ein Einfluss der zur Ausarbeitung verwendeten Finierer, wobei die Kombination eines 30 µm- und eines 20 µm-Diamantfinierers besser abschnitt als der Einsatz eines 30 µm-Diamantfinierers allein. Die Ergebnisse der zusätzlich durchgeführten rasterelektronenmikroskopischen Untersuchung der Prüfkörperoberflächen stimmten mit den Resultaten der Profilometrie überein.

In Übereinstimmung mit unserem Ergebnis wurden auch in den Studien von Jung [43, 44, 45] mit dem Diafix-oral-Polierer bei vorangegangener Ausarbeitung mit zwei oder mehr Finierern stets niedrigere Mittenrauwerte erzielt als mit der Referenzmethode „Sof-Lex-Disks“. Lediglich in Kombination mit einem 30 µm-Diamantfinierers zur Ausarbeitung war wie in der vorliegenden Studie die Oberflächenrauigkeit beim Diafix-oral-Polierer deutlich größer als bei der Verwendung flexibler Disks, was die Bedeutung einer sorgfältigen Ausarbeitung vor Beginn der Politur belegt.

Hawe Composite Polisher

Das Hawe Composite Polisher-System ist ein vierstufiges Poliersystem, bei dem Aluminiumoxidpartikel in Naturgummi eingebettet sind. In der vorliegenden Studie wurde mit den Hawe Composite-Polierern das nach dem Diafix-oral-

Polierer zweitbeste Ergebnis erzielt, wobei die arithmetischen Mittenrauwerte je nach Ausarbeitsverfahren $0,754 \pm 0,162 \mu\text{m}$ (DF 30 μm), $0,704 \pm 0,073 \mu\text{m}$ (DF 30 $\mu\text{m}/20 \mu\text{m}$) und $0,628 \pm 0,076 \mu\text{m}$ (DF 30 μm / HMF) betragen. Die Werte lagen also geringfügig über oder sogar unter dem Referenzwert der Sof-Lex-Disks von $0,660 \pm 0,018 \mu\text{m}$. Vergleichswerte in der Literatur fanden sich speziell zu diesem Poliersystem leider nicht.

Andere Gummi- oder Silikonpolierer mit Abrasivpartikeln aus Aluminiumoxid (Shofu CompoSite, Enhance) hatten in der Vergangenheit keine zufriedenstellenden Ergebnisse erzielen können. In der Mehrheit der durchgeführten Untersuchungen wurden für dieses Verfahren höhere Mittenrauwerte gemessen als für das Sof-Lex-Poliersystem [1, 8, 32, 84, 87, 97]. Ein besseres Abschneiden von Polierern mit Aluminiumoxidpartikeln war dagegen eher selten beobachtet worden [36, 65].

Das gute Abschneiden der Hawe Composite-Polierer in der vorliegenden Studie ist vermutlich durch die hohe Anzahl von insgesamt sechs Arbeitsschritten bei der Ausarbeitung und Politur der Kompositoberflächen zu erklären.

Shofu CompoSite/CompoSite Fine

Am schlechtesten schnitt in der vorliegenden Studie der zweistufige Silikonpolierer CompoSite/CompoSite Fine ab, wobei es sich um ein Poliersystem aus zwei Silikonpolierern mit Aluminiumoxid- bzw. Zirkoniumoxidpartikeln handelt. Auch in Untersuchungen von Ashe et al. [1] und Stoddard et al. [97] lagen die bei Verwendung von Shofu CompoSite-Polierern erzielten arithmetischen Mittenrauwerte ebenfalls deutlich über den Werten des Sof-Lex-Disk-Systems. In der Studie von Stoddard et al. [97] betrug die arithmetische Mittenrautiefe bei alleiniger Verwendung von Shofu CompoSite-Polierern mit $0,90 \mu\text{m}$ das Doppelte des mittels Sof-Lex-Disks erzielten Wertes von $0,45 \mu\text{m}$. Bei Ashe et al. [1] war vor Einsatz die beiden Poliersysteme jeweils eine Ausarbeitung mit 50

μm -/25 μm -Diamantfinierern erfolgt, was zu arithmetischen Mittenrauwerten von 0,87 μm (Shofu CompoSite) bzw. 0,61 μm (Sof-Lex-Disks) führte.

Sowohl die eigenen Untersuchungsergebnisse als auch die Daten aus der Literatur weisen darauf hin, dass das Shofu CompoSite-Poliersystem keine befriedigende Glättung der Oberfläche bewirkt und daher zur Kompositbearbeitung nicht geeignet ist.

Gummi- bzw. Silikonpolierer auf Diamant- oder Siliciumcarbidbasis

Eine weitere Form von Gummi- bzw. Silikonpolierern, deren Eignung zur Politur von Feinpartikelhybridkompositoberflächen in der Literatur bislang nicht untersucht wurden, sind die Komet-Polierer aus Kautschuk bzw. Silikon mit Abrasivpartikeln aus Diamantkorn bzw. Siliciumcarbid. Die damit in der vorliegenden Studie erzielten arithmetischen Mittenrauwerte lagen bei Ausarbeitung mit zwei Finierern im Mittelfeld, bei Ausarbeitung mit dem 30 μm -Diamantfinierer allein sogar im letzten Drittel aller untersuchten Poliersysteme. Sämtliche Werte fielen damit höher aus als bei Verwendung des Referenzverfahrens.

Im Vergleich mit anderen in dieser Studie untersuchten Gummi- bzw. Silikonpolierern rangierten die Ergebnisse im mittleren Bereich zwischen dem beobachteten nicht zufriedenstellenden Poliereffekt bei Verwendung von Silikonpolierern mit Abrasivpartikeln aus Aluminium- bzw. Zirconiumoxid (Shofu CompoSite / CompositeFine) und dem Hawe Composit Polisher-System, bei dem Aluminiumoxidpartikel in Naturgummi eingebettet sind, die im Literaturvergleich bereits weiter oben bewertet wurden. Vergleichsdaten für die untersuchten Gummi- bzw. Silikonpolierer von Komet fanden sich in der Literatur nicht.

Hawe Occlubrush-Polierbürstchen

Ein Poliersystem der neueren Generation sind sind Polierbürstchen, bei denen die Polierkörper in die Bürstenfilamente eingearbeitet sind. In unserer Studie führte das Hawe-Occlubrush-Polierbürstchen bei alleiniger Vorbehandlung mit einem 30 µm-Diamantfinierer zum schlechtesten Untersuchungsergebnis ($1,387 \pm 0,146 \mu\text{m}$), während die Ergebnisse bei zweistufiger Vorbehandlung etwas besser waren (DF 30 / DF 20: $0,861 \pm 0,181 \mu\text{m}$; DF 30 / HMF: $0,744 \pm 0,066 \mu\text{m}$).

Vergleichsstudien zum Occlubrush-Polierbürstchen sind selten. Krejci et al. [55] führten an planen Prüfkörpern eine profilometrische Untersuchung durch, wobei der ermittelte arithmetische Mittenrauwert R_a bei Verwendung des Occlubrush-Polierbürstchens wie in unserer Untersuchung über dem Vergleichswert der Sof-Lex-Disks lag ($0,31 \mu\text{m}$ vs. $0,18 \mu\text{m}$). Zur Ausarbeitung waren 40 µm-, 15 µm- und 8 µm-Diamantfinierer verwendet worden. Das Ergebnis der vorliegenden Studie, wonach Occlubrush-Polierbürstchen im Vergleich zu Sof-Lex-Disks schlechter abschneiden, wurde somit durch Krejci et al. [55] bestätigt.

5.4 Klinische Relevanz der Ergebnisse und Schlussfolgerung

Die vorliegende Studie konnte einen statistisch signifikanten Einfluss sowohl des Ausarbeitsverfahrens als auch des Poliersystems auf die Rautiefe von Feinpartikelhybridkompositoberflächen belegen.

Bei der Ausarbeitung führten diejenigen Verfahren zu geringeren Oberflächenrauigkeiten, bei denen konsekutiv zwei Finierer zur Anwendung kamen, wobei zwischen den beiden Kombinationen „30 µm-/20 µm-Diamantfinierer“ und „30 µm-/Hartmetallfinierer“ kein statistisch signifikanter Unterschied bestand.

Bei den Poliersystemen lieferten der einstufige Diafix-oral-Polierer sowie das vierstufige Hawe Composite Polisher-System die besten Ergebnisse und erzielten in Verbindung mit einer zweistufigen Ausarbeitung teilweise niedrigere arithmetische Mittenrauwerte als das vierstufige Referenzverfahren „Sof-Lex-Disks“.

Da Zeit- und Kostenaspekte im Praxisalltag von großer Bedeutung sind, wäre grundsätzlich einer Ausarbeitungs- und Poliermethode mit möglichst wenig Arbeitsschritten der Vorzug zu geben. In der vorliegenden Studie wurde durch eine Ausarbeitung mit zwei Finierern und die anschließende Politur mit dem Diafix-oral-Polierer in insgesamt drei Bearbeitungsschritten eine bessere Oberflächenqualität erzielt werden konnte als mit allen anderen einstufigen Poliersystemen. Die Rauigkeitsparameter lagen sogar geringfügig unter den Werten, die nach sechs Bearbeitungsschritten mit den Verfahren DF 30/ DF 20 / Hawe Composite Polisher und DF 30 / HMF / Hawe Composite Polisher gemessen wurden. Die vorgelegten Ergebnisse könnten demnach von großer klinischer Relevanz sein.

In diesem Zusammenhang muss jedoch einschränkend erwähnt werden, dass die Resultate ebenso wie die Mehrheit der Vergleichsdaten aus der Literatur im Rahmen einer In-vitro-Studie an planen Prüfkörpern gewonnen wurden. In-vitro-Versuche lassen allerdings nur begrenzt Aussagen über die Eignung der untersuchten Verfahren bei der Bearbeitung von strukturierten Oberflächen an schwer zugänglichen Stellen in der Mundhöhle zu. Beispielsweise konnte Baumstieger [4] im Gegensatz zu unseren Ergebnissen in einer Untersuchung an extrahierten Zähnen mit okklusaler Kompositfüllung bei Verwendung des Diafix-oral-Polierers profilometrisch wie auch rasterelektronenmikroskopisch große Rautiefen nachweisen, die auf einen ungenügenden Glättungseffekt hinwiesen.

Es kann dennoch festgehalten werden, dass mit Diafix-oral-Polierern sowie mit Hawe Composite Polishern bei der Politur von planen bzw. konvexen Flächen

eine sehr gute Oberflächenqualität erzielt werden konnte. Poliersysteme der neueren Generation wie die Shofu CompoSite/CompoSite Fine-Polierer oder das Occlubrush-Polierbürstchen haben sich bei der Politur von planen Feinpartikelhybridkompositoberflächen dagegen nicht bewährt. Inwieweit diese In-vitro-Ergebnisse an planen Prüfkörpern auf die Politur strukturierter Oberflächen unter klinischen Bedingungen übertragbar sind, muss in weiteren Studien untersucht werden.

6 Zusammenfassung

Ziel der vorliegenden In-vitro-Studie war es, den Einfluss verschiedener Ausarbeitsverfahren und Poliersysteme auf die Qualität von Feinpartikelhybridkompositoberflächen zu untersuchen. Insgesamt 19 Bearbeitungsmethoden wurden an je 5 Prüfkörpern aus Tetric Ceram angewandt und die resultierenden Oberflächen profilometrisch sowie rasterelektronenmikroskopisch untersucht. Dabei handelte es sich um eine Referenzmethode (Sof-Lex-Disks) sowie 18 Kombinationen aus 3 Ausarbeitsmethoden (DF 30: 30 µm-Diamantfinierer, DF 30 / DF 20: 30 µm-/20 µm-Diamantfinierer, DF 30 / HMF: 30 µm-Diamantfinierer-/Hartmetallfinierer) und 6 Poliersystemen (Shofu CompoSite/CompoSite Fine, Hawe Composite Polisher, Hawe Occlubrush, Komet Diamant-Gummipolierer, Komet Siliciumcarbid-Silikonpolierer, Diafix-oral).

Die insgesamt 95 Oberflächen wurden zunächst im elektrischen Tastschnittverfahren mittels Focodyn-Lasertaster (Focusdurchmesser: 1 µm) quantitativ ausgewertet. Die Taststrecke des Lasertasters betrug 1,75 mm. Die Prüfkörper wurden mit einem Abstand von 0,219 mm zwischen den einzelnen Tastspuren neunmal parallel abgetastet. Die Abtastung erfolgte einmal längs und einmal quer zur Riefenrichtung. Zur Darstellung der profilometrischen Messergebnisse wurden der arithmetische Mittenrauwert und das Profillängenverhältnis ermittelt. Mit 3 der 18 Bearbeitungsmethoden konnten arithmetische Mittenrauwerte erzielt werden, die unter den Werten der Referenzmethode „Sof-Lex-Disks“ ($0,660 \pm 0,018 \mu\text{m}$) lagen. Dabei handelte es sich um die Bearbeitungsverfahren „DF 30 / HMF / Diafix-oral“ ($0,577 \pm 0,149 \mu\text{m}$), „DF 30 / HMF / Hawe CP“ ($0,628 \pm 0,076 \mu\text{m}$) und „DF 30 / DF 20 / Diafix-oral“ ($0,642 \pm 0,065 \mu\text{m}$). Die Unterschiede zur Referenzmethode waren jedoch nicht statistisch signifikant. Unter Zugrundelegung des Profillängenverhältnisses erzielten 6 der 18 Bearbeitungsmethoden geringere Werte als die Referenzmethode ($1,375 \pm 0,039$), wobei der Unterschied lediglich bei der Bearbeitungsmethode „DF 30 / HMF /

Diafix-oral“ statistisch signifikant war ($1,227 \pm 0,054$). Nicht signifikant niedriger war das Profillängenverhältnis bei den Bearbeitungsmethoden „DF 30 / HMF / Hawe CP“ ($1,261 \pm 0,045$), „DF 30 / DF 20 / Hawe CP“ ($1,309 \pm 0,046$), „DF 30 / DF 20 / Diafix-oral“ ($1,311 \pm 0,041$), DF 30 / HMF / Hawe Occlubrush“ ($1,346 \pm 0,049$), „DF 30 / Hawe CP“ ($1,362 \pm 0,112$) und „DF 30 / Diafix-oral“ ($1,370 \pm 0,086$). In der Varianzanalyse wurde für den arithmetischen Mittenrauwert und für das Profillängenverhältnis sowohl ein statistisch signifikanter Einfluss des Ausarbeitungsverfahrens als auch des Poliersystems nachgewiesen. Bei den Ausarbeitungsverfahren schnitten die beiden untersuchten Kombinationen von jeweils zwei Finierern (DF 30 / DF 20 bzw. DF 30 / HMF) signifikant besser ab als die alleinige Verwendung eines 30 μm -Diamantfinierers. Hinsichtlich des Einflusses des Poliersystems bestand ebenfalls eine weitgehende Übereinstimmung der Auswertung von arithmetischem Mittenrauwert und Profillängenverhältnis, wobei besonders der statistisch signifikante Unterschied des Diafix-oral-Polierers zu allen anderen Poliersystemen mit Ausnahme des Hawe Composite Polishers auffiel.

Zur rasterelektronenmikroskopischen Auswertung wurden von je fünf Kompositprüfkörpern, die pro Bearbeitungsverfahren zur Verfügung standen, zufällig je drei ausgewählt. Die REM-Aufnahme in 12 Bewertungsfelder eingeteilt, welche dann einer der drei Kategorien „glatt-homogene Oberfläche“ (1 Punkt), „leicht ausgeprägte Bearbeitungsspuren“ (2 Punkte) und „deutlich ausgeprägte Bearbeitungsspuren“ (3 Punkte) zugeordnet wurden. Die semiquantitative Auswertung der REM-Aufnahmen anhand der erzielten Beurteilungspunkte zeigte sowohl in der prozentualen Darstellung als auch in der Mittelwertberechnung in Übereinstimmung mit der quantitativen Auswertung die besten Ergebnisse für die Bearbeitungsmethode „DF 30 / HMF / Diafix-oral“, da alle 36 Bewertungsfelder der Kategorie „glatt-homogen“ zugeordnet werden konnten (MW: 36 ± 0). Nur geringfügig schlechter waren die Ergebnisse bei den Bearbeitungsverfahren „DF 30 / Diafix-oral“ (MW: $12,7 \pm 1,2$) oder „DF 30 / DF 20 / Diafix-oral“ (MW: $15,3 \pm 1,5$) ausgearbeitet wurde. Ein statistisch signifikanter Unterschied zur Referenzbearbeitungsmethode, bei der 80,6% der Bewer-

tungsfelder als „glatt-homogen“ und 19,4% „mit leicht ausgeprägten Bearbeitungsspuren“ eingestuft wurden (MW: $14,3 \pm 2,1$), bestand für keine der drei genannten Bearbeitungsmethoden.

Sowohl die quantitative als auch die qualitative Beurteilung der Kompositoberflächen zeigte, dass neben dem Hawe Composite Polisher der Diafix-oral-Polierer insbesondere bei Ausarbeitung der Oberfläche mit zwei Finierern eine gute Oberflächenqualität erzeugte. Der klinische Vorteil des Diafix-oral-Polierers liegt in der Rationalität dieses Bearbeitungsverfahrens, da nur drei Arbeitsschritte nötig sind, um eine glatte, homogene Oberfläche zu erzeugen. Poliersysteme der neueren Generation wie die Shofu CompoSite/CompoSite Fine-Polierer oder das Occlubrush-Polierbürstchen haben sich dagegen bei der Politur von planen Feinpartikelhybridkompositoberflächen nicht bewährt.

7 Summary

This in-vitro study examined the impact of various finishing techniques and polishing systems on the quality of small-particle hybrid composite surfaces. A total of 19 finishing techniques was used on five specimens made of Tetric Ceram each, and the resulting surfaces were examined quantitatively by profilometry and qualitatively by means of a scanning electron microscope. In detail, these techniques were 18 combinations of 3 finishing techniques (DF 30: 30 μm finishing diamond, DF 30 / DF 20: 30 μm -/20 μm finishing diamond, DF 30 / HMF: 30 μm finishing diamond / tungsten carbide) and 6 polishing systems (Shofu CompoSite/CompoSite Fine, Hawe Composite Polisher, Hawe Occlubrush, Komet rubber polisher diamond, Komet silicon polisher siliciumcarbide, Diafix-oral) as well as one reference technique (Sof-Lex Discs).

The total of 95 surfaces were first quantitatively evaluated by a laser pick-up Focodyn (focus diameter: 1 μm). Each surface was scanned automatically by nine parallel tracings under the following conditions: transverse length = 1,75 mm; distance between scans = 0,219 mm. The exploration was done along and at right angles to the grooves. Surfaces were characterized with respect to average roughness (R_a) and profile-length-ratio (LR). When using 3 of the 18 finishing techniques, average roughness values could be obtained, which were below the values of the reference technique "Sof-Lex Discs" ($0,660 \pm 0,018 \mu\text{m}$). These were the finishing techniques "DF 30 / HMF / Diafix oral" ($0,577 \pm 0,149 \mu\text{m}$), "DF 30 / HMF / Hawe CP" ($0,628 \pm 0,076 \mu\text{m}$) and "DF 30 / DF 20 / Diafix oral" ($0,642 \pm 0,065 \mu\text{m}$). However, the differences to the reference technique were not statistically significant. Based on the profile-length-ratio, 6 of the 18 finishing methods reached lower values than the reference technique "Sof-Lex Discs" ($1,375 \pm 0,039$), the difference being only statistically significant regarding the finishing technique "DF 30 / HMF / Diafix-oral" ($1,227 \pm 0,054$). The profile-length-ratio was not significantly lower when using the finis-

hing techniques "DF 30 / HMF / Hawe CP" ($1,261 \pm 0,045$), DF 30 / DF 20 / Hawe CP" ($1,309 \pm 0,046$), "DF 30 / DF 20 / Diafix oral" ($1,311 \pm 0,041$), DF 30 / HMF / Hawe Occlubrush" ($1,346 \pm 0,049$), "DF 30 / Hawe CP" ($1,362 \pm 0,112$) and "DF 30 / Diafix oral" ($1,370 \pm 0,086$). Concerning both average roughness (R_a) and profile-length-ratio (LR), ANOVA showed a statistically significant impact of the finishing technique and the polishing system. Among the finishing techniques, the two combinations of two finishing instruments each (DF 30 / DF 20 bzw. DF 30 / HMF) performed significantly better than the sole use of a 30 μm finishing diamond. Regarding the influence of the polishing system, there was also a wide correlation of average roughness (R_a) and profile-length-ratio (LR). In this context, especially the statistically significant difference of the Diafix oral Polisher compared to all other polishing systems except for the Hawe Composite Polishers should be mentioned.

Three of the five specimens which were available for each finishing technique were randomly selected for the SEM study. Photomicrographs of the polished surfaces were taken and divided into twelve squares. Each square was assessed with respect to the following grading "smooth, homogenous surface" (1 point), "minor roughness" (2 points) and "severe roughness" (3 points). The semi-quantitative evaluation of photomicrographs was based on the evaluation points reached. The percentual view as well as the mean values revealed in accordance with the quantitative evaluation the best results for the finishing technique "DF 30 / HMF / Diafix-oral", since all 36 squares could be assigned to the category "smooth, homogenous surface" (mean: $15,3 \pm 1,5$). The results of the finishing techniques „DF 30 / Diafix oral“ (mean: $12,7 \pm 1,2$) or the combination „DF 30 / DF 20 / Diafix oral“ (mean: $15,3 \pm 1,5$) were only slightly worse. A statistically significant difference to the reference finishing technique „Soflex Discs“, for which 80,6% of the evaluation fields were categorized as "smooth, homogenous surface" and 19,4% "minor roughness" (mean: $14,3 \pm 2,1$), was not given for any of the three finishing techniques.

The quantitative as well as the qualitative evaluation demonstrated that - besides the Hawe Composite Polisher - the Diafix-oral Polisher produces a good surface quality, especially when finishing with two instruments. The clinical advantage of the Diafix-oral Polisher is the rationality of this technique, since only three worksteps are required to create a smooth homogenous surface. New generation polishing systems such as Shofu CompoSite/CompoSite Fine oder Occlubrush, however, proved not to be suitable for polishing plain small-particle hybrid composite surfaces.

8 Literaturverzeichnis

1. Ashe MJ, Tripp GA, Eichmiller FC, George LA, Meiers JC.
Surface roughness of glass-ceramic insert-composite restorations: assessing several polishing techniques.
J Am Dent Assoc 127 (1996), 1495-1500.
2. Baratieri LN, Ritter AV, Perdigao J, Felipe LA.
Direct posterior composite resin restorations: current concepts for the technique.
Pract Periodontics Aesthet Dent 10 (1998), 875-886.
3. Barbosa SH, Zanata RL, Navarro MF, Nunes OB.
Effect of different finishing and polishing techniques on the surface roughness of microfilled, hybrid and packable composite resins.
Braz Dent J 16 (2005), 39-44.
4. Baumstieger A.
Effektivität unterschiedlicher Poliersysteme für Hybridkomposite unter praxisähnlichen Bedingungen.
Medizinische Inauguraldissertation, Gießen 2005.
5. Berastegui E, Canalda C, Brau E, Miquel C.
Surface roughness of finished composite resins.
J Prosthet Dent 68 (1992), 742-749.
6. Boghosian AA, Randolph RG, Jekkals VJ.
Rotary instrument finishing of microfilled and small-particle hybrid composite resins.
J Am Dent Assoc 115 (1987), 299-301.

7. Bollen CM, Lambrechts P, Quirynen M.
Comparison of surface roughness of oral hard materials to the threshold surface roughness for bacterial plaque retention: a review of the literature.
Dent Mater 13 (1997), 258-269.
8. Bouvier D, Duprez J-P, Lissac M.
Comparative evaluation of polishing systems on the surface of three aesthetic materials.
J Oral Rehabil 24 (1997), 888-894
9. Bratel J, Haraldson T, Meding B, Yontchev E, Öhman SC, Ottosson JO.
Potential side effects of dental amalgam restorations (I). An oral and medical investigation.
Eur J Oral Sci 105 (1997), 234-243.
10. Chan KC, Fuller JL, Hormati AA.
The ability of foods to stain two composite resins.
J Prosthet Dent 43 (1980), 542-545.
11. Chen HY, Manhart J, Hickel R, Kunzelmann K-H.
Polymerisation contraction stress in light-cured packable composite resins.
Dental Materials 17 (2001), 253-259.
12. Chen RCS, Chan DCN, Chan KC.
A quantitative study of finishing and polishing techniques for a composite.
J Prosthet Dent 59 (1988), 292-297.
13. Christensen GJ.
Longevity of posterior tooth dental restorations.
J Am Dent Assoc 136 (2005), 201-203.

14. Chung, KH.
Effects of finishing and polishing procedures on the surface texture of resin composites.
Dent Mater 10 (1994), 325-330.
15. Claman LJ, Koidis PJ, Burch JG.
Proximal tooth surface quality and periodontal probing depth.
J Am Dent Assoc 113 (1986), 890-893.
16. Deliperi S, Bardwell DN.
An alternative method to reduce polymerization shrinkage in direct posterior composite restorations.
J Am Dent Assoc 133 (2002) 1387-1398.
17. DIN-Normen.
DIN 4762 Oberflächenrauheit Begriffe Oberfläche und ihre Kenngrößen Identisch mit ISO 4287/1: 1984. In: DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.): DIN Taschenbuch 106 Verzahnungsterminologie Normen (Abriebstechnik 1).
Beuth Verlag GmbH, Berlin / Wien / Zürich 1996, S. 334-349.
18. DIN-Normen.
DIN 4768 Ermittlung der Rauheitskenngrößen Ra, Rz und Rmax mit elektrischen Tastschrittgeräten Begriffe Meßbedingungen. In: DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.): DIN-Taschenbuch 1 Mechanische Technik Grundnormen.
Beuth-Verlag, Berlin / Wien / Zürich, 1995, S. 295-297.
19. Dodes JE.
The amalgam controversy.
J Am Dent Assoc 132 (2001), 348-355.
20. Eide RT.
Finishing and polishing of composites.
Acta Odontol Scand 46 (1988), 307-312.

21. Ernst C-P, Willershausen B.
Eine aktuelle Standortbestimmung zahnärztlicher Füllungskomposite.
Zahnärztliche Mitteilungen 93 (2003), 790-800.
22. Ferreira Rde S, Lopes GC, Baratieri LN.
Direct posterior resin composite restorations: considerations on finishing/
polishing. Clinical procedures.
Quintessence Int 35 (2004), 359-366.
23. Forss H, Widström E.
From amalgam to composite: selection of restorative materials and resto-
ration longevity in Finland.
Acta Odontol Scand 59 (2001), 57-62.
24. Füllemann J, Lutz F.
Direktes Kompositinlay.
Schweiz Monatsschr Zahnmed 98 (1988), 759-764.
25. Goldstein GR, Waknine S.
Surface roughness evaluation of composite resin polishing techniques.
Quintessence Int 20 (1989), 199-204.
26. Guertzen W.
Klinik der Kompositfüllung.
Hanser Verlag, München 1989.
27. Hachiya Y, Iwaku M, Hosoda H, Fusayama T.
Relation of finish to discoloration of composite resins.
J Prosthet Dent 52 (1984), 811-814.
28. Hannah CM, Smith GA.
The surface finish of composite restorative materials.
Br Dent J 135 (1973), 483-488.

29. Herrgott AML, Ziemiecki TL, Dennison JB.
An evaluation of different composite resin systems finished with various abrasives.
J Am Dent Assoc 119 (1989), 729-732.
30. Hickel R.
Moderne Füllungswerkstoffe.
Dtsch Zahnärztl Z 52 (1997), 572-585.
31. Hickel R, Manhart J.
Longevity of restorations in posterior teeth and reasons for failure.
J Adhes Dent 3 (2001), 45-64.
32. Hoelscher DC, Neme AML, Pink FE, Hughes PJ.
The effect of three finishing systems on four esthetic restorative materials.
Oper Dent 23 (1998), 36-42.
33. Hondrum SO, Fernandez R jr.
Contouring, finishing, and polishing class 5 restorative materials.
Oper Dent 22 (1997), 30-36.
34. Jefferies SR, Barkmeier WW, Gwinnett AJ.
Three composite finishing systems: a multisite in vitro evaluation.
J Esthet Dent 4 (1992), 181-185.
35. Jones CS, Billington RW, Pearson GJ.
The in vivo perception of roughness of restorations.
Br Dent J 196 (2004), 42-45.
36. Joniot SB, Gregoire GL, Auther AM, Roques YM.
Three-dimensional optical profilometry analysis of surface states obtained after finishing sequences for three composite resins.
Oper Dent 25 (2000), 311-315.

37. Jung M.
Die Problematik der Rauigkeitsmessung an Zahnhartsubstanzen nach Präparation mit unterschiedlichen Diamantschleifkörpern.
Medizinische Dissertation, Gießen 1988.
38. Jung M.
Der Einfluß unterschiedlicher Finierer auf die Kompositoberflächen.
Dtsch Zahnärztl Z 49 (1994), 884-888.
39. Jung M.
Die Abtragsleistung unterschiedlicher Finierinstrumente an einem modernem Hybridkomposit.
Dtsch Zahnärztl Z 51 (1996), 86-89.
40. Jung M.
Surface roughness and cutting efficiency of composite finishing instruments.
Oper Dent 22 (1997), 98-104.
41. Jung M.
Ausarbeitung und Politur von laborgefertigten Keramik- und Kompositinlays in-vitro und in-vivo.
Medizinische Habilitation, Gießen 1998.
42. Jung M.
Ausarbeitung und Politur von zahnfarbenen Füllungswerkstoffen aus Komposit und Keramik.
DGZ Literaturumschau, Rundschreiben I (2001), 4-6.
43. Jung M.
Finishing and polishing of a hybrid composite and a heat-pressed glass ceramic.
Oper Dent 27 (2002), 175-183.

44. Jung M, Baumstieger M, Klimek J.
Effectiveness of diamond-impregnated felt wheels for polishing a hybrid composite.
Clin Oral Invest 1 (1997), 71-76.
45. Jung M, Bruegger H, Klimek J.
Surface geometry of three packable and one hybrid composite after polishing.
Oper Dent 28 (2003), 816-824.
46. Jung M, Hornung K, Klimek J.
Polishing occlusal surfaces of direct Class II composite restorations in vivo.
Oper Dent 30 (2005), 139-146.
47. Jung M, Voit S, Klimek J.
Surface geometry of three packable and one hybrid composite after finishing.
Oper Dent 28 (2003), 53-59.
48. Jung M, Wehlen O, Klimek J.
Finishing and polishing of indirect composite and ceramic inlays in-vivo: occlusal surfaces.
Oper Dent 29 (2004), 131-141.
49. Kaplan BA, Goldstein GR, Vijayaraghavan TV, Nelson IK.
The effect of three polishing systems on the surface roughness of four hybrid composites: a profilometric and scanning electron microscopy study.
J Prosthet Dent 76 (1996), 34-38.
50. Kawai K, Urano M.
Adherence of plaque components to different restorative materials.
Oper Dent 26 (2001), 396-400.

51. Kawai K, Urano M, Ebisu S.
Effect of surface roughness of porcelain on adhesion of bacteria and their synthesizing glucans.
J Prosthet Dent 83 (2000), 664-667.
52. Koczarski MJ, Corredor AC.
Direct posterior composite restorations: simplified success through a systematic approach.
Pract Proced Aesthet Dent 14 (2002), 87-94.
53. Krejci I, Krejci D, Lutz F.
Clinical evaluation of a new pressed glass ceramic inlay material over 1,5 years.
Quintessence Int 23 (1992), 181-186.
54. Krejci I, Lutz F.
Kompositfüllungen – das 1 x 1 des Ausarbeitens.
Schweiz Mschr Zahnmed 94 (1984), 1015-1028.
55. Krejci I, Lutz F, Boretti R.
Resin composite polishing - filling the gaps.
Dent Mater 30 (1999), 490-495.
56. Kullmann W.
Die Oberflächenbeschaffenheit sog. Hybrid-Komposite.
Dtsch Zahnärztl Z 40 (1985), 915-921.
57. Lambrechts P, Braem MVG.
Evaluation of clinical performance for posterior composite resins and dentin adhesives.
Oper Dent 12 (1987), 53-78.

58. Lu H, Roeder LB, Lei L, Powers JM.
Effect of surface roughness on stain resistance of dental resin composites.
J Esthet Restor Dent 17 (2005), 102-108.
59. Lutz F.
Kompositfüllungen – Rationelles Ausarbeiten und bessere Randqualität dank neuentwickelter Schleifkörper (I).
Quintessenz 31 (1980), 273-284.
60. Lutz F, Krejci I.
Amalgam substitutes: A critical analysis.
J Esth Dent 12 (2000), 146-159.
61. Lutz F, Setcos JC, Phillips RW.
New finishing instruments for composite resins.
J Am Dent Assoc 107 (1983), 575-580.
62. Mandikos MN, McGivney GP, Davis E, Bush PJ, Carter JM.
A comparison of the wear resistance and hardness of indirect composite resins.
J Prosthet Dent 85 (2001), 386-395.
63. Manhart J, Chen H, Hamm G, Hickel R.
Buonocore Memorial Lecture. Review of the clinical survival of direct and indirect restorations in posterior teeth of the permanent dentition.
Oper Dent 29 (2004), 481-508.
64. Manhart J, Chen HY, Hickel R.
The suitability of packable resin-based composites for posterior restorations.
J Am Dent Assoc 132 (2001), 639-645.

65. Marigo L, Rizzi M, La Torre G, Rumi G.
3-D surface profile analysis: different finishing methods for resin composites.
Oper Dent 26 (2001), 562-568.
66. Mitchell CA, Pintado MR, Douglas WH.
Iatrogenic tooth abrasion comparisons among composite materials and finishing techniques.
J Prosthet Dent 88 (2002), 320-328.
67. Morgan M.
Finishing and polishing of direct posterior resin restorations.
Pract Proced Aesthet Dent 16 (2004), 211-217.
68. Nadarajah V, Neiders ME, Cohen RE.
Local inflammatory effects of composite resins.
Compend Contin Educ Dent 18 (1997), 367-374.
69. Neme AL, Frazier KB, Roeder LB, Debner TL.
Effect of prophylactic polishing protocols on the surface roughness of esthetic restorative materials.
Oper Dent 27 (2002), 50-58.
70. Northeast SE, van Noort R.
Surface characteristics of finished posterior composite resins.
Dent Mater 4 (1988), 278-288.
71. O'Brien WJ, Johnston WM, Fanian F, Lambert S.
The surface roughness and gloss of composites.
J Dent Res 63 (1984), 685-688.
72. O'Connor TL, Uhlig HH.
Absolute areas of some metallic surfaces.
J Phys Coll Chem 61 (1957), 402-405.

73. Özgünaltay G, Yazici AR, Gorucu J.
Effect of finishing and polishing procedures on the surface roughness of new tooth-coloured restoratives.
J Oral Rehabil 30 (2003), 218-224.
74. Pantke A, Schlüttler D, Hüttemann RW, Pantke H.
Vergleichende Untersuchung verschiedener Methoden zur Beurteilung von Oberflächenstrukturen präparierter Zähne.
Dtsch Zahnärztl Z 40 (1985), 386-391.
75. Pelka M, Krämer N, Kunzelmann K-H.
Oberflächenveränderungen verschiedener Modelmaterialien durch mechanische Profilometrie.
Dtsch Zahnärztl Z 48 (1993), 488-491.
76. Phillips R.
Kunststoffe in der restaurativen Zahnmedizin.
Phillip Journal 4 (1986), 183-190.
77. Pratten DH, Johnson GH.
An evaluation of finishing instruments for an anterior and a posterior composite.
J Prosthet Dent 60 (1988), 154-158.
78. Quirynen M, Bollen CML.
The influence of surface roughness and surface-free energy on supra- and subgingival plaque formation in man.
J Clin Periodontol 22 (1995), 1-14.
79. Quirynen M, Marechal M, Busscher HJ, Weerkamp AH, Darius PL, Steenberghe D.
The influence of surface free energy and surface roughness on early plaque formation.
J Clin Periodontol 17 (1990), 138-144.

80. Quirynen M, Van Der Mei HC, Bollen CML, Schotte A, Marechal M, Doornbusch GI, Naert I, Busscher HJ, Van Steenberghe D.
An in vivo study of the influence of the surface roughness of implants on the microbiology of supra- and subgingival plaque.
J Dent Res 72 (1993), 1304-1309.
81. Rabe U, Pantke H.
Die Erfassung der Oberflächenverhältnisse biologischer Objekte mit charakteristischen Maßzahlen.
Dtsch Zahnärztl Z 37 (1982), 869-873.
82. Reinhardt KJ.
Die Schrumpfrichtung von Photopolymerisaten und ihre Wechselwirkung mit Unterfüllungsmaterialien.
Dtsch Zahnärztl Z 44 (1989), 165-168.
83. Rimondini L, Farè S, Brambilla E, Felloni A, Consonni C, Brossa F, Carrassi A.
The effect of surface roughness on early in vivo plaque colonization on titanium.
J Periodontol 68 (1997), 556-562.
84. Roeder LB, Tate WH, Powers JM.
Effect of finishing and polishing procedures on the surface roughness of packable composites.
Oper Dent 25 (2000), 534-543.
85. Rosen M, Grossman ES, Cleaton-Jones PE, Volchansky A.:
Surface roughness of aesthetic restorative materials: an in vitro comparison.
SADJ 56 (2001), 316-320.
86. Roulet JF.
Benefits and disadvantages of tooth-coloured alternatives to amalgam.
J Dent 25 (1997), 459-473.

87. Ryba TM, Dunn WJ, Murchison DF.:
Surface roughness of various packable composites.
Oper Dent 27 (2002), 243-247.
88. Schmid O, Krejci I, Lutz, F.
Ausarbeitung von adhäsiven zahnfarbenen Inlays aus Komposit und Keramik.
Schweiz Monatsschr Zahnmed 101 (1991), 177-184.
89. Schmidlin PR, Sener B, Lutz F.
Cleaning and polishing efficacy of abrasive-bristle brushes and a prophylaxis paste on resin composite material in vitro.
Quintessence Int 33 (2002), 691-699.
90. Seemann R.
Tabakwirkungen auf Speichel, Zähne und Restaurationen.
Zahnärztliche Mitteilungen 88 (1998), 3038-3041.
91. Shafagh I.
Plaque accumulation on cast gold complete crowns polished by a conventional and an experimental method.
J Prosthet Dent 55 (1986), 339-342.
92. Shintani H, Satou J, Satou N, Hayashihara TI.
Effects of various finishing methods on staining and accumulation of mutants HS-6 on composite resins.
Dent Mater 1 (1985), 225-227.
93. Small BW.
Direct resin composites for 2002 and beyond.
Gen Dent 50 (2002), 30-33.

94. Soltész U.
Polymerisationsschrumpfung einiger neuerer Komposit-Füllungswerkstoffe.
Zahnärztliche Mitteilungen 88 (1998), 1404-1405.
95. Sorensen JA.
A rationale for comparison of plaque-retaining properties of crown systems.
J Prosthet Dent 62 (1989), 264-269
96. Standford WB, Fan PL, Wozniak WT, Stanford JW.
Effect of finishing on color and gloss of composites with different fillers.
J Am Dent Assoc 110 (1985), 211-213.
97. Stoddard JW, Johnson GH.
An evaluation of polishing agents for composite resins.
J Prosthet Dent 65 (1991), 491-495.
98. Tate WH, De Schepper EJ, Cody T.
Quantitative analysis of six composite polishing techniques on a hybrid composite material.
J Esthet Dent 4 (1992), 30-32.
99. Tate WH, Powers JM.
Surface roughness of composites and hybrid ionomers.
Oper Dent 21 (1996), 53-58.
100. Tjan AHL, Chan CA.
The polishability of posterior composites:
J Prosthet Dent 61 (1989), 138-146.
101. Turssi CP, Ferracane JL, Serra MC.
Abrasive wear of resin composites as related to finishing and polishing procedures.
Dent Mater 21 (2005), 641-648.

102. Turssi CP, Saad JR, Duarte SL Jr, Rodrigues AL Jr.
Composite surfaces after finishing and polishing techniques.
Am J Dent 13 (2000), 136-138.
103. Venz S.
Optische und profilometrische Untersuchung zur Politur und Oberflächen-
glätte von Komposits.
Zahnärztliche Welt 92 (1983), 31-37.
104. Viohl J.
Kunststoff-Füllungswerkstoffe.
In: Eichner K (Hrsg.): Zahnärztliche Werkstoffe und ihre Verarbeitung.
Band I.
Hüthing, Heidelberg 1985, 125-158.
105. Watanabe T, Miyazaki M, Takamizawa T, Kurokawa H, Rikuta A, Ando S.
Influence of polishing duration on surface roughness of resin composites.
J Oral Sci 47 (2005), 21-25.
106. Whithead SA, Shearer AC, Watts DC, Wilson NH.
Comparison of methods for measuring surface roughness of ceramic.
J Oral Rehabil 22 (1995), 421-427.
107. Whitehead SA, Shearer AC, Watts DC, Wilson NHF.
Comparison of two stylus methods for measuring surface texture.
Dental Materials 15 (1999), 79-86.
108. Willems G, Lambrechts P, Braem M, Vuylsteke-Wauters M, Vanherle G.
The surface roughness of enamel-to-enamel contact areas compared with
the intrinsic roughness of dental resin composites.
J Dent Res 70 (1991), 1299-1305,
109. Wilson F, Heath JR, Watts DC.
Finishing composite restorative materials:
J Oral Rehabil 17 (1990), 79-87,

110. Wirz J, Amberg A, Schmidli F.
Polierbarkeit nichtmetallischer Werkstoffe.
Quintessenz 44 (1993), 1685-1695.
111. Xu HHK, Kelly JR, Jahanmir S, Thompson VP, Rekow ED.
Enamel subsurface damage due to tooth preparation with diamonds.
J Dent Res 76 (1997), 1698-1706.
112. Yap AUJ, Mok BYY.
Surface finish of a new hybrid aesthetic restorative material.
Oper Dent 27 (2002), 161-166.
113. Zalkind MM, Keisar O, Ever-Hadani P, Grinberg R, Sela MN.
Accumulation of *Streptococcus mutans* on light-cured composites and amalgam: an in vitro study.
J Esthet Dent 10 (1998), 187-190.

9 Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Markus Brandt
Geburtsdatum: 17. Januar 1971
Geburtsort: Kassel
Familienstand: verheiratet
Ehefrau: Katja Brandt, geb. Schmidt, Grundschullehrerin
Eltern: Hugo Brandt, Industriemeister
Gretel Brandt, geb. Jung, Angestellte im öffentlichen Dienst

Schulbildung

1977 - 1981 Grundschule Waldau in Kassel
1981 - 1987 Annette-von-Droste-Hülshoff- Schule in Kassel
1987 - 1990 Jacob-Grimm-Schule in Kassel
1990 Abitur an der Jacob-Grimm-Schule Kassel

Beruflicher Werdegang

1990 - 1994 Ausbildung zum Zahntechniker (Dentallabor Hartl Kassel)
1994 Bundeswehrsoldat GWD
1994 - 2001 Studium der Zahnheilkunde an der Justus-Liebig-Universität in Gießen
2001 Staatsexamen
2001 - 2002 Vorbereitungsassistent bei Dr. Schneider in Frankfurt/Main
2002 - 2003 Vorbereitungsassistent bei ZA Krey in Herborn

- 2003 Vorbereitungsassistent bei Dr. Meyding in Wetzlar
- 2003 - 2004 Vorbereitungsassistent bei Dr. Schote in Kassel
- 2004 Vorbereitungsassistent bei Dr. Turba in Gießen
- Seit 2004 Niederlassung in zahnärztlicher Gemeinschaftspraxis mit
Herrn Dr. H. Turba

10 Danksagung

Mein Dank gilt Herrn Prof. Dr. M. Jung für die Überlassung des Themas und die vorzügliche Betreuung bei der Anfertigung dieser Arbeit.

Besonders danken möchte ich auch Herrn Magdowsky für die anschauliche Einführung in die Benutzung des Rasterelektronenmikroskops, Herrn Bethge für die Unterstützung bei der Entwicklung der REM-Aufnahmen und Herrn Pabst für die Hilfe bei der prüfstatistischen Auswertung der Daten.

Mein Dank gilt ferner meiner Frau Katja, die mir bei der Anfertigung dieser Arbeit stets eine wertvolle Hilfe war, und meinem Vater für seine kritischen und wertvollen Anregungen bei der Durchsicht dieser Studie.

Ich erkläre:

„Ich habe die vorgelegte Dissertation selbständig, ohne unerlaubte fremde Hilfe und nur mit den Hilfen angefertigt, die ich in der Dissertation angegeben habe. Alle Textstellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder nicht veröffentlichten Schriften entnommen sind, und alle Angaben, die auf mündlichen Auskünften beruhen, sind als solche kenntlich gemacht. Bei den von mir durchgeführten und in der Dissertation erwähnten Untersuchungen habe ich die Grundsätze guter wissenschaftlicher Praxis, wie sie in der „Satzung der Justus-Liebig-Universität Gießen zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis“ niedergelegt sind, eingehalten.“