

DIE ROTIERENDE BEARBEITUNG VON VIER KOMPOSITEN AUF NANOTECHNOLOGIE- BASIS UND EINES HYBRIDKOMPOSITES

KATHRIN SEHR



INAUGURALDISSERTATION

zur Erlangung des Grades eines
Doktors der Zahnheilkunde
des Fachbereichs Humanmedizin
der Justus-Liebig-Universität Gießen

édition scientifique
VVB LAUFERSWEILER VERLAG

Das Werk ist in allen seinen Teilen urheberrechtlich geschützt.

Jede Verwertung ist ohne schriftliche Zustimmung des Autors oder des Verlages unzulässig. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung in und Verarbeitung durch elektronische Systeme.

1. Auflage 2007

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, or otherwise, without the prior written permission of the Author or the Publishers.

1st Edition 2007

© 2007 by VVB LAUFERSWEILER VERLAG, Giessen
Printed in Germany



VVB LAUFERSWEILER VERLAG
édition scientifique

STAUFENBERGRING 15, D-35396 GIESSEN
Tel: 0641-5599888 Fax: 0641-5599890
email: redaktion@doktorverlag.de

www.doktorverlag.de

**Die rotierende Bearbeitung von vier Kompositen
auf Nanotechnologie-Basis und
eines Hybridkomposites**

INAUGURALDISSERTATION
zur Erlangung des Grades eines
Doktors der Zahnheilkunde
des Fachbereichs Humanmedizin
der Justus-Liebig-Universität Gießen

vorgelegt von

KATHRIN SEHR

aus Mainz

Gießen 2006

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

Gutachter: Prof. Dr. M. Jung

Gutachter: Prof. Dr. Dr. K. Rödelsperger

Tag der Disputation: 15.03.2007

Meiner Familie

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
2	Literaturübersicht	6
2.1	Definitionen	6
2.1.1	Definition Nanotechnologie	6
2.1.2	Definition Kunststoff	7
2.1.3	Definition Komposit	7
2.2	Dentale Komposite	8
2.2.1	Entwicklung zahnfarbener Füllungsmaterialien	8
2.2.2	Zusammensetzung der Komposite und Funktion ihrer Hauptbestandteile	10
2.2.3	Klassifizierung der Komposite	11
2.2.3.1	Konventionelle bzw. makrogefüllte Komposite	12
2.2.3.2	Mikrofüllerkomposite	13
2.2.3.3	Hybridkomposite	14
2.2.4	Neuere Kompositmaterialien	15
2.2.4.1	Kompomere	15
2.2.4.2	Ormocere	16
2.2.4.3	Polygläser	17
2.2.4.4	Nanokomposite und ihre Eigenschaften	17
2.2.5	Ausarbeitung und Politur von Kompositfüllungen	20
2.2.5.1	Die Notwendigkeit des Ausarbeitens und Polierens von Kompositfüllungen	20
2.2.5.2	Instrumente für die Ausarbeitung und Politur von Kompositfüllungen	22
2.2.6	Methoden zur Oberflächenevaluierung in der Zahnheilkunde	25
2.2.6.1	Quantitative Methoden	25
2.2.6.2	Qualitative Methoden	29
2.2.6.3	Referenzwerte für Oberflächenrauigkeiten	30
3	Material und Methode	33
3.1	Wahl und Zusammensetzung der verwendeten Komposite	33
3.1.1	Ceram X Duo	33
3.1.2	Filtek TM Supreme	33
3.1.3	Tetric EvoCeram	34
3.1.4	Premise	34
3.1.5	Herculite XRV	35
3.2	Herstellung der Kompositprüfkörper	36
3.3	Instrumente für die rotierende Bearbeitung	37
3.3.1	Diamant- und Hartmetallfinierer	38
3.3.2	Flexible Scheiben	40
3.4	Die verschiedenen Bearbeitungsmethoden	41
3.5	Bearbeitung der Kompositoberflächen	42
3.6	Oberflächenevaluierung	43
3.6.1	Quantitative Beurteilung	43
3.6.1.1	Messbedingungen und Rauigkeitsparameter	45
3.6.1.2	Parallelaufzeichnung	47

3.6.1.3	Vorbereitung der Proben und Durchführung der Rauhigkeitsmessung	47
3.6.1.4	Prüfstatistische Auswertung	48
3.6.2	Qualitative Beurteilung	49
3.6.2.1	Vorbereitung der Proben zur rasterelektronenmikroskopischen Untersuchung	49
3.6.2.2	Anfertigung der REM-Aufnahmen am <i>PSEM 500</i>	50
3.6.2.3	Deskriptive Beurteilung und Auswertung der REM-Aufnahmen	52
4	Ergebnisse	53
4.1	Profilographische Befunde	53
4.1.1	Einfluss der Bearbeitungsverfahren	56
4.1.1.1	Vergleichende Betrachtung der unterschiedlichen Bearbeitungsverfahren anhand des arithmetischen Mittenrauhwertes	56
4.1.1.2	Vergleichende Betrachtung der unterschiedlichen Bearbeitungsverfahren anhand des Profillängenverhältnisses	57
4.1.2	Einfluss der Kompositmaterialien	58
4.1.2.1	Vergleichende Betrachtung der verschiedenen Materialien anhand des arithmetischen Mittenrauhwertes	58
4.1.2.2	Vergleichende Betrachtung der verschiedenen Materialien anhand des Profillängenverhältnisses	60
4.2	Rasterelektronenmikroskopische Befunde	62
4.2.1	Deskriptive Beurteilung der rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen	62
4.2.1.1	Kompositoberflächen im REM nach Ausarbeitung mit AV1	62
4.2.1.2	Kompositoberflächen im REM nach Ausarbeitung mit AV2	65
4.2.1.3	Kompositoberflächen im REM nach Ausarbeitung mit AV3	67
4.2.1.4	Kompositoberflächen im REM nach Bearbeitung mit RG	69
4.2.2	Quantifizierte Auswertung der rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen	71
5	Diskussion	74
5.1	Diskussion der Methode	74
5.1.1	Studiendesign	74
5.1.2	Profilometrische Untersuchung und Oberflächenparameter	76
5.1.3	Rasterelektronenmikroskopische Untersuchung	79
5.2	Diskussion der Ergebnisse	81
5.2.1	Einfluss der Bearbeitungsverfahren	81
5.2.2	Einfluss der Kompositmaterialien	85
5.3	Vergleich der Resultate mit denen anderer Autoren	87
5.4	Klinische Relevanz	89
5.5	Schlussfolgerungen	92
6	Zusammenfassung	94
7	Literaturverzeichnis	98
8	Anhang	110
8.1	Tabellarische Darstellung der profilometrischen Messergebnisse	110

8.2	Tabellarische Zusammenstellung der prüfstatistischen Auswertung	112
8.3	Tabellarische Zusammenstellung der rasterelektronenmikroskopischen Auswertung	113
9	Danksagung	115
10	Lebenslauf	116

1 Einleitung

Die Verwendung zahnfarbener Restaurationsmaterialien hat im Laufe der letzten Jahre beträchtlich zugenommen. Dies liegt zum einen an der ständigen Weiterentwicklung und damit Verbesserung sowohl der Kompositmaterialien als auch der Adhäsivsysteme bzw. Haftvermittler. Zum anderen sind gesteigerte ästhetische Ansprüche der Patienten zu nennen. Des Weiteren stellt eine mittlerweile weit verbreitete Skepsis der Patienten gegenüber der Verwendung von Metalllegierungen – hierbei insbesondere Amalgam aufgrund vieler Diskussionen um dessen mögliche Gesundheitsschäden – einen Grund für die Zunahme in der Nachfrage nach zahnfarbenen Füllungsmaterialien dar [Bayne et al., 1994]. All dies hat zu einem erheblichen Rückgang bei der Verwendung von Amalgam geführt [Lendenmann, 2005].

Ein wichtiger Faktor, der die Lebenserwartung und das ästhetische Erscheinungsbild zahnfarbener Füllungsmaterialien beeinflusst, ist die Qualität der angewendeten Ausarbeitungs- und Poliertechniken [Marigo et al., 2001]. Die Ausarbeitung einer Füllung lässt sich gliedern in Grobausarbeiten, Konturieren, Finieren und Polieren derselben. Die einzelnen Schritte zielen dabei ab auf die Entfernung von Überschüssen sowie der obersten füllstoffarmen Kompositschicht, die Wiederherstellung der Morphologie des Zahnes, eine vorbereitende Glättung der Oberfläche mit definitiver Ausarbeitung der Füllungsänder und schließlich das Erreichen einer homogen erscheinenden, ästhetisch glänzenden Oberfläche [Krejci und Lutz, 1984].

Die Füllungsoberfläche muss glatt poliert werden, um ein Anlagern von Bakterien und Speiseresten zu verhindern [Jung und Borchers, 1996] und so die Plaqueretention zu reduzieren [Kawai und Urano, 2001; Morgan, 2004]. Gelingt dies nicht, besteht eine erhöhte Gefahr des Auftretens von Sekundärkaries, Parodontopathien und Materialverfärbungen [Tjan und Clayton, 1989], welche zu einer Beeinträchtigung der Ästhetik führen können.

Mittlerweile stehen dem Behandler zahlreiche Techniken und Instrumente für das Finieren und Polieren von Kompositrestaurationen zur Verfügung. Dazu zählen Hartmetallfinierer, Diamantfinierer, rotierende Steine, beschichtete Schleifscheiben, diamantimprägnierte Filzpolierer, mit Schleifsand unterschiedlicher Körnung imprägnierte Gummi- oder Silikon-Polierer, Polierbürsten sowie Polierpasten auf Diamant- oder Aluminiumoxidbasis.

Komposite setzen sich zusammen aus einer organischen Matrix, anorganischen Füllstoffen und einer Verbundphase zwischen den beiden [Roulet, 1986; Viohl, 1985]. Verschiedene Kompositklassen können aufgrund der Zusammensetzung ihrer anorganischen Komponente unterschieden werden. Größe, Form und chemische Natur der Füllpartikel sowie der Fülleranteil im Kunststoffmaterial variieren erheblich zwischen den Kompositwerkstoffen und sind gleichzeitig Faktoren, welche die Polierfähigkeit beeinflussen [Lutz et al., 1983; van Noort und Davis, 1984]. Die unterschiedliche Härte von Füllpartikeln und Matrix tragen zu rauhen Kompositoberflächen bei [Christensen und Christensen, 1981], da sie häufig nicht gleichmäßig abgetragen werden [Chen et al., 1988]. Die Einführung kaltlichtpolymerisierender Komposite in den 70er Jahren des letzten Jahrhunderts [Cook et al., 1985] und der Einsatz immer feinerer Füllerpartikel steigerten die Polierfähigkeit dieser Füllungsmaterialien in hohem Maße [Bauer und Caputo, 1983]. Mit der Absicht, die Polierbarkeit und gleichzeitig physikalisch-technische Eigenschaften zu verbessern, wurden unter Nutzung der Nanotechnologie neue zahnfarbene Restaurationsmaterialien entwickelt. Dabei basieren diese sogenannten Nanokomposite auf innovativen „nano-optimierten Technologien“ [Ivoclar Vivadent, 2005b], was bedeutet, dass bewährte Verfahren zur Kompositherstellung beibehalten und durch Nanotechnologie, d.h. Partikel in der Größenordnung von Nanometern, ergänzt wurden.

Neben den Füllstoffen hat auch die organische Matrix einen erheblichen Einfluss auf die Eigenschaften der Komposite [Kawaguchi et al., 1989]. Dabei beruht heute, mehr als 40 Jahre nach der Erfindung des Kunststoffes Bis-GMA, die Monomermatrix der meisten Komposite noch immer auf diesem „Bowen-Kunststoff“ oder anderen abgeleiteten bifunktionellen Methacrylat-Monomeren [Hellwig et al., 2003; Lendenmann, 2005]. Erst kürzlich kamen neue, matrixmodifizierte Kompositfüllungsmaterialien auf den Markt, wie Kompomere, Ormocere und Polygläser [Hellwig et al., 2003; Hickel, 1998].

Aufgrund der aktuellen Entwicklung von Kompositen auf Nanotechnologie-Basis ist speziell für diese Materialien die Bewertung verschiedener bekannter Ausarbeitungs- und Poliertechniken von großem Interesse. Das Ziel der vorliegenden Studie war es daher, mit Hilfe profilometrischer und rasterelektronenmikroskopischer Untersuchungen die Oberflächenqualität von vier neuen Nanokompositen sowie eines etablierten Feinpartikelhybridkomposites nach Ausarbeitung mit verschiedenartigen rotierenden Instrumenten zu evaluieren.

2 Literaturübersicht

2.1 Definitionen

Ceram X Duo (Dentsply DeTrey, Konstanz), *Filtek™ Supreme* (3M ESPE AG, Seefeld), *Tetric EvoCeram* (Ivoclar Vivadent, Schaan/Liechtenstein) und *Premise* (KerrHaWe, Karlsruhe) stellen zahnfarbene Füllungsmaterialien dar, welche zur Gruppe der Komposite auf Nanotechnologie-Basis gehören. Da es in dieser Arbeit darum geht, solche Kunststoffe auf ihre Oberflächenqualitäten hin zu evaluieren, wird es als sinnvoll erachtet, die grundlegenden Begriffe zu definieren.

2.1.1 Definition Nanotechnologie

Der Begriff „Nano“ hat seinen Ursprung in der griechischen Sprache (nānnos) und bedeutet übersetzt „Zwerg“. Nano ist gleichzeitig ein Vorsatzzeichen, das vor einer Maßeinheit für den Faktor 10^{-9} steht. Ein Nanometer entspricht also dem Milliardstel eines Meters ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$).

Nanotechnologie ist ein Sammelbegriff für eine breite Auswahl von Technologien, welche sich der Untersuchung, Herstellung und Anwendung von funktionalen Strukturen und Gegenständen widmen, die kleiner als 100 nm sind. Die Nanotechnologie wird in Europa, Japan und den USA als eine der Schlüsseltechnologien des 21. Jahrhunderts verstanden und mit großem Aufwand in Forschung und Entwicklung vorangetrieben. Sie verbindet sehr unterschiedliche Ansätze und Anwendungen, die das Vordringen in den Grenzbereich zwischen der atomaren und der makroskopischen Welt und das Schaffen maßgeschneiderter Strukturen in der Größenordnung weniger Moleküle gemeinsam haben [Meier, 2000].

Die Ursprünge der Nanowissenschaften und Nanotechnologien gehen zurück auf das Jahr 1959, als Richard Feynman seine Visionen von der Miniaturisierung im Bereich der Atome und Moleküle vor der „American Physical Society“ am Caltech, USA, vorstellte mit dem oft zitierten Satz: „There is Plenty of Room at the Bottom“ [Meier, 2000]. Feynman stellte hierbei die Hypothese auf, dass die Miniaturisierung von Bauteilen und Geräten in den folgenden Jahrzehnten atomare Dimensionen erreichen werde. Seiner Meinung nach ergeben sich damit unzählige neue Chancen für Forschung, Technik und für die weitere Entwicklung der gesamten Menschheit.

Feynman gebrauchte den Begriff „Nanotechnologie“ damals noch nicht. Dies geschah erstmals 1974 durch den japanischen Wissenschaftler Norio Taniguchi, in dessen Augen Nanotechnologie für die Veränderung von Materialien Atom für Atom oder Molekül für Molekül steht. Mit diesem Begriff wollte er das mehr und mehr Nanometerdimensionen erreichende Gebiet der Ultrapräzisionsbearbeitung an elektronischen und mechanischen Bauteilen von den herkömmlichen Methoden abgrenzen, die nur Genauigkeiten bis in den Mikrometerbereich zuließen [Meier, 2000].

Die Nanotechnologie gewinnt auch in der Zahnheilkunde immer mehr an Bedeutung, besonders auf dem Gebiet der adhäsiven Füllungstherapie. Keramische Nanopartikel, die eine Korngröße von weniger als 100 nm haben, sind Teil der variablen Füllertechnologie in den neuen sogenannten Nanokompositen.

2.1.2 Definition Kunststoff

In der Zahnmedizin nehmen dentale Kunststoffe aufgrund ihrer vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten sowohl in der prothetischen und der konservierenden als auch in der orthodontischen Zahnheilkunde eine bedeutende Stellung ein. Hier finden Kunststoffe unter anderem Verwendung als Basismaterial für abnehmbare kieferorthopädische Geräte sowie Prothesen, als Prothesenzähne, als Verblendkunststoffe für festsitzenden Zahnersatz, als Füllungswerkstoffe in der Zahnerhaltung, als Versiegelungsmaterialien zur Fissurenversiegelung und schließlich auch als orthodontische Kleber [Janda, 1996].

2.1.3 Definition Komposit

„Allgemein wird der Ausdruck Komposit-Kunststoff auf die angloamerikanische Bezeichnung ‚composite resin material‘ zurückgeführt, hergeleitet von lat. *componere* (= zusammensetzen), *resina* (= Harz) und *materia* (= Stoff).“ [Kullmann, 1990].

Nach Hellwig et al. (2003) versteht man allgemein unter Kompositen dem Wortsinn nach zusammengesetzte Werkstoffe, wobei es sich hierbei um unterschiedliche Materialien im Bereich der Zahnheilkunde sowie in anderen Bereichen handeln kann. Auf dem Gebiet der Zahnmedizin bezeichnet man als Komposite zahnfarbene Füllungsmaterialien, die im plastischen Zustand in Kavitäten eingebracht werden und chemisch oder nach Lichtbestrahlung aushärten.

2.2 Dentale Komposite

2.2.1 Entwicklung zahnfarbener Füllungsmaterialien

Viele Patienten äußern den Wunsch nach zahnfarbenen Füllungen. Um diesem Wunsch Rechnung tragen zu können, wurde in den letzten Jahren die Entwicklung der Kunststofffüllungsmaterialien vehement vorangetrieben. Ziel war es hierbei, eine Alternative für das plastische, quecksilberhaltige Amalgam zu finden. Ein weiterer Grund für die ständige Weiterentwicklung sind die heute noch nicht optimal erreichten Anforderungen, welche an ein Füllungsmaterial auf Kunststoffbasis gestellt werden. Dieses sollte sich durch hohe Abrasionsbeständigkeit und Druckfestigkeit sowie geringe Polymerisationsschrumpfung und damit geringe Randspaltbildung auszeichnen [Bedran de Castro et al., 2002; Deliperi und Bardwell, 2002; Peutzfeldt und Asmussen, 2002; Yap et al., 2000; Yap et al., 2004]. Dies zu erlangen, trieb und treibt die Entwicklung auf dem Gebiet der Kompositmaterialien voran.

Die Entwicklung der Kompositkunststoffe kann man zurückverfolgen bis in das 19. Jahrhundert, als von Reichenbacher die Acrylsäure synthetisierte [Cook et al., 1985]. In den fünfziger Jahren des 20. Jahrhunderts kamen dann PMMA-Kunststoffe (PMMA = polymeres Methylmethacrylat) als erste dentale Kunststoffe zum Einsatz, welche im chemischen Aufbau den kaltpolymerisierenden Prothesenkunststoffen entsprachen und keine Füllstoffe enthielten. Sie zeigten bei Gebrauch starke Verfärbungen und schon nach kurzer Zeit deutliche Abnutzungserscheinungen, ebenso eine enorme Polymerisationsschrumpfung, womit ein ungenügender Randschluss einherging [Christensen, 1985]. Damit waren sie als dentale Restaurationsmaterialien als ungeeignet anzusehen, genauso wie die schon seit 1871 verwendeten Silikatzemente und die seit den vierziger Jahren des letzten Jahrhunderts auf den Markt gekommenen selbsthärtenden Acrylate. Aufgrund von auftretender Pulpenunverträglichkeit, ihrer hohen Löslichkeit im Mundmilieu und einer geringen Abrasionsresistenz [Riethe und Rau, 1988] verlangten Silikatzemente eine Weiterentwicklung dentaler Füllungsmaterialien. Bei den Acrylaten war es die geringe Dimensionsstabilität, die einen erheblichen Nachteil darstellte.

Im Jahr 1962 wurde der erste Schritt in Richtung Komposit-Entwicklung durch die Synthese des Monomers Bis-GMA (Bisphenol-A-Glycidylmethacrylat) gemacht. Dieses sogenannte Bowenharz entstand als Verbindung zwischen einem Methacrylat und einem Epoxidharz [Bowen, 1979; Roulet, 1986; Viohl, 1985]. Durch die zusätzliche Anreicherung einer aus diesem Bis-GMA bestehenden Matrix mit gemahlenem Quarz als

anorganischem Füller entwickelten Bowen et al. einen neuen Füllungswerkstoff [Bowen et al., 1983]. Die dadurch entstandenen Komposite wiesen wesentlich bessere Eigenschaften auf als alle bis zu diesem Zeitpunkt verwendeten zahnfarbenen Füllungswerkstoffe und waren zusätzlich pulpaverträglich [Leinfelder, 1997]. Diese Komposite waren in den späten sechziger und frühen siebziger Jahren des letzten Jahrhunderts sehr verbreitet [Christensen, 1985]. Man bezeichnete sie als konventionelle bzw. makrogefüllte Komposite, im Unterschied zu den 1974 eingeführten Mikrofüller- und seit den achtziger Jahren verfügbaren Hybridkompositen [Lutz et al., 1983]. Bei den mikrogefüllten Kompositen wurden wesentlich kleinere Füller verwendet, was zu einem ungenügenden Abrasionsverhalten führte. Bei den Hybridkompositen lag eine Verbindung von Mikro- und Makrofüllern in einem Komposit vor, durch die man eine Verbesserung der Abrasionsbeständigkeit erzielte.

Mittlerweile sind die bei früheren Kompositmaterialien beobachteten starken Abnutzungen im okklusalen Kontaktpunktbereich als überwunden anzusehen [Krejci, 1992; Leinfelder, 1997], manche Füllungskunststoffe sind sogar so abriebfest wie Amalgam [Leinfelder, 1991]. Die Polymerisationsschrumpfung stellt jedoch weiterhin ein Problem der Kompositrestaurationen dar, weil sie bis heute nicht unter Werte zwischen 2 - 3 % reduziert werden kann [Ernst und Willershausen, 2003]. Mit der Schrumpfung des Füllungsmaterials geht eine Randspaltbildung einher, wodurch u.a. das Auftreten von Sekundärkaries am Füllungsrand begünstigt werden kann [van Dijken, 1986; Wilson et al., 1988].

Der Einsatz immer feinerer Füllerpartikel steigerte erheblich die Polierfähigkeit von Kompositmaterialien [Bauer und Caputo, 1983]. Mit dem Ziel, die Oberflächenrauigkeiten noch weiter zu verringern, wurden unter Einbeziehung der innovativen Nanotechnologie neue zahnfarbene Restaurationsmaterialien entwickelt, sogenannte Nanokomposite.

Aufgrund der beschriebenen verbesserten werkstoffkundlichen Eigenschaften im Vergleich zu den Füllungsmaterialien der ersten Generation hat die Verwendung von Kompositen als restauratives Material auch im Seitenzahnggebiet zugenommen [Cobb et al., 2000; Gleghorn, 2000].

2.2.2 Zusammensetzung der Komposite und Funktion ihrer Hauptbestandteile

Komposite setzen sich aus unterschiedlichen Bestandteilen zusammen, deren Kombination für die Materialeigenschaften verantwortlich ist. Dieses Füllungsmaterial ist aufgebaut aus einer organischen Matrix, anorganischen Füllstoffen (disperse Phase) und einer Verbundphase (Haftvermittler) zwischen den beiden [Hellwig et al., 2003; Roulet, 1986; Viohl, 1985].

Die meisten kommerziellen Kompositrestaurationmaterialien basieren auf dem Bowen-Kunststoff Bis-GMA oder anderen meist von ihm abgeleiteten bifunktionellen Methacrylat-Monomeren [Causton, 1978; Guertsen, 1989; Hellwig et al., 2003; Lendenmann, 2005]. Nach Lutz et al. (1983) sind mögliche Modifikationen der Grundsubstanz ein Ersatz des Bis-GMA durch UDMA (Urethan-Dimethacrylat) oder TEGDMA (Triethylen-Glycol-Dimethacrylat). Neben den genannten Monomeren umfasst die Matrix der heutigen Komposite Komonomere, Initiatoren, Inhibitoren, Pigmente, Farbstoffe und weitere Zusätze [Hellwig et al., 2003]. Als Füller kommen beispielsweise Quarz, Keramik, Siliziumdioxid [Hellwig et al., 2003], Borosilikat und Bariumglas [Causton, 1978] zum Einsatz. Letztgenanntes wird hinzugefügt, um eine ausreichende Röntendichte zu erlangen. Die Verbundphase wird von bifunktionellen Silanen als Haftvermittler gebildet [Janda, 1988].

Die organische Matrix ist aufgrund des enthaltenen Initiators für den Übergang von einem plastischen zu einem festen Füllungsmaterial verantwortlich. Dieser Initiator wird durch Licht, Temperatur oder durch eine chemische Reaktion aktiviert. Das Monomer bestimmt die Viskosität des Komposites und ebenso die Größe der Polymerisationsschrumpfung, welche bei der Vernetzung auftritt [Christensen, 1985].

Die Silanschicht, welche die Füllkörper umgibt, reagiert mit deren Oberfläche und bewirkt eine bessere Verbindung der dispersen Phase mit der organischen Matrix. Hierdurch wird die mechanische Festigkeit des Komposites gesteigert [Janda, 1988].

Die anorganische Phase ist ausschlaggebend für mechanische Eigenschaften wie die Zug-, Biege- und Druckfestigkeit, das Elastizitätsmodul sowie die Abrasionsfestigkeit [Hellwig et al., 2003]. Weiterhin hat sie einen entscheidenden Einfluss auf die thermische Expansion und Kontraktion sowie ebenfalls auf die effektive Polymerisationsschrumpfung der Füllung [Bowen, 1965]. Letzteres liegt daran, dass die Füllkörper volumenstabil bleiben

während die Kunststoffmatrix schrumpft. So hätte eine Kunststoffmatrix ohne Füllkörper eine Gesamtschrumpfung von ungefähr 10 - 20 Vol-%. Durch geeignete Füllkörper kann dieser Wert auf etwa 4 Vol-% reduziert werden [Lambrechts et al., 1987]. Mit einem höheren Füllergehalt wird in der Regel ein standfesteres und weniger klebriges Füllungsmaterial erreicht. Gleichzeitig nimmt mit einer Erhöhung des Füllergehaltes generell die Eigenelastizität ab, welche die Polymerisationsschrumpfkraft kompensieren kann. Der maximale volumenmäßige Gehalt an Füllstoff in einem Kompositkunststoff beträgt etwa 70% [Kullmann, 1990]. Die Füllkörper sind somit verantwortlich für die mechanischen Eigenschaften, zusätzlich aber auch für die Oberflächenbeschaffenheit der Komposite [Janda, 1988; Lutz und Phillips, 1983]. So ergaben die Studien von Lutz et al. (1983) sowie van Noort und Davis (1984), dass die erreichbare Oberflächenrauigkeit unter anderem von der Partikelgröße des Füllers abhängt. Dies erklärt die Klassifizierung der Komposite nach den Füllstoffen, wie sie in Kapitel 2.2.3 vorgenommen wird. Ebenfalls zu rauhen Kompositoberflächen tragen die unterschiedlichen Härten von Füllpartikeln und Matrix bei [Christensen und Christensen, 1981], da sie dadurch nicht gleichmäßig abgetragen werden [Chen et al., 1988].

2.2.3 Klassifizierung der Komposite

Die Vielzahl an Kompositmaterialien unterscheidet sich hauptsächlich in der Zusammensetzung der Füllpartikel, deren Größe und Form und dem volumenmäßigen Fülleranteil im Kunststoffmaterial. Daher entschied man sich für eine Klassifikation dieser Materialien basierend auf der Art und Größe der verwendeten Füllkörper. Die folgende Abhandlung soll bei den verschiedenen Komposittypen Unterschiede in Bezug auf deren Zusammensetzung und Anwendungsindikation darstellen sowie einige Vor- und Nachteile aufzeigen.

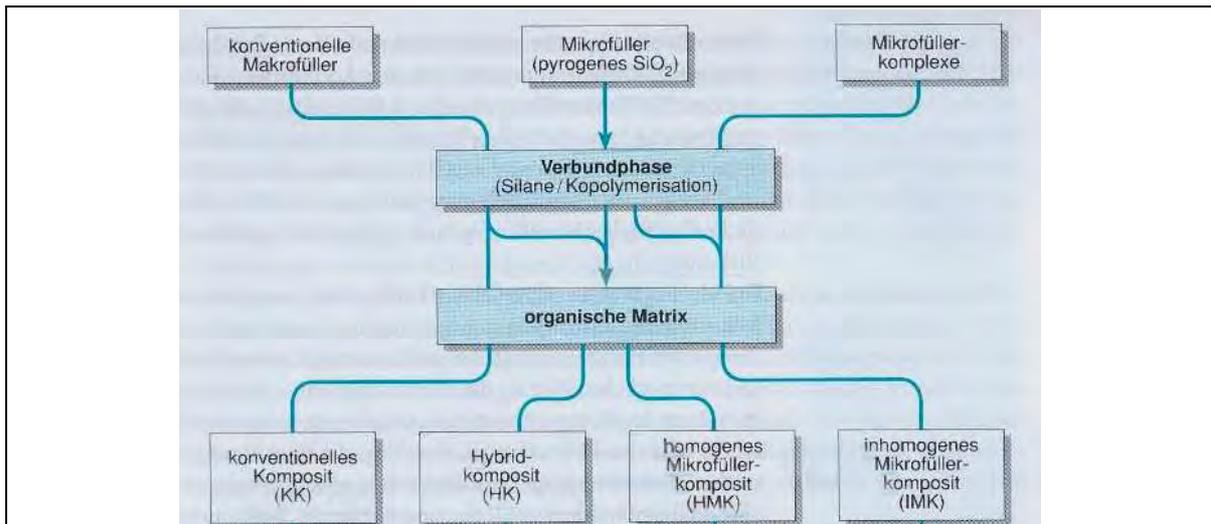


Abb. 1: Einteilung der Komposite nach Art der Füller [Hellwig et al., 2003]

2.2.3.1 Konventionelle bzw. makrogefüllte Komposite

Makrofüllerkomposite bestehen aus einer organischen Matrix, Verbundphase und Füllern mit relativ großem Durchmesser von 2-15 µm [Lutz et al., 1983]. Als Vorteil sei hier die lange klinische Beobachtungszeit zu nennen, da konventionelle Komposite seit den sechziger Jahren des letzten Jahrhunderts in der Zahnmedizin Verwendung fanden. Die inhomogenen anorganischen Makrofüllstoffe bestehen aus Quarz, Keramik oder Glas und erscheinen splitterförmig [Lutz et al., 1983]. Aufgrund eines hohen Füllstoffanteils weisen diese Komposite gute physikalische Eigenschaften auf [Phillips, 1986], jedoch sind nur ungenügende Feinausarbeitung und Politur möglich. Lutz (1980) spricht sogar von der Unmöglichkeit einer Politur solcher Füllungen. Die Ursache dafür ist in der wesentlich größeren Härte und höheren Abriebfestigkeit der Füllpartikel im Unterschied zu der sie umgebenden Matrix zu finden. Folglich wird bei einem Glätten der Oberfläche mit Schneide- oder Schleifinstrumenten nur die Matrix zwischen benachbarten Füllkörpern abgetragen, nicht aber die Glas- oder Quarzpartikel der Füller. Diese ragen entweder aus der Oberfläche heraus oder werden komplett aus dem Fügeverbund herausgerissen, sodass Krater zurückbleiben. Dies führt zu einer aufgerauhten Oberfläche und zu einem Verlust der Reflektionsfähigkeit. Weiterhin weisen Makrofüllerkomposite eine deutlich erhöhte Abrasion auf, welche ebenfalls auf den oberflächlichen Füllungsmaterialverlust zurückzuführen ist und durch die Größe der Füllkörper gefördert wird. Somit erweisen sich konventionelle Komposite als ungeeignete Restaurationsmaterialien. Zu vergleichbarem Schluss kamen Lutz et al. (1983), die den klinischen Misserfolg der ersten makrogefüllten

Komposite auf die mangelhaften Oberflächeneigenschaften und eine geringe Verschleißfestigkeit zurückführten.

2.2.3.2 *Mikrofüllerkomposite*

Homogene Mikrofüllerkomposite setzen sich zusammen aus organischer Matrix, Verbundphase und Mikrofüllern. Letztere sind Partikel aus Quarz bzw. pyrogenem SiO₂ mit einer durchschnittlichen Größe von 0,01-0,1 µm [Lutz et al., 1983]. Der Füllstoffgehalt homogener Mikrofüllerkomposite beträgt 50 Gew.-% [Hellwig et al., 2003]. Aufgrund der geringen Partikelgrößen lassen sich diese Komposite hervorragend polieren [Chung, 1994; Krejci, 1992] und bieten wenig Retentionsfläche für ein Herausreißen der Füllkörper aus dem Kompositgefüge. Somit gewährleisten sie eine ausgezeichnete Oberflächenqualität im Mund und eine akzeptable Verschleißresistenz, welche höher ist als die der Makrofüllerkomposite. So haben Untersuchungen gezeigt, dass kleinere Partikelgrößen u.a. zu einer Verschleißverringerng führen [Suzuki et al., 1995].

Als nachteilig sind hier ungenügende mechanisch-physikalische Eigenschaften zu nennen [Lambrechts et al., 1987], wie geringe Belastbarkeit bzw. Festigkeit, ein hoher thermischer Ausdehnungskoeffizient und hohe Polymerisationsschrumpfung [Lutz et al., 1983; Phillips, 1986]. Begründet werden können diese unbefriedigenden Eigenschaften mit dem geringen anorganischen Füllstoffgehalt. Aufgrund der hohen spezifischen Oberfläche der Mikrofüller kommt es nämlich zu einer hohen Zähigkeit des Materials. Dadurch kann nur eine beschränkte Menge anorganischer Füller verwendet werden [Lendenmann, 2005].

Da sich Füllergehalt und Eigenelastizität proportional zueinander verhalten, besteht ein Vorteil der Mikrofüllerkomposite in der hohen Eigenelastizität. Diese bewirkt eine geringere Belastung des adhäsiven Verbundes zur Zahnhartsubstanz [Lendenmann, 2005]. Deshalb sind Mikrofüllerkomposite besonders für Füllungen in der Front und im Zahnhalsbereich geeignet, wo es nicht so sehr auf die Druckfestigkeit der Füllung ankommt.

Inhomogene Mikrofüllerkomposite bestehen aus der Verbundphase, der organischen Matrix und einer Kombination aus Mikrofüllern und Mikrofüllerkomplexen. Bei letzteren können kugelförmige, splitterförmige und agglomerierte Mikrofüllerkomplexe unterschieden werden [Phillips, 1986]. Die durchschnittliche Partikelgröße der Füller beträgt 0,04 µm [Chapman und Nathanson, 1983].

Diese Komposite entstanden bei dem Versuch, die homogenen Mikrofüllerkomposite im Hinblick auf ihre besonders hohe Polymerisationsschrumpfung zu verbessern. Gelöst wurde dieses Problem durch die Verwendung von vorpolymerisierten Mikrofüllerkompositbestandteilen, den Mikrofüllerkomplexen. Dadurch gelang es, die Polymerisationsschrumpfung zu verringern, ohne die optimale Politurfähigkeit und die Elastizität negativ zu beeinflussen. Beim Ausarbeiten und Polieren werden hier Füller und Matrix zu gleichen Teilen abgetragen. Die Zugabe der industriellen Präpolymerisate zur Erhöhung des Füllkörpergehalts der Mikrofüllerkomposite auf 70-80 Gew.-% [Hellwig et al., 2003] gewährleistet zudem eine gute Abrasionsresistenz und Druckfestigkeit. Als nachteilig zu nennen sind schlechtere physikalische Eigenschaften, eine erschwerte Verarbeitung und eine im Vergleich zu homogenen Mikrofüllerkompositen zwar geringer ausfallende aber dennoch hohe Polymerisationsschrumpfung [Lutz et al., 1983].

2.2.3.3 Hybridkomposite

Wie oben beschrieben, verleihen verschiedenartige Füllertypen einem Komposit unterschiedliche spezifische Eigenschaften. Zusammengefasst lässt sich sagen, dass der Einsatz von Mikrofüllern eine gute Polierbarkeit und hohe Verschleißfestigkeit ermöglicht; gleichzeitig sind jedoch eine verringerte Belastbarkeit und eine hohe Polymerisationsschrumpfung zu nennen. Makrofüller hingegen stehen für hohe physikalische Festigkeit und geringe Polymerisationsschrumpfung, sind aber für einen hohen Verschleiß und eine raue Oberflächenbeschaffenheit verantwortlich.

Die Werkstoffgruppe der Hybridkomposite stellt einen Kompromiss zwischen den mikrogefüllten und den konventionellen Kompositen dar [Chapman und Nathanson, 1983]. Die Anfang der achtziger Jahre des letzten Jahrhunderts entwickelten Hybridkomposite ermöglichen eine Vereinigung der günstigen physikalischen Eigenschaften der makrogefüllten mit den positiven optischen Eigenschaften der mikrogefüllten Komposite [Lutz et al., 1983].

Hybridkomposite bestehen aus organischer Matrix, Verbundphase und einer Kombination aus Mikro- und Makrofüllern. Die disperse Phase stellt ein Gemisch aus Mikrofüllern (pyrogenes SiO₂) und Makrofüllern (Glas, Quarz oder Keramik) dar, wobei erstere etwa 10-15 Gew.-% und zweitgenannte 85-90 Gew.-% der Füllkörper ausmachen. Dadurch lässt sich der Füllkörpergehalt eines Hybridkomposites auf bis zu 85 Gew.-% steigern [Hellwig et al., 2003]. Die durchschnittliche Korngröße der Füllkörper beträgt 2-10 µm bei Grobpartikelhybridkompositen und 0,3-2 µm bei Feinpartikelhybridkompositen [Lutz et

al., 1983; Phillips, 1986]. Feinpartikelhybridkomposite mit einer durchschnittlichen Partikelgröße von unter 1,5 μm werden als Feinstpartikelhybridkomposite bezeichnet [Hellwig et al., 2003].

Hybridkomposite weisen einen sehr hohen Füllergehalt auf, woraus sich günstigere mechanisch-physikalische Eigenschaften als bei den Mikrofüllerkompositen ergeben [Hickel, 1997; Krejci, 1992; Yap et al., 1997], u.a. geringere Polymerisationsschrumpfung und höhere physikalische Festigkeit. Laut Leinfelder (1997) sind speziell Feinpartikelhybridkomposite so abriebfest wie Amalgam. Dies ist einer der Gründe, weshalb die Hybridkomposite die einzige Kompositvariante darstellen, die für den Einsatz im okklusionstragenden Seitenzahnggebiet geeignet ist [Cobb et al., 2000; Gleghorn, 2000]. Ein Nachteil dieser Werkstoffgruppe ist die nicht als ideal anzusehende Oberfläche, weshalb bei Füllungen, bei denen die Ästhetik eine große Rolle spielt, Mikrofüllerkomposite den Hybridkompositen vorgezogen werden [Lutz et al., 1983]. Im Allgemeinen empfehlen die Autoren bei routinemäßig zu legenden Kompositfüllungen die Verwendung von Hybridkompositen. Was die Polierbarkeit betrifft, erzielen speziell Feinpartikelhybridkomposite befriedigende Ergebnisse, was in der Füllkörpergröße von unter 1 μm begründet ist [Berastegui et al., 1992; Yap et al., 1997].

2.2.4 Neuere Kompositmaterialien

Bis heute konnte kein Material die Eigenschaften in sich vereinigen, welche für die Verwendung von Kompositen sowohl im Front- als auch im Seitenzahnbereich erforderlich sind [Denehy, 2000]. Daher kamen im Laufe der Weiterentwicklung zur Verbesserung der werkstoffkundlichen Eigenschaften neuere Kompositmaterialien auf den Markt. Hierzu gehören u.a. Kompomere, Ormocere und sogenannten Polygläser, welche Modifikationen der ursprünglichen Fein- und Feinstpartikelhybridkomposite darstellen [Hellwig et al., 2003; Hickel, 1998]. Hellwig et al. (2003) kommen zu dem Schluss, dass es sich bei diesen genannten Kompositmaterialien kaum um wesentliche Verbesserungen in den Materialeigenschaften handelt. An dieser Stelle ist auch die neue Gruppe der Nanokomposite zu nennen. Die Nanotechnologie verspricht dabei, Kompositmaterialien mit neuartigen Eigenschaften entwickeln zu können.

2.2.4.1 Kompomere

Kompomere gehören den matrixmodifizierten Kompositmaterialien an. Neben reaktiven, ionenfreisetzenden Glaspartikeln, die an jene der Glasionomerezemente angelehnt sind,

beinhaltet die Matrix neben normalen Harzen säuremodifizierte, polymerisierbare Monomere. Letztere sollen neben der klassischen Lichthärtung im Rahmen einer sekundären Härtungsreaktion unter Feuchtigkeitseinfluss eine leichte Säure-Base-Reaktion haben. Dies ermöglicht eine Verarbeitung im nicht absolut trockenem Bereich. Ein Vorteil der Kompomere besteht in der potentiellen Eigenschaft, beigefügte Fluoridionen in geringen Mengen allmählich abzugeben. Diese Abgabe ist zwar geringer als bei Glasionomerzement, dagegen jedoch weitaus höher als bei Hybridkompositen [Ernst und Willershausen, 2003]. Des Weiteren zeigen Kompomere die von den Glasionomerzementen her bekannten guten Haftfähigkeiten an den Zahnhartsubstanzen, hier insbesondere am Dentin [Krejci, 1996]. Aufgrund der genannten Eigenschaften sind Kompomere prädestiniert für die Versorgung von Kavitäten im Milchgebiss und solchen im Zahnhalsbereich bleibender Zähne. Im Vergleich zu Hybridkompositen sind Kompomere weniger abrasionsstabil und daher zur endgültigen Versorgung okklusionstragender Seitenzahnkavitäten permanenter Zähne nicht indiziert [Hellwig et al., 2003; Krejci, 1996]. Im ästhetisch sichtbaren Frontzahnbereich ist die Verwendung von Kompomeren ebenfalls einschränkt, da es aufgrund der gegenüber konventionellen Kompositen höheren Wasseraufnahme leichter zur Einlagerung färbender Substanzen in oberflächliche Schichten des Füllungsmaterials kommen kann.

2.2.4.2 *Ormocere*

Der Begriff „Ormocer“ ist die Abkürzung von „organic modified ceramic“, mit der polymere anorganisch-organische Hybridmaterialien bezeichnet werden. Mit der Entwicklung der Ormocere wurde eine grundlegende Veränderung der organischen Matrix gegenüber jener der konventionellen Komposite erzielt, da die Matrix der Ormocere keramische Polysiloxane enthält [Manhart et al., 2001]. So besteht ihre Matrixstruktur aus organischen (CH₂-Gruppen) und anorganischen Komponenten (Si-O-Ketten) [Yap et al., 2005]. Aufgrund ihrer partiell anorganischen Struktur weisen Ormocere gegenüber konventionellen Kompositen eine hohe Bioverträglichkeit auf [Ernst und Willershausen, 2003]. Vergleicht man Ormocere mit den gebräuchlichen Hybridkompositen hinsichtlich der okklusalen und zervikalen Adaptation nach zyklischer Belastung, so schneiden Ormocere deutlich schlechter ab [Kournetas et al., 2004]. Die Autoren vermuteten, dass bei Ormocer-Füllungssystemen die Reaktion der Haftvermittler auf die wechselnden Belastungsimpulse für deren geringere Qualität an den Rändern und im Inneren bei Klasse-II-Restaurationen verantwortlich ist.

2.2.4.3 Polygläser

Diese neuen Kompositmaterialien bestehen aus einer organischen Glasmatrix, deren Vernetzungsdichte höher liegt als die einer Matrix herkömmlicher Monomere [Hellwig et al., 2003]. Sie weisen in vitro gute physikalische Eigenschaften auf und sollen gut stopfbar sowie standfest bei der Modellation sein [Hahn, 1997]. Vergleicht man Polygläser mit gebräuchlichen Hybridkompositen und Ormoceren hinsichtlich der Oberflächenqualität nach rotierender Bearbeitung sowie nach abschließender Politur, so schneiden Polygläser deutlich besser ab [Jung et al., 2003a; Jung et al., 2003b]. Die Autoren vermuteten, dass die Füllkörper der Polygläser aufgrund ihrer porösen Struktur eine bedeutend geringere Härte besitzen als die Füller der anderen Komposite und sich daher bei der Ausarbeitung und Politur leichter einebnen lassen [Jung et al., 2003a]. Die Vermutung der geringeren Härte von Polygläsern wird von Manhart et al. (2000b, 2001) bestätigt. Ihre Verschleißfestigkeit ist ebenfalls deutlich geringer als die von Nanokompositen, Mikro- und Minifüllerkompositen sowie etwas niedriger als die von Ormoceren [Yap et al., 2004a]. Des Weiteren zeigte sich eine signifikant geringere Elastizität der Polygläser [Manhart et al., 2000a; Manhart et al., 2000b; Manhart et al., 2001] sowie eine signifikant geringere Resistenz gegenüber Frakturen als bei allen übrigen untersuchten Kompositen [Kelsey et al., 2000].

2.2.4.4 Nanokomposite und ihre Eigenschaften

Durch die zunehmende Feinheit der anorganischen Füllkörper von nur wenigen Nanometern wurde eine neue Kompositgruppe geschaffen, sogenannte Nanokomposite bzw. Komposite auf Nanotechnologie-Basis. Hierunter gibt es sowohl Füllungsmaterialien, welche den Hybridkompositen angehören (z.B. *Premise* der Firma KerrHaWe, Karlsruhe) als auch solche, die zu den Mikrofüllerkompositen gezählt werden (z.B. *FiltekTM Supreme* von 3M ESPE AG, Seefeld). Daher erschien es sinnvoll, als Überbegriff „Nanokomposit“ und zur genaueren Bezeichnung „Nanohybridkomposit“ und „Nanofüllerkomposit“ (Nano-Mikrofüllerkomposit) zu verwenden, sodass die Zugehörigkeit zu den jeweiligen Komposittypen eindeutig erkennbar ist.

Wie in Kapitel 2.1.1 schon erwähnt, werden bei der Nanotechnologie mit Hilfe verschiedener physikalischer und chemischer Systeme Werkstoffe und Strukturen von unter 100 nm hergestellt. Die bei Nanokompositen eingesetzten Nanofüller werden laut Mitra et al. (2003) mit einem komplett anderen Ansatz hergestellt als herkömmliche

Füllstoffe. Bei dem herkömmlichen Verfahren beginnt man mit großen Teilchen der als Füllmaterial gewählten Rohstoffe und mahlt diese bis zu einer Größe von 100 nm („top-down“ Prinzip). Bei der Nanotechnologie ist der Ansatz genau umgekehrt. Ausgehend von chemischen Syntheseprozessen werden hier Teilchen in der Größe weniger Nanometer hergestellt („bottom-up“ Prinzip), deren Eigenschaften in der Produktionsphase bestimmt werden können und daher nicht von den Eigenschaften der gewählten Rohstoffe vorgegeben werden [Mitra et al., 2003]. Mit Hilfe dieses Verfahrens entwickelte Nanopartikel werden einer Matrix in verschiedenen Formen zugefügt, als einzelne Nanopartikel, sog. Nanomere, und/oder als Aggregate von Nanopartikeln, sog. Nanocluster bzw. Präpolymere [Lendenmann, 2005; Mitra et al., 2003].

Ein Vorteil der Nanotechnologie, welcher bei zahnmedizinischen Kompositmaterialien ausgenutzt wird, ist die unterhalb der Wellenlänge sichtbaren Lichtes (0,4 - 0,77 μm) liegende Partikelgröße der Füllstoffe. Sie verhindert eine Reflexion des Lichtes, was positive Auswirkungen auf die optischen Eigenschaften eines mit Nanotechnologie hergestellten Materials hat. Von den vorkommenden zwei Arten an Nanopartikeln sind die Nanomere in ihrer Größe unterhalb der Wellenlänge des sichtbaren Lichtes anzuordnen, nicht aber die Nanocluster. Da diese jedoch aus einzelnen Nanopartikeln aufgebaut sind und beim Ausarbeiten und Polieren keine kompletten Aggregate sondern nur einzelne Partikel abgetragen werden, wird eine exzellente Polierbarkeit erzielt. Auch nach Belastung bleibt dadurch die Oberfläche glatt [Mitra et al., 2003].

Zu den meisten Nanokompositen findet man zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch nicht viele relevante Studien. *Filtec Supreme* wurde von den vier für diese Studie gewählten Kompositen auf Nanotechnologie-Basis bis heute am häufigsten untersucht. Yap et al. (2004b) verglichen dieses Nanofüllerkomposit sowohl in einer röntgenopaken als auch in einer transluzenten Farbe mit je einem Kompomer, Ormocer, Mikro- und Minifüllerkomposit sowie zwei verschiedenen Glasionomern. Nach einheitlicher Aufrauung mit Sandpapier der Größe 320 und Finieren bzw. Polieren mit beschichteten Scheiben (Super-Snap, Shofu) erfolgte die Bestimmung des arithmetischen Mittenrauhwertes R_a . Die Autoren kamen zu dem Ergebnis, dass *Filtec Supreme* in der transluzenten Ausführung zusammen mit dem benutzten Ormocer die niedrigsten R_a -Werte aufwies im Vergleich zu den anderen untersuchten Materialien. Die nächst größeren Werte wurden bei der röntgenopaken Version von *Filtec Supreme* gemessen, sodass insgesamt

Filtec Supreme und das Ormocer glattere Oberflächen nach Ausarbeitung und Politur hinterließen als alle weiteren Restaurationsmaterialien [Yap et al., 2004b]. Weiterhin wurden in dieser Studie die R_a -Werte nach bloßem Aushärten gegen eine Kunststoffmatrize gemessen, wobei beide Versionen des *Filtec Supreme* schlechter abschnitten als alle anderen Produkte. Nach Yap et al. (2004b) können diese Unterschieden zwischen den verschiedenen Werkstoffen nach Aushärtung gegen die Matrize möglicherweise den Materialeigenschaften der Komposite zugeschrieben werden, wie z.B. Füller- oder Glaspartikelgrößen, sowie ihrer Fähigkeit, eine homogene polymerreiche Schicht beim Aushärten gegen diese Matrize auszubilden. Da eine Ausarbeitung von Kompositfüllungen jedoch obligatorisch ist, wird diesem Ergebnis hier keine besondere Aufmerksamkeit geschenkt.

Nach vergleichbarer Vorbereitung der Kompositproben, nämlich Sandpapier (320 Grit) und *Sof-Lex* Scheiben, bestimmten Silikas et al. (2005) bei drei Mikrofüllerkompositen und einer röntgenopaken Farbe von *Filtec Supreme* u.a. die Rauheitsparameter arithmetischer Mittenrauhwert R_a und gemittelte Rauhtiefe R_z (vgl. Kapitel 2.2.6.1). Bei beiden Parametern lieferte eines der Mikrofüllerkomposite kleinere, die beiden anderen größere Werte als *Filtec Supreme*. Damit lassen sich bei dieser Studie keine signifikanten Vorteile des Nanofüllerkomposites gegenüber den verglichenen Mikrofüllerkompositen verzeichnen.

Baseren (2004) beschäftigte sich in seiner Untersuchung neben einem Ormocer mit zwei verschiedenen Nanokompositen in röntgenopaken Farben, einem Nanohybridkomposit (Grandio, Voco, Cuxhaven) und dem Nanofüllerkomposit *Filtec Supreme*. Nach Ausarbeitung und Politur der hergestellten Prüfkörper mit verschiedenen Verfahren, wobei Hartmetall- bzw. Diamantfinierer mit Silikonpolierern und Bürste bzw. beschichteten Scheiben kombiniert wurden, ergaben sich keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen den drei Materialien. Verglichen wurden hierfür die R_a -Werte der verschiedenen Komposite. Zusätzlich ergaben sich nach bloßem Aushärten gegen eine Kunststoffmatrize bei den beiden Nanokompositen glattere Oberflächen als bei dem Ormocer [Baseren, 2004], anders als bei der erwähnten Studie von Yap et al. (2004b).

Eine Studie von Yap et al. (2004a) hatte die Verschleißfestigkeit neuerer Kompositmaterialien als Thema, nämlich *Filtec Supreme* im Vergleich zu einem Ormocer, einem Polyglas sowie Mini- und Mikrofüllerkompositen. Die Autoren kamen hierbei zu dem Ergebnis, dass die Verschleißfestigkeit der Ormocere und Nanofüllerkomposite

vergleichbar oder leicht größer war als die der Polygläser, Mikro- und Minifüllerkomposite.

Eine weitere Untersuchung beschäftigte sich sowohl mit einer röntgenopaken als auch mit einer transluzenten Farbe von *Filtec Supreme* im Vergleich zu verschiedenen Mikrofüller-, Hybrid- und Feinpartikelhybridkompositen [3M ESPE, 2002b]. Statt der sonst häufig gemessenen Oberflächenrauigkeiten ging es in der Untersuchung von 3M ESPE u.a. um Volumenschrumpfung, Bruch-, Biege-, Druckfestigkeit und Elastizitätsmodul. In Bezug auf die Schrumpfung zeigte *Filtec Supreme* geringere Werte als Hybrid- und Feinpartikelhybridkomposite sowie vergleichbare Werte wie durchschnittliche Mikrofüllerkomposite. Sowohl bei Bestimmung der Bruchfestigkeit als auch des Elastizitätsmodules schnitt *Filtec Supreme* erheblich besser ab als alle untersuchten Mikrofüllerkomposite, dabei vergleichbar den Hybrid- und Feinpartikelhybridkompositen. Betrachtet man die Biegefestigkeit, so liefert *Filtec Supreme* bessere Ergebnisse als alle gewählten Komposite. Bei der Druckfestigkeit wiesen alle vorkommenden Werkstoffgruppen ähnliche Werte auf.

Speziell auf die zwei Varianten von *Filtec Supreme* bezogen lieferte die röntgenopake Farbe bei Bestimmung von Volumenschrumpfung, Bruchfestigkeit und Elastizitätsmodul bessere Ergebnisse, bei Biege- und Druckfestigkeit jedoch schlechtere im Vergleich zu der transluzenten Farbe [3M ESPE, 2002b]. Laut Yap et al. (2004b) besteht der Unterschied zwischen den beiden Varianten von *Filtec Supreme* in der zugrunde liegenden Technologie. Während es bei den transluzenten Farben die Nanomer-Technologie ist, ist es bei den röntgenopaken die Nanocluster-Technologie.

2.2.5 Ausarbeitung und Politur von Kompositfüllungen

2.2.5.1 Die Notwendigkeit des Ausarbeitens und Polierens von Kompositfüllungen

Nach dem Legen einer Füllung können aufgrund von Überschussbeseitigung, Konturieren oder Wiederherstellung der ursprünglichen antagonistischen Kontaktsituation raue Oberflächen zurückbleiben. An solch rauhen Oberflächen ist die Anlagerung von Bakterien und Speiseresten [Jung und Borchers, 1996] und so die Plaqueretention wesentlich höher als an glatt ausgearbeiteten Oberflächen [Kawai und Urano, 2001; Morgan, 2004; Weitman und Eames, 1975]. Eine primäre Forderung ist es daher, eine möglichst homogene und glatte Gestaltung der Oberfläche mittels geeigneter

Ausarbeitungs- sowie Polierinstrumente zu erzielen [Herrgott et al., 1989; Roeder et al., 2000]. Je besser nämlich die Oberflächenbeschaffenheit einer Füllung, desto geringer ist die Gefahr des Auftretens sekundärer Schäden wie Karies, Parodontopathien und Materialverfärbungen [Tjan und Clayton, 1989], welche auch zu einer Beeinträchtigung der Ästhetik führen können. Um Parodontopathien zu vermeiden, sind glatte Oberflächen nicht nur bei Kavitäten im Zahnhalsbereich sondern grundsätzlich anzustreben [Nadarajah, 1997]. Zudem sind Materialverfärbungen bei glatten Füllungen deutlich seltener festzustellen als bei rauhen, was auf der Oberflächenvergütung beruht, welche mit Hilfe des Ausarbeitens erreicht wird [Cooley et al., 1987]. Um diesen sekundären Schäden infolge verstärkter Plaquebesiedelung vorbeugen zu können, müssen Füllungen nach dem Legen mittels geeigneter Maßnahmen ausgearbeitet werden. Einen weiteren Grund für die Notwendigkeit einer Bearbeitung stellt in der Praxis die häufige Schwierigkeit eines überschussfreien Adaptierens der Restauration dar. Nicht zuletzt werden durch das Ausarbeiten und Polieren werkstoffkundliche Eigenschaften des Füllungsmaterials verbessert. Glatt polierte Kompositoberflächen weisen eine größere Härte und höhere Verschleißfestigkeit auf als unpolierte, was mit der obersten sauerstoffinhibierten, füllstoffarmen und damit wenig abrasionsbeständigen Schicht einer unbearbeiteten Kompositfüllung zu begründen ist [Collard et al., 1991; Ferreira, 2004]. Folglich können polierte Füllungen sowohl mechanischen als auch chemischen Einflüssen besser standhalten.

Um dies zu gewährleisten, ist neben einer richtigen, materialspezifischen Verarbeitung eine sich anschließende korrekte Bearbeitung des Kompositmaterialies obligatorisch. Krejci und Lutz (1984) stellten schon vor mehr als 20 Jahren umfangreiche Überlegungen zur Vorgehensweise bei der Kompositausarbeitung in der Praxis an. Danach lässt sich das Ausarbeiten einer Kompositfüllung in drei Schritte gliedern, nämlich in Grobausarbeiten, Feinausarbeiten und Polieren. Der erste Schritt zielt auf das Entfernen von Überschüssen und der obersten füllstoffarmen Kompositenschicht ab. Bei der Feinausarbeitung, welche sich in Konturieren und Finieren unterteilen lässt, werden zuerst Formkorrekturen vorgenommen, sodass die Morphologie des Zahnes wiederhergestellt und die Füllung okklusal adjustiert ist. Anschließend wird die Oberfläche mittels geeigneter Finierinstrumente vorbereitend geglättet und Füllungsråder definitiv ausgearbeitet. Letztendlich werden durch das Polieren die verbliebenen Rauigkeiten eingeebnet und so eine homogen erscheinende, ästhetisch glänzende Oberfläche geschaffen [Krejci und Lutz,

1984]. In der vorliegenden Studie werden mit dem Begriff der „Ausarbeitung“ die Schritte Grob- und Feinausarbeitung bezeichnet, an welche sich die Politur anschließt.

2.2.5.2 *Instrumente für die Ausarbeitung und Politur von Kompositfüllungen*

Abhängig vom jeweiligen Komposittyp und von der Art der zu bearbeitenden Fläche sind speziell darauf abgestimmte Schleif- und Polierkörper erforderlich. Die dadurch entstandene Vielzahl unterschiedlicher rotierender Instrumente umfasst für die Grob- und Feinausarbeitung der Komposite Hartmetallfinierer mit unterschiedlichen Schneidenzahlen, diamantierte Instrumente und beschichtete Scheiben in verschiedenen Körnungen sowie rotierende Steine.

Allen Komposittypen ist gemeinsam, dass auf konvexen oder planen Oberflächen mittels Aluminiumoxid-beschichteter Scheiben gute Glättungseffekte nachgewiesen werden konnten [Baseren, 2004; Berastegui et al., 1992; Herrgott et al., 1989; Hoelscher et al., 1998; Jung, 1997; Jung, 2002; Jung et al., 2003a; Jung et al., 2003b; Mitchell et al., 2002; Ozgunaltay et al., 2003; Pratten und Johnson, 1988; Roeder et al., 2000; Tjan und Clayton, 1989]. Ein Grund hierfür ist die Härte der Al_2O_3 -Partikel, welche größer ist als die der Kompositfüllpartikel. Daher können mit solchen Scheiben sowohl die weiche Matrix als auch die harten Füllpartikel gleichmäßig abgetragen werden, was zu qualitativ hochwertigen Oberflächen führt [Roeder et al., 2000; Tjan und Clayton, 1989]. Um dies zu erreichen, werden beschichtete Scheiben in einer bestimmten Bearbeitungsfolge verwendet, beginnend mit einer gröberen und endend mit einer sehr feinen Körnung. Verändert man diese Reihenfolge, so verbleibt die Oberfläche deutlich rauher [Kanter et al., 1983]. Aufgrund des guten Glättungseffektes haben sich flexible Disks als klinischer Standard bei konvexen und planen Flächen etabliert. Mittlerweile werden verschiedene Disk-Systeme angeboten. Neben Aluminiumoxid-beschichteten sind Silikon-Carbid-beschichtete Scheiben weit verbreitet bei der Ausarbeitung und Politur von Kompositoberflächen [Jefferies, 1998]. Dennoch sind es speziell Al_2O_3 -beschichtete *Sof-Lex* Scheiben, welche Gegenstand einer Vielzahl von Studien sind. Mit flexiblen Disks lassen sich sowohl die Arbeitsgänge der Ausarbeitung als auch die Politur erreichen. Dabei ist es umstritten, ob nach Anwendung der feinsten flexiblen Scheibe noch eine weitere Verbesserung der Oberflächenqualität möglich ist. Die Mehrzahl an Autoren erachtet hierbei ein zusätzliches Politurverfahren nicht als sinnvoll [Chen et al., 1988; Eide und Tveit, 1988; Tate und Powers, 1996; Tjan und Clayton]. Lediglich Turssi et al. (2000) kamen zu dem Schluss, dass Kompositoberflächen nach Bearbeitung mit *Sof-Lex* Scheiben

sowie Polierpaste glattere Oberflächen aufwiesen als solche, die ausschließlich mit *Sof-Lex* Scheiben konturiert und poliert wurden.

Ein Nachteil speziell der *Sof-Lex* Disks stellt deren zentraler Metallring dar, mit welchem bei der Bearbeitung die Oberfläche verletzt werden kann [Eide und Tveit, 1988]. Mittlerweile sind jedoch auch Disks mit Kunststoffring verfügbar.

Zur Bearbeitung von strukturierten Oberflächen oder in gingivanahen Randbereichen sind flexible Scheiben nicht geeignet [Chen et al., 1988; Krejci und Lutz, 1984; Tate et al., 1992; Tjan und Clayton, 1989]. Hier werden zum Grob- und Feinausarbeiten starre rotierende Instrumente benötigt [Krejci und Lutz, 1984], wobei Diamantfinierer mit verschiedenartigen Körnungen [Lutz et al., 1983] sowie Hartmetallfinierer mit unterschiedlicher Anzahl und Verlauf der Schneiden empfohlen werden [Jefferies, 1998]. Abhängig von den jeweils enthaltenen Füllkörpern der Komposite sind es unterschiedliche Ausarbeitungsinstrumente, die sich besonders eignen. So scheinen bei konventionellen Kompositen Hartmetallfinierer die Ausarbeitungsinstrumente der Wahl zu sein [Hannah und Smith, 1973; Krejci und Lutz, 1984], wobei früher vereinzelt auch rotierende Steine für diesen Komposittyp empfohlen wurden [Warren und Clark, 1985].

Mikrofüllerkomposite werden dagegen am besten mit Diamantfinierern ausgearbeitet [Boghossian et al., 1987; Lopes et al., 2002; Warren und Clark, 1985]. Krejci und Lutz (1984) empfehlen bei Mikrofüller- sowie Hybridkompositen zusätzlich zu einer hohtourigen, wassergekühlten Grobausarbeitung mit Diamantfinierern ein trockenes Feinausarbeiten mit Hartmetallfinierern bei beliebiger Drehzahl.

Bei Hybridkompositen werden, was die Ausarbeitung angeht, verschiedene Meinungen vertreten. Zum einen sind es Hartmetallfinierer, welche hierfür empfohlen werden [Berastegui et al., 1992; Boghossian et al., 1987; Jung, 1994; Jung, 1997; Jung, 2002], zum anderen Diamantfinierer [Krejci und Lutz, 1984]. Nicht zuletzt ist die Kombinationen beider Finierertypen zu erwähnen, welche gute Ergebnisse liefern soll [Herrgott et al., 1989; Jung, 1997; Jung, 1998; Kaplan et al., 1996].

Unabhängig vom jeweiligen Komposittyp hinterließen Hartmetallfinierer in mehreren Studien glattere Oberflächen [Jung, 1994; Jung, 1997; Jung et al., 1997; Jung et al., 2003b; Roeder et al., 2000], vereinzelt jedoch auch rauhere Oberflächen im Vergleich zu Diamantfinierern [Boghossian et al., 1987; Brackett et al., 1997; Herrgott et al., 1989; Lutz et al., 1983]. Bei weiteren Untersuchungen fielen keine Unterschiede im Hinblick auf die

Rauhigkeit zwischen Diamant- und Hartmetallfinierern auf [Krejci und Lutz, 1984; Lutz et al., 1983].

Hartmetallfinierer weisen eine signifikant kleinere Abtragsleistung im Vergleich zu Diamantfinierern auf [Jung, 1997] und haben aufgrund der schnelleren Abnutzung eine kürzere Standzeit [Kullmann, 1985]. Große Oberflächenrauigkeiten nach Anwendung von Diamantfinierern werden oft als Nachteil dieser Instrumente angesehen [Jung, 1997; Jung et al., 1997; Jung et al., 2003b; Kullmann, 1985]. Herrgott et al. (1989) stellten weiterhin fest, dass speziell Diamantfinierer neben dem Füllungsmaterial auch angrenzende Zahnschubstanz abtragen und somit verletzen können. Deshalb verwiesen mehrere Autoren beim Konturieren auf Diamantfinierer und beim anschließenden Finieren und Feinausarbeiten auf Hartmetallfinierer [Herrgott et al., 1989; Jung, 1997; Krejci und Lutz, 1984]. Andere Autoren machten in Bezug auf Zahnschubstanzabtrag in füllungsangrenzenden Bereichen keinen Unterschied zwischen Diamant- und Hartmetallfinierern [Mitchell et al., 2002]. Bei Diamantfinierern wurden weniger Randfrakturen sowie Oberflächendefekte der ausgearbeiteten Kompositfüllungen im Vergleich zu Hartmetallfinierern und rotierenden Steinen beobachtet, weshalb mehrere Autoren für alle Komposittypen diamantierte Instrumente empfehlen [Joniot et al., 2000; Kaplan et al., 1996; Krejci und Lutz, 1984].

Rotierende Steine werden heute zum Ausarbeiten von Kompositen nicht mehr verwendet. Dies liegt an Oberflächendefekten aufgrund frakturierter und zum Teil herausgeschlagener Füllstoffe nach Anwendung von Steinen, welche zu besonders großen Rauhtiefen im Vergleich zu anderen rotierenden Instrumenten führten [Eide und Tveit, 1988; Krejci und Lutz, 1984; Yap et al., 1997]. Ausarbeitungssteine zeigen nämlich schon nach kurzem Gebrauch keinen perfekten Rundlauf mehr und wirken durch diese Exzentrizität wie Schlagwerke [Krejci und Lutz, 1984].

Zum Polieren strukturierter Kompositoberflächen sind ganz verschiedenartige rotierende Instrumenten angezeigt, welche in unterschiedlichen Größen, Formen, Körnungen und Stärken erhältlich sind und auf verschiedenen Funktionsprinzipien beruhen. Unter ihnen sind mit Abrasivpartikeln unterschiedlicher Körnung imprägnierte Gummi- oder Silikon-Polierer [Baseren, 2004; Eide und Tveit, 1988; Herrgott et al., 1989; Jung et al., 2003a; Jung et al., 2004; Jung et al., 2005; Tjan und Clayton, 1989], diamantimprägnierte Filzpolierer [Jung et al., 1997; Jung et al., 2003a; Jung et al., 2004; Jung et al., 2005],

Polierbürsten mit in die Bürstenfilamente eingearbeiteten Polierkörpern [Baseren, 2004; Jung et al., 2005] sowie Polierpasten auf Diamant- oder Aluminiumoxidbasis [Eide und Tveit, 1988; Herrgott et al., 1989; Jung et al., 2004; Jung et al., 2005; Kaplan et al., 1996; Tate und Powers, 1996; Tjan und Clayton, 1989] weit verbreitet.

Es fällt auf, dass verschiedene Studien zur Ausarbeitung von Kompositoberflächen teilweise voneinander abweichende Resultate liefern. Diese beruhen möglicherweise auf unterschiedlichen Materialeigenschaften der verwendeten Composite, der Vielzahl der auf dem Markt befindlichen Schleif- und Polierkörper und nicht normierten Ausarbeitungs- und Untersuchungsbedingungen.

2.2.6 Methoden zur Oberflächenevaluierung in der Zahnheilkunde

Mittlerweile sind viele verschiedene Verfahren entwickelt worden, um Oberflächen im Hinblick auf ihre Rauigkeit zu charakterisieren. Diese Verfahren lassen sich in zwei Gruppen einteilen, die quantitativen und die qualitativen Methoden. Quantitative Verfahren liefern Zahlenwerte, die sich aus dem Vermessen von Profilunregelmäßigkeiten ergeben, qualitative Verfahren gestatten deren Interpretation.

2.2.6.1 *Quantitative Methoden*

An dieser Stelle sei zuerst die Abtastung von Oberflächen nach dem elektrischen Tastschnittverfahren zu nennen, die sog. Profilometrie [Deutsche Normen, 1995]. Man findet es - mittlerweile auf einem sehr hohen Stand der Technik angekommen - in Messlaboren weltweit [Brodmann, 1984], was zeigt, dass dieses Verfahren nicht nur auf den Einsatz in der Zahnheilkunde beschränkt ist. Die Profilometrie erweist sich als das am häufigsten in der Zahnheilkunde eingesetzte quantitative Verfahren zur Oberflächenevaluierung. Das Ergebnis solch eines Tastschnittverfahrens ist die graphische Darstellung des Oberflächenprofils einer zu untersuchenden Probe und zusätzlich die Ermittlung von Oberflächenkenngrößen. Um diese Ergebnisse zu erhalten, sind neben einem Taster ein Vorschubgerät und eine zentrale Auswerteeinheit nötig. Zeilenweise und mit konstanter Geschwindigkeit führt das Vorschubgerät den Mikrotaster über die zu untersuchende Oberfläche, wobei das Vorschubgerät die horizontale und der Mikrotaster die vertikale Komponente des Profils erfasst. Der Mikrotaster, welcher als induktiver Messwertaufnehmer fungiert, registriert die Profilunregelmäßigkeiten auf der Taststrecke

und wandelt das Profil in elektrische Signale um. Diese werden in der Folge verstärkt, gefiltert und schließlich für die graphische Darstellung des Oberflächenprofils und die Berechnung charakteristischer Oberflächenparameter aufgearbeitet.

Der Mikrotaster kann ein mechanischer oder ein optischer sein [Sander, 1991]. Mechanische Mikrotaster bestehen aus je einer kegelförmigen Diamantnadel, welche sich durch verschiedene Kegelwinkeln und Spitzenradien unterscheiden. Letztere betragen meist zwischen 2,5 und 10 μm . Beim Abtasten kommt es zu einem direkten Kontakt zwischen Taster und Probenoberfläche. Der Mikrotaster wird mit einer Kraft von ca. 0,8 N entlang einer Linie über die Oberfläche geführt, nimmt so die Unebenheiten dieser direkt auf und leitet sie als elektrisches Signal weiter.

Der Durchmesser des Laserbündels bei optischen Mikrotastern ist mit ca. 1 μm [Feinprüf, 1989a] um einiges kleiner als der des typischen mechanischen Tasters. Die optische Profilometrie arbeitet mit einem Laserstrahl, welcher die Taststrecke ebenfalls zeilenweise abfährt und dabei kleinste Vertiefungen aufspürt, in die ein mechanischer Taster aufgrund der Größe des Prüfkegels nicht vordringen kann [Wassell et al., 1994]. Daher ist es der optischen Profilometrie im Gegensatz zur mechanischen vorbehalten, Oberflächen noch präziser zu studieren. Der Laserstrahl steht in keinem mechanischen Kontakt zur Probe und ermöglicht so ein zerstörungsfreies Abtasten derselben. Hierin liegt ein Unterschied zur mechanischen Profilometrie, insbesondere beim Abtasten elastischer oder weicher Materialien. Aufgrund der Kraft, mit der der mechanische Taster über die Oberfläche geführt wird, kann es zu irreversiblen Verformungen der Probe kommen, was mit einem Verlust an Genauigkeit der Oberflächenparameter einhergeht [Brodmann, 1984]. Mechanische Taster hinterließen nach einmaligem Abtasten deutlich erkennbare Beschädigungen auf den Oberflächen von Hybridkompositen, während bei keramischen Oberflächen keinerlei Tastspuren nachweisbar waren [Jung, 1998].

Da bei der Profilometrie Mikrotaster zeilenweise über die Oberfläche geführt werden, kann jeweils nur eine Strecke, jedoch keine komplette Fläche erfasst werden. Es besteht die Möglichkeit, sich einer flächenhaften Darstellung anzunähern, indem man die Fläche in mehrere parallele Taststrecken unterteilt, diese einzeln auswertet und die Ergebnisse miteinander vergleicht.

Die Charakterisierung der Rauigkeiten erfolgt anhand definierter Oberflächenparameter wie z.B. arithmetischer Mittenrauhwert R_a und Profillängenverhältnis LR. Sie stellen ein

objektives Mittel zur Oberflächenevaluierung dar und erlauben zudem einen Vergleich der Ergebnisse verschiedener Autoren bei Übereinstimmung der Parameter.

Der arithmetische Mittenrauhwert R_a stellt innerhalb der Messstrecke den arithmetischen Mittelwert der absoluten Werte der Profilabweichungen dar [Deutsche Normen, 1995].

Definitionsgemäß ist die gemittelte Rauhtiefe R_z das arithmetische Mittel aus den Einzelrauhtiefen Z_i fünf aneinandergrenzender Einzelmessstrecken [Deutsche Normen, 1995]. Dabei gibt die Einzelrauhtiefe Z_i den Abstand zweier Parallelen zur mittleren Linie an, die innerhalb der Einzelmessstrecke das Rauheitsprofil am höchsten bzw. am tiefsten Punkt berühren. Eine Einzelmessstrecke beträgt ein Fünftel der Gesamtmessstrecke wie beschrieben in der DIN-Norm 4768/1 [Deutsche Normen, 1995].

Weiterhin wird häufig die maximale Rauhtiefe R_{max} bestimmt, die nach Definition die größte der auf der gesamten Messstrecke vorkommenden Einzelrauhtiefen ist [Deutsche Normen, 1995].

In vielen Studien zum Thema Oberflächenrauigkeit wird allein der Mittenrauhwert R_a zur quantitativen Beurteilung herangezogen. Sowohl Barthenstein und Finger (1974) als auch Venz (1983) gaben in ihren Untersuchungen zur Bestimmung der Oberflächengüte von Kompositen der mittleren Rauigkeit R_a gegenüber der maximalen Rauigkeit R_{max} den Vorzug, da R_{max} zu empfindlich auf einzelne, nicht charakteristische Vertiefungen oder Erhöhungen innerhalb der Taststrecke reagiert.

Die genannten Parameter R_a , R_z und R_{max} sind Vertikalparameter. Sie charakterisieren eine Oberfläche durch ihre Profilamplitude. Mit ihnen alleine sind keine Aussagen über die Gestalt einer Oberfläche möglich. Um dies zu gewährleisten, wird das Profillängenverhältnis LR häufig als ein zusätzlicher Parameter genutzt. LR ist nach DIN-Norm 4762/1 definiert als das Verhältnis zwischen der gestreckten Profillänge und der Länge der Messstrecke [Deutsche Normen, 1996]. Unter gestreckter Profillänge versteht man dabei die Länge des vorher unebenen Profils, nachdem es zu einer ebenen Linie ausgezogen wurde [Deutsche Normen, 1996]. LR ist eine dimensionslose Größe. Eine ideal glatte Oberfläche hätte ein Profillängenverhältnis von $LR = 1$, da hier die gestreckte Profillänge und die Länge der Messstrecke gleich sind. Je größer jedoch die Anzahl oder die Ausprägung der Profilverläufe, desto größer wird die Länge des gestreckten Profils und damit auch LR . Somit sind anhand der Größe des LR -Wertes Aussagen über die Gestaltung der jeweiligen Oberfläche möglich.

Um eine umfassende Beschreibung von Oberflächen zu ermöglichen, führten Rabe und Pantke (1982) den Parameter Zerklüftung ein. Die Zerklüftung stellt das Produkt der

mittleren Rauhtiefe und der Profilunregelmäßigkeitsdichte dar, wobei die Autoren unter letztgenanntem die Anzahl der Profilerhebungen pro Einheitslänge verstehen.

Whitehead et al. (1999) favorisieren die Glättungstiefe R_{pm} sowie das Verhältnis von Glättungstiefe und gemittelter Rauhtiefe, da beide verlässliche Informationen zur Profilform liefern. R_{pm} stellt dabei den Mittelwert der Glättungstiefen fünf aneinandergrenzender Einzelmessstrecken dar. Kleine R_{pm} -Werte sind charakteristisch für Oberflächen, welche hauptsächlich breite Profilkuppen sowie enge Profiltäler aufweisen, während große R_{pm} -Werte auf ein spitzes, scharfgratiges Profil hinweisen. Das Verhältnis $R_{pm} : R_z$ lässt Differenzierungen in eckige und runde Profilformen zu. So deutet ein Verhältnis $R_{pm} : R_z$ größer als 0,5 auf ein scharfgratiges Profil hin, ein solches kleiner als 0,5 dagegen auf eines mit abgerundeten Profilkuppen [Whitehead et al., 1999].

Neben der mechanischen Profilometrie stellt die Lichtreflexionsmessung eine weitere quantitative Methode zur Evaluierung von Oberflächen dar. Auf die zu beurteilende Oberfläche trifft dabei senkrecht ein Lichtstrahl, welcher reflektiert und in Abhängigkeit von der Oberflächengestaltung der Probe dabei mehr oder weniger gestreut wird [Brodmann, 1984]. Das reflektierte Licht wird von einem eingebauten Photodetektor gemessen [Whitehead et al., 1995]. Auf einer glatten Oberfläche wird ein einfallender Strahl weniger gestreut als auf einer rauhen. Bei ideal glatten Oberflächen sind Einfallswinkel und Ausfallswinkel und so auch die Intensitäten des einfallenden und ausfallenden Lichtes gleich groß. So lassen sich anhand Intensitätsabschwächungen und voneinander abweichenden Ein- und Ausfallswinkeln Rückschlüsse auf die Rauhtiefe der Oberfläche ziehen [Haywood et al., 1988]. Als vorteilhaft sind die flächenmäßige Erfassung der zu bewertenden Oberfläche [Robert, 1989], die kurze Messdauer (kürzer als 50 ms) und die berührungslose und justierungempfindliche Arbeitsweise hervorzuheben [Brodmann, 1984]. Nachteile liegen in der Unmöglichkeit, tatsächliche Rauhtiefen anzugeben sowie Aussagen über die Gestalt der Oberfläche zu machen [Robert, 1989].

Die Methode der Lichtreflexionsmessung wird in der Zahnheilkunde häufig eingesetzt, wenn die Beschaffenheit von Zahnschmelz, metallischen oder keramischen Oberflächen untersucht werden soll [Whitehead et al., 1995]. Ohne weitere Analysen ist diese Methode jedoch nicht sehr aussagekräftig [Chen et al., 1988].

2.2.6.2 *Qualitative Methoden*

Unter dem Begriff „Qualitative Methoden“ werden verschiedene mikroskopische Verfahren subsummiert. Neben den konventionellen Untersuchungsmöglichkeiten, die das Lichtmikroskop zur qualitativen Beurteilung von Oberflächenbeschaffenheiten anbietet, ist das Rasterelektronenmikroskop als weiterer Mikroskoptyp in diesem Zusammenhang von großer Bedeutung.

Das Prinzip der Bildentstehung bei einem Rasterelektronenmikroskop gleicht dem der Lichtmikroskopie, wobei die Lichtquelle hier durch einen Elektronenkanone ersetzt wird und statt der Linsen des Kondensors und Objektivs Spulen zum Einsatz kommen, welche den Elektronenstrahl durch ein starkes Magnetfeld bündeln und fokussieren [Martin und Loaëc, 2003]. Im Mikroskoptubus muss Hochvakuum herrschen, da Elektronen von den Molekülen der Gase in der Luft aufgehalten werden.

Mit einem Rasterelektronenmikroskop (REM) erhält man Bilder mit sehr hoher Auflösung [Lange und Blödorn, 1981] von dreidimensionalen Präparaten, welche von einem feinen Bündel beschleunigter Elektronen (Primärelektronen) zeilenförmig abgetastet werden [Martin und Loaëc, 2003]. Die von dem Objekt reflektierten und von einem Detektor erfassten Sekundärelektronen sind für jede Objektstelle einmalig und typisch. Die Grundlage der Bilderzeugung stellt zum einen eine Amplitudenkomponente des abtastenden Elektronenstrahls dar, zum anderen sorgt eine Zeitfunktion für die korrekte Darstellung [Ohnsorge et al., 1987]. Ein Detektor und zwischengeschaltete Übertragungsglieder übersetzen die momentane Wechselwirkung zwischen Elektronenstrahl und bestrahlter Objektstelle in die Amplitude des Videosignals. Das Objekt wird zeilenförmig abgetastet und ein Bild zeitsequentiell und zeilenweise auf dem Monitor aufgebaut.

Ein großer Vorteil des REM ist die Gewährleistung einer dreidimensionalen Vorstellung des Untersuchungsobjektes. So lässt sich bei der rasterelektronenmikroskopischen Untersuchung leicht die dritte Dimension in einem zweidimensionalen Bild darstellen. Die verbesserte Auflösung, die größere Tiefenschärfe [Lange und Blödorn, 1981] und die Ermöglichung einer plastischen Objektivwiedergabe bzw. die Erzeugung eines räumlichen Eindrucks stellen die Vorteile des Rasterelektronenmikroskops gegenüber der Lichtmikroskopie dar. Nachteile liegen in der fehlenden Quantifizierbarkeit der Ergebnisse. So dienen REM-Bilder in der Zahnheilkunde vorrangig der rein qualitativen Oberflächenevaluierung. Anhand der Bilder kann dennoch versucht werden, Abschätzungen von Rauheitswerten vorzunehmen, wie bei Gilde et al. (1984) zu finden,

sodass es sich damit bei der Rasterelektronenmikroskopie auch um eine semi-quantitative Methode handeln kann. Die hierdurch erhaltenen Aussagen über die Ausprägung von Rauigkeiten sind jedoch lediglich Näherungswerte und sind abhängig von mehreren Faktoren, so z.B. von dem Neigungswinkel der Probe unter dem Mikroskop, den gewählten Einstellungen am REM wie z.B. Rasterzeit und Kontrast, aber auch der Probengeometrie [Blödorn und Syed-Ali, 1987; Goldstein und Waknine, 1989; Lange und Blödorn, 1981]. Diese Vielzahl von beeinflussenden Faktoren macht deutlich, dass sich das Abschätzen von Rauigkeitswerten als sehr schwierig erweist und damit im REM vertikale Dimensionen nicht wahrheitsgetreu dargestellt werden können.

Zusammengefasst ist eine Beurteilungen der Rauigkeit mit qualitativen Methoden nur annäherungsweise möglich. Sie eignen sich deshalb zur unterstützenden Interpretation von Messwerten, welche man mit Hilfe quantitativer Verfahren erhält [Pantke et al., 1985]. Anhand qualitativer Verfahren können z.B. Differenzierungen zwischen werkstoffbedingten und durch rotierende Bearbeitung hervorgerufenen Oberflächenrauigkeiten erfolgen, welche nur durch Vergleich der Rauigkeitswerte nicht voneinander zu unterscheiden sind. Daher ist es ratsam, zur exakten Oberflächenevaluierung qualitative und quantitative Methoden zu kombinieren [Pantke et al., 1985; Whitehead et al., 1995]. In der vorliegenden sowie in zahlreichen anderen Studien sind dies Profilometrie und REM [Herrgott et al., 1989; Jung, 1997; Jung, 2002; Jung et al., 1997; Jung et al., 2003a; Jung et al., 2003b, Jung et al., 2005; Kaplan et al., 1996; Krejci und Lutz, 1984; Ozgunaltay et al., 2003; Pratten und Johnson, 1988; Roeder et al., 2000; Tate und Powers, 1996].

2.2.6.3 Referenzwerte für Oberflächenrauigkeiten

Beim Aushärten von Kompositen gegen eine flexible Kunststoffmatrize bzw. Polyesterstreifen entstehen extrem glatte Oberflächen, welche durch eine Politur nicht mehr zu verbessern sind [Baseren, 2004; Bauer und Caputo, 1983; Hoelscher et al., 1998; Hondrum und Fernández, 1997; Kaplan et al., 1996; Krejci und Lutz, 1984; Roeder et al., 2000, Yap et al., 1997]. Dennoch ist nach dem Aushärten eine Bearbeitung dieser glatten Kompositoberflächen obligatorisch, um die oberste füllstoffarme und damit wenig abrasionsfeste [Collard et al., 1991; Ferreira, 2004] und nicht ausreichend mundbeständige Schicht [Krejci und Lutz, 1984] zu entfernen. Andererseits ist es fast immer notwendig, die Füllung im Okklusalbereich zu adjustieren, wodurch sie angeraut wird, wie oben bereits

erwähnt. Dennoch wurde in manchen Studien die Oberflächenrauigkeit nach Aushärten des Komposites gegen eine flexible Kunststoffmatrize gemessen, um anhand dieser perfekt glatten Fläche einen Referenzwert zu erhalten.

Neben diesem Referenzwert, den man mit Hilfe einer Kunststoffmatrize erhält, gibt es weitere Ansätze zur Einordnung und Bewertung der Polierergebnisse von dentalen Restaurationsmaterialien. Mit der Absicht, einen standardisierten Vergleichswert für Oberflächencharakteristiken speziell von Kompositmaterialien zu liefern, bestimmte eine Autorengruppe die Oberflächenrauigkeit von menschlichem Zahnschmelz ($R_a = 0,64 \pm 0,25 \mu\text{m}$) [Willems et al., 1991]. Sie forderten daraufhin bei Werkstoffoberflächen, welche in antagonistischem Kontakt zu natürlichem Zahnschmelz stehen könnten, mindestens ein R_a -Wert von $0,64 \mu\text{m}$, um so den Abrieb am Schmelzantagonisten zu minimieren.

Einen weiteren Ansatz zur Beurteilung der verbleibenden Rauigkeit eines dentalen Restaurationsmaterials nach der Politur liefern Bollen et al. (1997). Diese stellten die Oberflächenrauigkeiten von Zahnhartsubstanzen sowie verschiedenen Restaurationsmaterialien zusammen und verglichen deren Plaqueakkumulation. So kamen sie zu dem Schluss, dass ein Grenzwert der Oberflächenrauigkeit von $R_a = 0,2 \mu\text{m}$ existiert, dessen Unterschreitung keinen weiteren hemmenden Einfluss auf die Plaquebildung zur Folge hätte. Ein Anstieg der Rauigkeiten über diesen Schwellenwert hingegen führe gleichzeitig zur Zunahme der Plaqueretention, in Folge derer es zu einer erhöhten Gefahr des Auftretens von Gingivitiden sowie Sekundärkaries kommen könne. Daraus ergibt sich die Forderung, dass Füllungswerkstoffe diesen Grenzwert nach abschließender Politur unterschreiten sollten, um unerwünschte sekundäre Schäden zu vermeiden.

Anderer Ansicht sind Shintani et al. (1985) im Hinblick auf einen Grenzwert der Oberflächenrauigkeit. Aufgrund der durchschnittlichen Bakteriengröße von $1 \mu\text{m}$ fordern sie lediglich Rauigkeiten von weniger als $1 \mu\text{m}$, da unterhalb dieser Rauigkeit keine weitere Reduktion der Bakterienadhäsion erwartet werden könne. Diesen Wert zu unterschreiten gilt es ebenfalls im Hinblick auf das optische Erscheinungsbild, da Oberflächen erst mit Rauigkeiten unter $1 \mu\text{m}$ optisch-visuell glatt erscheinen [Chung, 1994].

Einen anderen Ansatz liefert eine Studie von Jones et al. (2004), welche sich mit der Wahrnehmung von Rauigkeiten von Restaurationen in vivo befasst. Die Autoren fanden heraus, dass mit der Zunge Oberflächen als rau charakterisiert werden, sobald eine

maximale Rauhtiefe von 0,5 μm überschritten wird. Daher forderten Jones et al. für die abschließende Politur, diese Schwelle der menschlichen Wahrnehmung zu unterschreiten.

3 Material und Methode

3.1 Wahl und Zusammensetzung der verwendeten Komposite

In dieser Arbeit wurden vier moderne Nanokomposite bezüglich ihrer Oberflächenqualität evaluiert und anschließend die Ergebnisse sowohl miteinander als auch in Bezug auf ein etabliertes Hybridkomposit verglichen. An Kompositen auf Nanotechnologie-Basis fanden *Ceram X Duo* (Dentsply DeTrey, Konstanz), *Filtek Supreme* (3M ESPE AG, Seefeld), *Tetric EvoCeram* (Ivoclar Vivadent, Schaan/Liechtenstein) und *Premise* (KerrHaWe, Karlsruhe) Verwendung, als Referenzprodukt das Feinpartikelhybridkomposit *Herculite XRV* (KerrHaWe, Karlsruhe). Die fünf ausgewählten Materialien weisen sowohl verschiedene Matrix- und Füllerzusammensetzungen als auch unterschiedliche Füllergehalte auf (Tab. 1).

3.1.1 Ceram X Duo

Das im Juni 2003 auf den Markt gebrachte *Ceram X Duo* enthält als Füllstoffe kleinste Partikel aus Barium-Aluminium-Borosilikat-Glas und methacrylat-funktionalisierte Siliziumdioxid-Nanofüllstoffe. Dabei weisen die Glasfüller eine Partikelgröße von 1,1-1,5 µm und die Nanofüller eine Größe von 10 nm auf. Bei *Ceram X Duo* handelt es sich also um ein Nanohybridkomposit. Insgesamt beträgt der Fülleranteil 76 Gew.-% bzw. 57 Vol.-%. Die organische Matrix besteht aus methacrylat-modifiziertem Polysiloxan sowie Dimethacrylat-Harz. Zusätzlich enthalten sind Fluoreszenzpigmente, Stabilisator, Kampferchinon, Ethyl-4-(dimethylamino)benzoat und Eisen-, Titanoxid- und Aluminiumsulfosilikat-Pigmente je nach Farbe [Dentsply DeTrey, 2003; Dentsply DeTrey, 2005]. In der vorliegenden Untersuchung wurde *Ceram X Duo* in der Farbe A3 Schmelz verwendet (Charge-Nr. 0407002141).

3.1.2 Filtek Supreme

Das als Nanofüllerkomposit bezeichnete hochgefüllte Mikrofüllerkomposit [Ernst und Willershausen, 2003] *Filtek Supreme* beinhaltet an Füllern eine Kombination aus nichtaggregiertem Silikafüller mit einer durchschnittlichen Partikelgröße von 20 nm und aggregierten Zirkonium-/Silikafüller-Clustern, die durchschnittlich 0,6 - 1,4 µm bei einer primären Partikelgröße von 5 - 20 nm aufweisen. Der anorganische Füllergehalt dieses im Oktober 2002 auf den Markt gebrachten Komposites wird mit etwa 78,5 Gew.-% bzw. 59,5 Vol.-% angegeben [3M ESPE, 2002a]. Die genannten Werte des Füllergehalts

stimmen beinahe mit denen des als Referenzprodukt gewählten *Herculite XRV* überein. Dies wurde mit Hilfe der Herstellung von Nanofüllerclustern und Nanomeren ermöglicht. Hierdurch gelang es, bei *Filtek Supreme* den Füllergehalt eines Mikrofüllers auf den eines Hybridkomposites zu erhöhen. Die Monomermatrix dieses Restaurationsmaterials setzt sich zusammen aus Bis-GMA (Bisphenol-A-Glycidylmethacrylat), Bis-EMA (Bisphenol-A-Polyethylen-glycoldiether-dimethacrylat), UDMA (Urethan-Dimethacrylat) und TEGDMA (Triethylen-Glycol-Dimethacrylat) [3M ESPE, 2002a; Manhart, 2003]. Für die Studie lag *Filtek Supreme* in der röntgenopaken Farbe B2 Dentin vor (Charge-Nr. 2AB).

3.1.3 Tetric EvoCeram

Bei *Tetric EvoCeram* besteht die disperse Phase aus Bariumglasfüllern und Barium-Aluminium-Silikatglasfüllern mit einer Größe von 0,4-0,7 μm , Ytterbiumtrifluorid (YbF_3), Mischoxiden und Präpolymeren [Lendenmann, 2005]. Aufgrund dieser zugefügten Vorpolymerisate gehört *Tetric EvoCeram* in die Reihe der Nano Hybridkomposite [Ivoclar Vivadent, 2005b]. Durch den Einsatz von Präpolymeren enthält *Tetric EvoCeram* neben sonst ausschließlich anorganischen auch organische Füllstoffe [Ivoclar Vivadent, 2005a]. Insgesamt beträgt der Fülleranteil 82-83 Gew.-% [Lendenmann, 2005] bzw. 68 Vol.-% [Ivoclar Vivadent, 2005a]. Als Monomermatrix liegt ein Gemisch aus dem von Bowen et al. entwickelten Bis-GMA [Bowen et al., 1983], UDMA und EBADMA vor [Ivoclar Vivadent, 2005a]. Im Vergleich zum Vorgängerprodukt *Tetric Ceram* wurde in *Tetric EvoCeram* nun EBADMA anstelle des relativ kurzkettigen Monomers TEGDMA eingesetzt. Dies trägt mit zur Reduktion der Polymerisationsschrumpfung bei. *Tetric EvoCeram* wurde in der Farbe A3 Dentin (Charge-Nr. F38346) angewendet.

3.1.4 Premise

Der Fülleranteil dieses Nano Hybridkomposites macht 84 Gew.-% bzw. 69 Vol.-% aus und setzt sich zusammen aus Bariumglas-Füllern mit einer durchschnittlichen Größe von 0,4 μm , Siliziumdioxid-Nanofüllern mit durchschnittlich 0,02 μm großen Partikeln [KerrHaWe, 2005] und vorpolymerisierten Füllern der Größe 30-50 μm , welche eine Kombination aus geringschrumpfendem Resin, Bariumglas und nicht-klumpenden Nanofüllern darstellen [RCD/AG, 2004]. Die Hauptbestandteile der organischen Phase sind EBADMA (Ethoxyliertes Bisphenol A-dimethacrylat), TEGDMA sowie Initiatoren und Stabilisatoren [KerrHaWe, 2005]. Dieses Komposit kam in der Farbe A3 Dentin (Charge-Nr. 406970) zum Einsatz.

3.1.5 Herculite XRV

Das in der vorliegenden Studie als Vergleichskomposit verwendetet *Herculite XRV* gehört der Gruppe der Feinpartikelhybridkomposite an. Als Füllstoffe enthält es bedampftes Siliziumdioxid, Zinkoxid, Titandioxid und Barium-Aluminium-Borosilikatglas bei einer durchschnittlichen Partikelgröße von 0,3-0,6 μm [Kerr HaWe, 2000]. Insgesamt beträgt der Füllergehalt 79 Gew.-% bzw. 59 Vol.-% [Kaplan et al., 1996]. Die Matrix des *Herculite XRV* wird aus dem Bowen-Kunststoff Bis-GMA, TEGDMA und EBADMA gebildet [Kerr HaWe, 2000]. Für die vorliegende Arbeit wurde dieses Komposit in der Farbe A3 Dentin (Charge-Nr. 4-1092) verwendet.



a)



b)

Abb. 2: Die ausgewählten Komposite:

- a) *Ceram X Duo* (Dentsply DeTrey, Konstanz) in Karpulen mit Applikatorpistole
- b) in Applikationsspritzen (von unten nach oben): *Tetric EvoCeram* (Ivoclar Vivadent, Schaan/Liechtenstein), *Filtek Supreme* (3M ESPE, Seefeld), *Premise* (KerrHaWe, Karlsruhe), *Herculite XRV* (KerrHaWe, Karlsruhe)

Die verwendeten Kompositmaterialien gehören zu den kaltlichtpolymerisierenden Kompositen. Durch sichtbares Licht im Wellenlängenbereich zwischen 400 und 500 nm wird der jeweils enthaltene Fotoinitiator aktiviert. Bis auf *Ceram X Duo* lagen alle Komposite dieser Studie als Applikationsspritzen vor (Abb. 2). *Ceram X Duo* wurde dagegen in Karpulen geliefert und daher war zur Anwendung dieses Komposites zusätzlich eine Applikatorpistole nötig.

Tab. 1: Spezifikation der untersuchten Komposite, ihre Zusammensetzung und Hersteller

Material	<i>Ceram X Duo</i>	<i>Filtek Supreme</i>	<i>Tetric EvoCeram</i>	<i>Premise</i>	<i>Herculite XRV</i>
Hersteller	Dentsply DeTrey, Konstanz	3M ESPE AG, Seefeld	Ivoclar Vivadent, Schaan/Liechtenstein	KerrHaWe, Karlsruhe	KerrHaWe, Karlsruhe
Füller-zusammen-setzung (Art und Größe der Füller)	<ul style="list-style-type: none"> • Ba-Al-Borosilikat-Glas¹: 1,1-1,5 µm² • Methacrylat-funktionalisierter SiO₂-Nanofüllstoff¹: 10 nm² 	<ul style="list-style-type: none"> • aggregierte Zirkonium-/Silikafüller-Cluster: durchschnittl. 0,6 bis 1,4 µm bei primärer Partikelgröße von 5-20 nm • nicht-aggregierte Silikafüller: durchschnittl. 20 nm³ 	<ul style="list-style-type: none"> • Barium-glasfüller, Ba-Al-Silikatglas-Füller: 0,4-0,7 µm • YbF₃, • Mischoxide • Präpolymere⁵ 	<ul style="list-style-type: none"> • Barium-glasfüller: durchschnittl. 0,4 µm • SiO₂-Nanofüller durchschnittl. 0,02 µm⁷ • Vorpolymerisierte Füller (Kombination aus gering-schrumpfendem Resin, Bariumglas und nicht-klumpenden Nanofüllern) 30-50 µm⁸ 	<ul style="list-style-type: none"> • bedampftes SiO₂ • ZnO • TiO₂ • Ba-Al-Borosilikat-glas 0,3-0,6 µm⁹
Füllergehalt (Gew.-%)	76 ²	78,5 ³	82-83 ⁵	84 ⁷	79 ¹⁰
Füllergehalt (Vol.-%)	57 ²	59,5 ³	68 ⁶	69 ⁷	59 ¹⁰
Matrix-zusammen-setzung	<ul style="list-style-type: none"> • Methacrylat-modifiziertes Polysiloxan • Dimethacrylat-Harz¹ 	<ul style="list-style-type: none"> • Bis-GMA • Bis-EMA • UDMA • TEGDMA^{3,4} 	<ul style="list-style-type: none"> • Bis-GMA • UDMA • EBADMA⁶ 	<ul style="list-style-type: none"> • EBADMA • TEGDMA⁷ 	<ul style="list-style-type: none"> • Bis-GMA • TEGDMA • EBADMA⁹
Charge	0407002141	2AB	F38346	406970	4-1092

¹ Dentsply DeTrey, 2003² Dentsply DeTrey, 2005³ 3M ESPE, 2002a⁴ Manhart, 2003⁵ Lendenmann, 2005⁶ Ivoclar Vivadent, 2005a⁷ Kerr HaWe, 2005⁸ RCD/AG, 2004⁹ Kerr HaWe, 2000¹⁰ Kaplan et al., 1996

3.2 Herstellung der Kompositprüfkörper

Aus den Nanokompositen *Premise*, *Filtek Supreme*, *Ceram X Duo*, *Tetric EvoCeram* und dem Feinpartikel-Hybridkomposit *Herculite XRV* wurden jeweils 60 Prüfkörper mit der Grundfläche von 7 mm x 7 mm und einer Dicke von 4 mm angefertigt. Hierfür wurden aus Objektträgern entsprechende Hohlformen hergestellt, in welche das jeweilige Komposit eingebracht wurde.

Die Aushärtung der Kompositproben erfolgte mit einem Lichtgerät Optilux 400 (VCL 401; Demetron, Danbury, CT, USA) mit einer Lichtleistung von 800 mW/cm². Während der Probenherstellung wurde die Lichtintensität regelmäßig mit Hilfe eines Radiometers (Demetron Research Corp, Danbury, CT, USA) kontrolliert. Die Aushärtungszeit betrug

hierbei jeweils 40 Sekunden - zuerst auf der Ober- und anschließend auf der Unterseite der Form. Dies entspricht den jeweiligen Herstellerempfehlungen.

Zur Beseitigung der füllstoffarmen Deckschicht und um äquivalente Ausgangsbedingungen bei allen Bearbeitungsverfahren und allen Proben zu gewährleisten, sollte eine standardisierte Oberfläche aller Kompositkörper angestrebt werden. Hierfür wurde die Oberfläche jedes Prüfkörpers für jeweils 30 Sekunden bei leichtem Druck und unter Wasserberieselung mit einer Sandpapierscheibe der Körnung 600 grit (Leco Corporation, St Joseph, MI, USA) bei 120 U/min bearbeitet, die sich auf einem maschinellen Polierrotor (A-250, Jean Wirtz, Düsseldorf) befand. Anschließend wurden alle Prüfkörper unter dem Stereomikroskop (Stemi SV 6, Snv.-Nr. 138824 00/90, Zeiss, Göttingen) untersucht und solche aussortiert, die aufgrund von Fehlern im Rahmen der Herstellung Unregelmäßigkeiten auf der Oberfläche aufwiesen, wie etwa Lufteinschlüsse oder Porositäten. Im Folgenden verblieben die Kompositproben 24 Stunden in einem Hygrophor bei Zimmertemperatur.

3.3 Instrumente für die rotierende Bearbeitung

Für die rotierende Bearbeitung der Prüfkörper wurden zwei Diamantfinierer, ein Hartmetallfinierer und drei mit Aluminiumoxid beschichtete Scheiben verwendet. Die diamantierten Instrumente wiesen zwei und die flexiblen Disks drei verschiedene Körnungen auf. Der Hartmetallfinierer lag nur in einer Ausführung vor (Tab. 2).

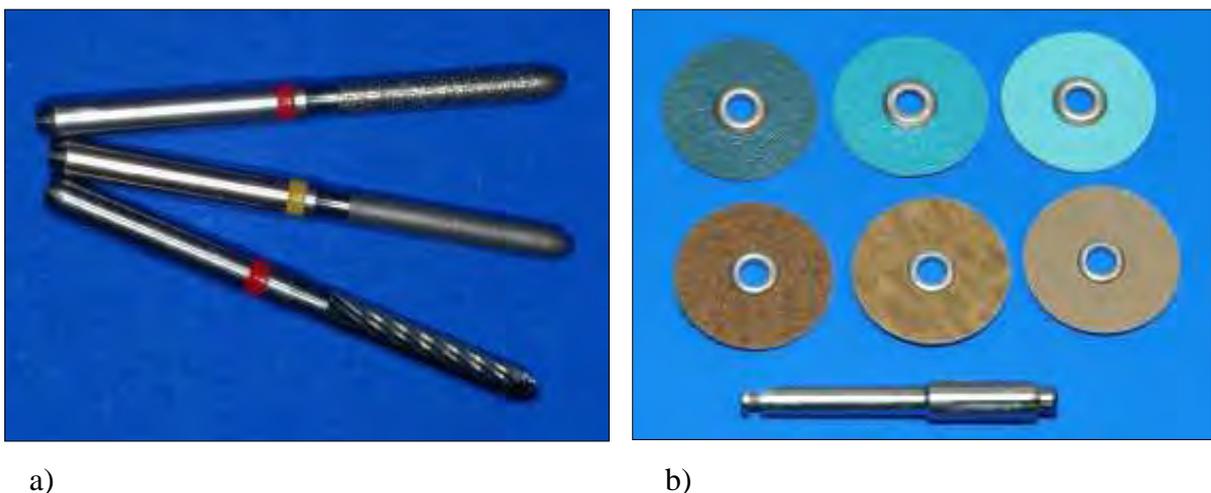


Abb. 3: Die eingesetzten rotierenden Instrumente in der Übersicht:

- (a) Die Finierer (Gebr. Brasseler GmbH & Co. KG, Lemgo), von oben nach unten: 30 μm Diamantfinierer, 20 μm Diamantfinierer, Hartmetallfinierer mit 12 gewendelten Schneiden
- (b) Die Sof-Lex Scheiben (3M ESPE AG, Seefeld) in drei verschiedenen Korngrößen mit RA-Mandrell; von links nach rechts: mittel, fein, sehr fein

Tab. 2: Überblick über die zur Bearbeitung eingesetzten rotierenden Instrumente mit Details zu ihren Eigenschaften und deren Fabrikat

Typ	Abrasivpartikel	Korngröße/ Schneidenzahl	Drehzahl	Farbcode	Bezeichnung	Hersteller
Finierer	Diamant	24-40 μm^1	40.000 U/min	rot	806 314 290 514 014	Gebr. Brasseler GmbH & Co. KG, Lemgo
Finierer	Diamant	15-30 μm^1	40.000 U/min	gelb	806 314 290 504 014	Gebr. Brasseler GmbH & Co. KG, Lemgo
Finierer	Hartmetall	12 Schneiden ²	40.000 U/min	rot	500 314 290 072 014	Gebr. Brasseler GmbH & Co. KG, Lemgo
Flexible Scheibe (Sof-Lex)	Al ₂ O ₃	27 μm^1	3.000 U/min	dunkelblau	1982 M	3M ESPE AG, Seefeld
Flexible Scheibe (Sof-Lex)	Al ₂ O ₃	14 μm^1	3.000 U/min	himmelblau	1982 F	3M ESPE AG, Seefeld
Flexible Scheibe (Sof-Lex)	Al ₂ O ₃	5 μm^1	3.000 U/min	hellblau	1982 SF	3M ESPE AG, Seefeld

¹Jung, 1998

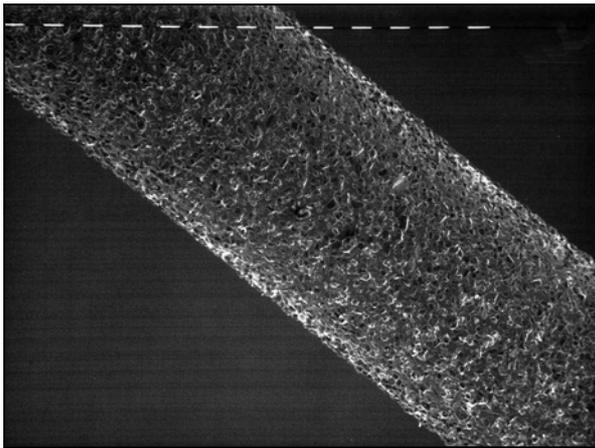
²Brasseler, 2005

3.3.1 Diamant- und Hartmetallfinierer

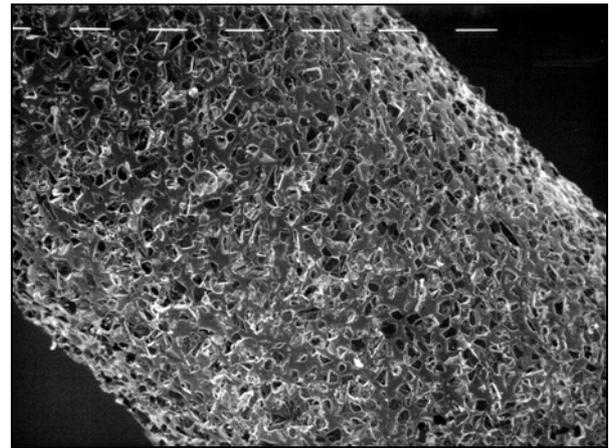
Die für die Studie ausgewählten Diamant- und Hartmetallfinierer lagen in Torpedoform vor (Abb. 3 a). Bei einer Schaftlänge von 23 mm hatten die Arbeitsteile der drei verschiedenen Finierer jeweils einen Durchmesser von 1,4 mm und eine Länge von 10 mm [Brasseler, 2005].

In dieser Untersuchung wurden ein rotbringter, als fein bezeichneter Diamantfinierer mit einer Korngröße von 24-40 μm (durchschnittlich 30 μm) (Abb. 4) und ein gelbbringter und als extrafein bezeichneter Diamantfinierer mit einer Korngröße von 15-30 μm (durchschnittlich 20 μm) verwendet (Abb. 5). Der Hartmetallfinierer (Abb. 6) lag als Instrument mit 12 rechts gewendelten Schneiden vor.

Die folgenden Aufnahmen (Abb. 4-6) zeigen die Arbeitsteile der in dieser Studie verwendeten Schleifkörper, wodurch deren Form, Oberflächenbeschaffenheit und gleichzeitig die Unterschiede in der Körnung aufgezeigt werden:

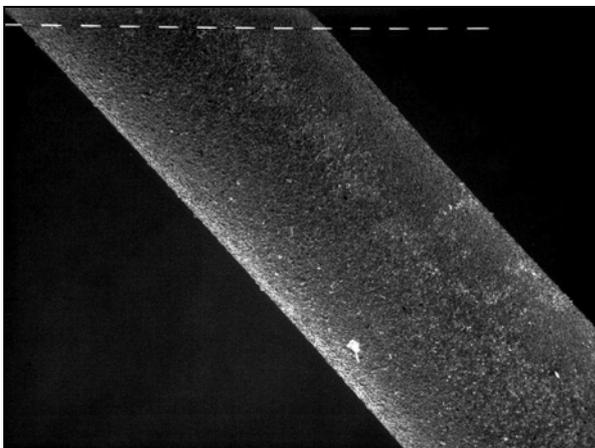


a)

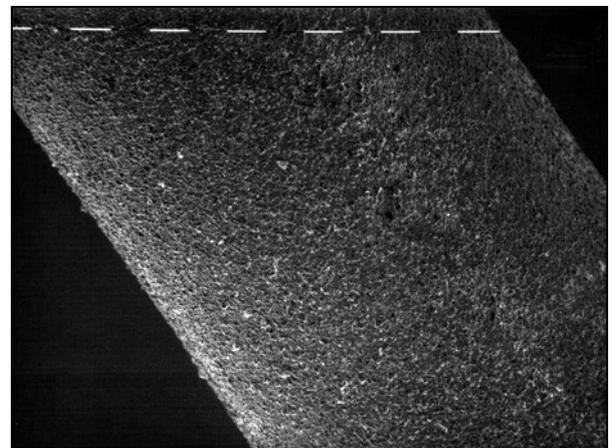


b)

Abb. 4: Grober Diamantfinierer in der Übersicht (a) und bei näherer Betrachtung (b); die Länge eines Balkens entspricht 100 μm .

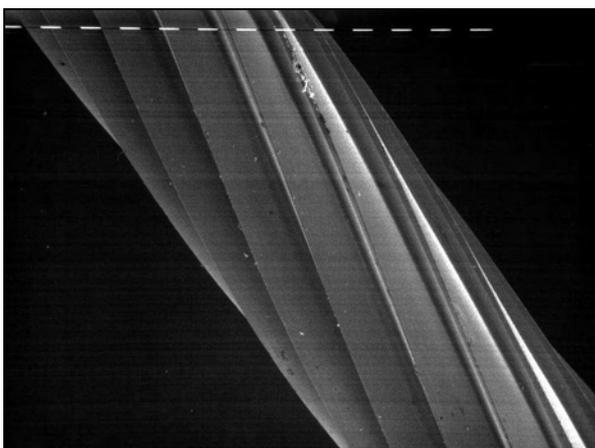


a)

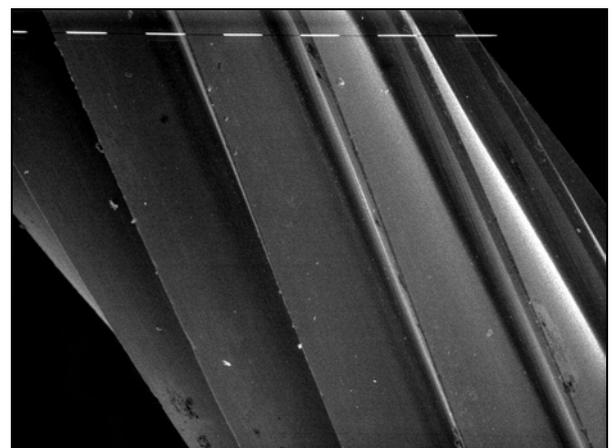


b)

Abb. 5: Feiner Diamantfinierer in der Übersicht (a) und bei näherer Betrachtung (b); die Länge eines Balkens entspricht 100 μm .



a)



b)

Abb. 6: Hartmetallfinierer mit 12 gewendelten Schneiden in der Übersicht (a) und bei näherer Betrachtung (b); die Länge eines Balkens entspricht 100 μm .

3.3.2 Flexible Scheiben

Die flexiblen Scheiben (*Sof-Lex*TM) sind einseitig mit Aluminiumoxid-Partikeln beschichtet. Für die klinische Anwendung werden sie mit zwei verschiedenen Durchmessern angeboten. Die kleinen Scheiben haben einen Durchmesser von 9,5 mm, während für die Bearbeitung größerer Flächen Disks mit einem Durchmesser von 12,7 mm eingesetzt werden. Letztere fanden bei der vorliegenden Studie Verwendung. Durch vier verschiedene Korngrößen der Al₂O₃-Partikel bedingt, stehen vier Abstufungen der Scheiben zur Verfügung. Mit der groben Sorte nimmt man die Grobausarbeitung von Kompositoberflächen vor, mit der mittleren das Konturieren, mit der feinen das Finieren und mit der sehr feinen das Polieren. Die Korngrößen der korrespondierenden flexiblen *Sof-Lex* Scheiben betragen ca. 100 µm, ca. 29 µm, ca. 14 µm bzw. ca. 5 µm (Abb. 7).

In dieser Untersuchung wurde die größte Disc mit der Farbkodierung schwarz nicht verwendet. Somit lagen die Scheiben nur in drei verschiedenen Körnungen vor (Abb. 3 b), und zwar in mittel mit der Farbkodierung dunkelblau, in fein mit der Farbkodierung himmelblau und in sehr fein mit der Farbkodierung hellblau. Zum Bearbeiten werden sie auf ein speziell dafür vorgesehenes Mandrell aus Stahl aufgesteckt (Abb. 3 b).

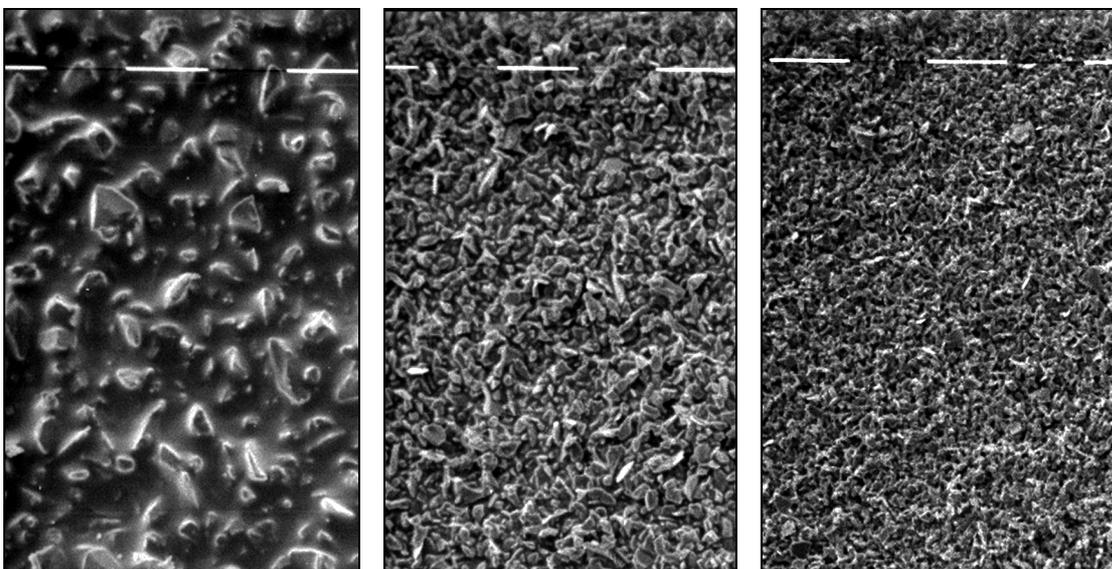


Abb. 7: Die Arbeitsseite von *Sof-Lex* Scheiben in drei verschiedenen Korngrößen; von links nach rechts: mittel, fein, sehr fein; die Länge eines Balkens entspricht 100 µm.

3.4 Die verschiedenen Bearbeitungsmethoden

Das erste Ausarbeitsverfahren (AV1) beschränkte sich auf die alleinige Verwendung eines Diamantfinierers mit einer durchschnittlichen Korngröße von ca. 30 µm.

Bei dem zweiten Verfahren (AV2) wurde zusätzlich zu einem Diamantfinierer mit durchschnittlicher Korngröße von ca. 30 µm ein weiterer mit durchschnittlicher Korngröße von ca. 20 µm eingesetzt.

In der dritten Methode (AV3) wurden ein Diamantfinierer mit durchschnittlicher Korngröße von ca. 30 µm und ein Hartmetallfinierer mit 12 gewendelten Schneiden kombiniert.

Das vierte Bearbeitungsverfahren (RG) beschreibt die Nutzung der Al₂O₃-Scheiben in mittlerer, feiner und sehr feiner Körnung (Abb. 8). Dieses Verfahren ist ein akzeptierter klinischer Standard und diente als Referenz zum Vergleich mit den zuvor beschriebenen Methoden mit starren Ausarbeitsinstrumenten (AV1-3). Für diese Bearbeitungsmethode wurde die Abkürzung „RG“ für „Referenzgruppe“ gewählt.

Alle rotierenden Instrumente wurden unter Wasserkühlung angewendet.

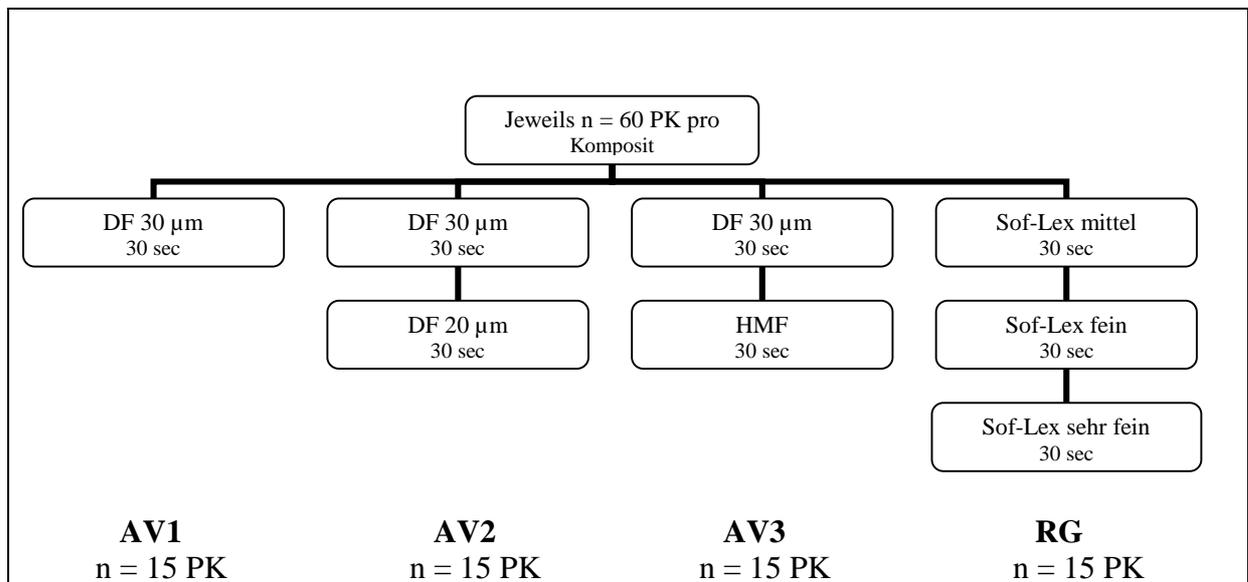


Abb. 8 : Schematische Darstellung der vier verschiedenen Bearbeitungsverfahren AV1 – AV3 und RG mit den jeweiligen Bearbeitungszeiten (DF = Diamantfinierer, HMF = Hartmetallfinierer, PK = Prüfkörper)

3.5 Bearbeitung der Kompositoberflächen

Je Kompositorte wurden 60 Prüfkörper verwendet. Sie wurden zufällig auf die vier Bearbeitungsverfahren aufgeteilt, jedem Finierverfahren also jeweils 15 Prüfkörper eines Komposites. Daraus ergaben sich also insgesamt 20 Untersuchungsgruppen sowie insgesamt ein Probenumfang von $n = 300$ Prüfkörpern.

Eventuelle Gewöhnungs- und Lerneffekte sowohl bei der Benutzung der verschiedenen rotierenden Instrumente als auch bei der Bearbeitung der unterschiedlichen Komposite sollten vermieden werden bzw. etwa gleichmäßig auf alle Versuchsreihen verteilt werden. Daher wurde eine Randomisierungsliste für die Kombinationen aus den fünf Kompositorten und den vier Bearbeitungsmethoden erstellt. Die Auswahl eines bestimmten Prüfkörpers und einer der vier Methoden war damit nicht willkürlich, sondern erfolgte streng nach der in der Liste vorgegebenen, randomisierten Reihenfolge.

Außerdem kam eine Aufteilung der Prüfkörper auf zwei Testpersonen hinzu, welche gemeinsam die Ausarbeitung vornahmen. Beide Personen bearbeiteten jeden Werkstoff gleich häufig mit allen vier Methoden.

Die Prüfkörper wurden in einer Haltevorrichtung fixiert, um deren Oberfläche manuell bearbeiten zu können. Die Ausarbeitung erfolgte unter Berücksichtigung der jeweiligen Herstellerempfehlungen bezüglich Umdrehungszahl und Art der Kühlung der rotierenden Instrumente. Um für die einzelnen Versuchsreihen identische und optimale Bedingungen zu schaffen, wurden alle Oberflächenbearbeitungen an derselben Behandlungseinheit (Sirona M1, Siemens, Bensheim) mit stets demselben roten und blauen Winkelstück vorgenommen und zusätzlich die empfohlenen Drehzahlen mit Hilfe des elektronischen Drehzahlmessgerätes Moviport C117.11 (J. & A. Braun KG, Waiblingen) an der Einheit genau kontrolliert.

Für Diamant- und Hartmetallfinierinstrumente wurde ein rotberingtes Winkelstück (24 LN Intramatic Lux 2, KaVo, Biberach/Riss) mit 3-Düsenspraykühlung bei einer Umdrehungszahl des Instrumentes von 40.000 U/min eingesetzt. Die Dauer des Schleifvorgangs war auf 30 Sekunden je Kompositoberfläche begrenzt. Nach Bearbeitung von fünf Prüfkörpern wurden die Finierer gegen neue ausgetauscht. Somit betrug die Gesamtarbeitszeit jedes Finierers 150 Sekunden.

15 Prüfkörper je Komposit wurden mit flexiblen Scheiben in drei Körnungen für jeweils 30 Sekunden bearbeitet. Die Bearbeitung erfolgte hierbei mit einem blauberingten

Winkelstück (20 LH Intramatic Lux 3 mit Kopfteil 68 LH, KaVo, Biberach/Riss) mit 2-Düsen-spraykühlung bei 3.000 U/min. Für jede Oberfläche wurden neue *Sof-Lex* Discs benutzt. Mit ihnen wurde unter konstantem Druck und leicht kreisenden Bewegungen die Oberfläche finiert und poliert.

Gemeinsam war allen Finierern und flexiblen Scheiben, dass bei der Bearbeitung der Oberflächen eine ausreichende Wasserkühlung von mindestens 50 ml/min sichergestellt wurde.

Im Anschluss an die Bearbeitung wurden die Prüfkörper gesäubert. Hierfür reinigte man sie zunächst mit Alkohol (98%), sprühte sie mit einem Wasserstrahl ab und trocknete sie mit einem Luftstrom (Dust-Off, Falcon Safety Products, Inc., Sommerville, USA). Abschließend wurden die Kompositproben in verschlossenen Kunststoffgefäßen bei Zimmertemperatur aufbewahrt.

3.6 Oberflächenevaluierung

Die in der vorliegenden Untersuchung zur Beurteilung von Oberflächenqualitäten genutzte Methode war die Rauigkeitsmessung mit einem elektronischen Tastschnittgerät. Dieses Verfahren ermöglicht die Erhebung quantitativer Resultate. Um die hierbei bestimmten Rauhtiefen besser interpretieren zu können, erfolgte zusätzlich eine qualitative Evaluierung der Oberfläche.

3.6.1 Quantitative Beurteilung

Alle bearbeiteten Prüfkörper wurden einer profilometrischen Oberflächenuntersuchung unterzogen. Die Messungen an den bearbeiteten Prüfkörperoberflächen wurden mit Hilfe des Oberflächenmessgerätes *Perthometer S8P* (Feinprüf GmbH, Göttingen) durchgeführt, welches nach dem elektrischen Tastschnittverfahren arbeitet. Zusammen mit einem Mikrotaster und einem Vorschubgerät bildet das *S8P* einen kompletten Oberflächenmessplatz (Abb. 9).

Die gesamte Messapparatur war auf einem pneumatisch gelagerten Messtisch (VW-3036-OPT-0330, Newport, Fountain Valley, USA) positioniert. Mit der Lagerung auf diesem Luftpolster wurden Beeinflussungen der Messergebnisse durch Erschütterungen oder Schwingungen vermieden.



Abb. 9: Arbeitsplatz am Perthometer S8P. Die Messapparatur befindet sich auf einem schwingungsgedämpften Messtisch.

Der optische Mikrotaster *Focodyn* (Rodenstock, München) ist ein Instrument zur Erfassung von Mikrostrukturen von Oberflächen und arbeitet nach dem Prinzip der dynamischen Fokussierung [Feinprüf, 1989a] (Abb. 10). Das Infrarotlicht der enthaltenen Laserdiode wird über einen Kollimator parallelisiert, zu einem Fokus von $1\ \mu\text{m}$ gebündelt, über ein Prisma zum Mikroobjektiv geführt und auf die Probenoberfläche geleitet (Abb. 10 b). Das Mikroobjektiv erfasst das von der Oberfläche reflektierte Licht und leitet es zum Fokusdetektor weiter, welcher das optische Signal in ein elektrisches umwandelt. Dieses Signal steuert einen Elektromotor im *Focodyn* so, dass der Fokus auf dem abgetasteten Oberflächenpunkt liegt. Sind Profilunregelmäßigkeiten vorhanden, wird der Messhebel durch eine entsprechende Vertikalbewegung derart bewegt, dass der Abstand zwischen Werkstückoberfläche und Tastspitze konstant bleibt [Feinprüf, 1989a]. Die jeweilige Auslenkung des Messhebels wird mit Hilfe eines induktiven Wandlers in ein elektrisches Signal umgewandelt und zur Messwertermittlung weiterverarbeitet.

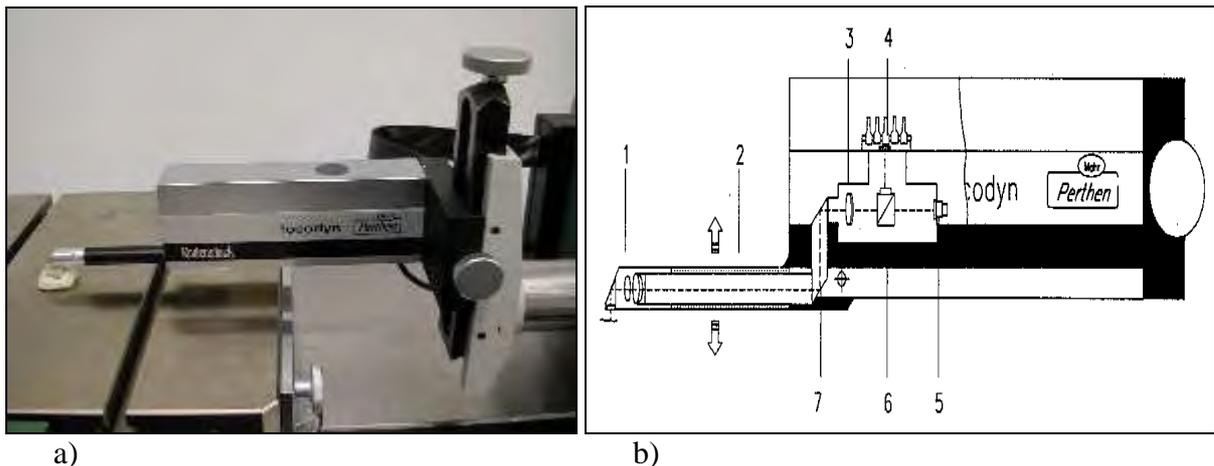


Abb. 10: Der optische Mikrotaster Focodyn (Rodestock, München)

- (a) Eine Kompositprobe befindet sich waagrecht auf dem Messplateau; der Fokus des Lasertasters liegt auf der abzutastenden Oberfläche (vgl. Kapitel 3.6.1.5).
- (b) schematischer Aufbau (1 Mikroobjektiv, 2 Messhebel, 3 Kollimator, 4 Fokusdetektor, 5 Laserdiode, 6 Strahlteiler, 7 Prisma [Feinprüf, 1989a])

Der Lasertaster *Focodyn* ist mechanisch mit der Vorschubeinheit PRK (Feinprüf GmbH, Göttingen) verbunden, welche selbigen zeilenweise (Tastschnittverfahren) und mit konstanter Geschwindigkeit über die zu untersuchende Oberfläche führt.

3.6.1.1 Messbedingungen und Rauigkeitsparameter

Um Messdaten von verschiedenen Prüfkörpern vergleichen zu können, ist es unabdingbar, diverse Tastbedingungen und zu ermittelnde Rauigkeitskenngrößen entsprechend festzulegen und vor Beginn der Messreihen am Gerät einzustellen. Zu den zu bestimmenden Tastbedingungen gehören Vertikalbereich VB und Taststreckenlänge L_T . Von letztgenanntem sind Messstrecke L_M , Einzelmessstrecke L_E und Grenzwellenlänge λ_C ableitbar.

- Vertikalbereich (VB)

Der Vertikalbereich begrenzt das gemessene Profil nach unten und oben. Grundsätzlich sollte der Vertikalbereich möglichst exakt an die zu messende Profilamplitude angepasst werden, um die hohe Auflösung der Messwertverarbeitung auszunutzen. Dies wird erreicht, indem man den Vertikalbereich möglichst klein wählt, aber dennoch groß genug, um alle Messwerte darin erfassen zu können. Der Wert für den Vertikalbereich richtet sich außerdem nach dem ausgewählten Taster, dessen Empfindlichkeit dem *S8P* über eine Codierung mitgeteilt wird.

Die Empfindlichkeit des in dieser Studie Verwendung findenden Lasertasters war so abgeglichen, dass Vertikalbereiche von $\pm 12,50 \mu\text{m}$, $\pm 62,50 \mu\text{m}$ und $\pm 250,0 \mu\text{m}$ zugelassen waren. Aus den in Vorversuchen durchgeführten Messungen an jenen Probekörpern, die makroskopisch eine besonders rauhe und solchen, die eine besonders glatte Oberfläche erkennen ließen, erwies sich insgesamt ein Vertikalbereich von $\text{VB} = \pm 62,50 \mu\text{m}$ als geeignet.

- Länge der Taststrecke (L_T)

Die Taststrecke entspricht der Distanz, welche der Taster im Zuge einer Messung auf der Werkstückoberfläche zurücklegt [Deutsche Normen, 1995a]. In der vorliegenden Untersuchung entschied man sich für eine Taststrecke von $L_T = 1,750 \text{ mm}$, wodurch sich eine Grenzwellenlänge von $\lambda_C = 0,250 \text{ mm}$ ergab. Die Grenzwellenlänge λ_C legt fest, welche Profilunregelmäßigkeiten der Welligkeit und welche der Rauheit zugeordnet werden.

Die Taststrecke L_T wird nicht komplett zur Auswertung der Oberflächenmessung herangezogen. Man unterteilt sie in sieben gleich große Abschnitte: eine Vorlaufstrecke, fünf Einzelmessstrecken L_E und eine Nachlaufstrecke. Gemäß DIN 4768 sind Grenzwellenlänge und Einzelmessstrecke stets gleich groß zu wählen [Deutsche Normen, 1995a]. Für die Bestimmung des Oberflächenprofils sind die fünf Einzelmessstrecken von Bedeutung, die zusammen die Gesamtmesstrecke bilden [Deutsche Normen, 1995a]. Daher ergab sich in dieser Studie aufgrund der Taststreckenlänge von $L_T = 1,750 \text{ mm}$ eine Messstrecke von $L_M = 1,250 \text{ mm}$. Vor- und Nachlaufstrecke werden zwar nicht zur Auswertung herangezogen, sind jedoch aus messtechnischen Gründen notwendig [Feinprüf, 1989b]. Innerhalb der Vorlaufstrecke sollen anfängliche Einschwingvorgänge abklingen [Deutsche Normen, 1995a].

Die Geschwindigkeit, mit der der Taster über die Oberfläche geführt wird, ist abhängig von der gewählten Taststrecke und betrug in diesem Fall $0,1 \text{ mm/s}$ [Feinprüf, 1989b].

Die Filterung der langwelligen Profilanteile, die die Rauhigkeit überlagern können, geschah in der vorliegenden Arbeit mit einem Gauß-Filter (GS). Nach DIN 4777 sind Profilfilter Einrichtungen, die sowohl kurzwellige Rauheitsanteile möglichst geringfügig in das Welligkeitsprofil transferieren als auch langwellige Anteile des Istprofils nur teilweise oder gar nicht in das Rauheitsprofil übernehmen [Deutsche Normen, 1995b].

In der vorliegenden Studie erfolgte die Auswertung der Profilunregelmäßigkeiten nach dem arithmetischen Mittenrauhwert R_a und dem Profillängenverhältnis LR, welche bereits in Kapitel 2.2.6.1 definiert wurden.

3.6.1.2 Parallelaufzeichnung

Um eine dreidimensionale, topographische Darstellung von Oberflächen zu erhalten, nutzte man die zusätzliche Option „Parallelaufzeichnung“ [Feinprüf-Perthen, 1990]. Hierbei wurden mittels einer Antriebseinheit Querverschiebungen vorgenommen, welche bei jeder zu beurteilenden Fläche das Aufzeichnen mehrerer paralleler und in gleichem Abstand zueinander verlaufender Tastschnitte ermöglicht. In der vorliegenden Studie wurden hierfür neun Tastschnitte mit einem Abstand von jeweils $D_Y = 0,219$ mm gewählt. Zusammengenommen ergab dies eine Y-Taststrecke von $L_T = 1,750$ mm. Aufgrund der gewählten X-Taststreckenlänge von ebenfalls $L_T = 1,750$ mm wurde somit eine quadratische Fläche von $1,750$ mm x $1,750$ mm abgetastet. Die Längen von L_T und L_Y wurden identisch gewählt, um eine verzerrungsfreie Profildarstellung zu gewährleisten [Feinprüf-Perthen, 1990]. Bedingt durch die 5/7 der Taststrecke betragende Messstrecke $L_M = 1,250$ mm ergab sich ein rechteckiges Messfeld von $1,250$ mm x $1,750$ mm, welches zur Evaluierung herangezogen wurde. Dies ermöglichte ansatzweise eine flächenhafte Darstellung der Oberflächenrauigkeiten der bearbeiteten Kompositproben (vgl. Abb. 11).

Gewählte Tastbedingungen für die Parallelaufzeichnungen:

- Y-Taststrecke: $L_Y = 1,750$ mm
- Y-Tastschritte: $N_Y = 8$ [Es werden $(N_Y + 1)$ Messungen durchgeführt und Profile aufgezeichnet, im vorliegenden Fall also jeweils neun.]
- Y Schrittlänge (L_Y / N_Y): $D_Y = 0,219$ mm

3.6.1.3 Vorbereitung der Proben und Durchführung der Rauigkeitsmessung

Laut DIN 4768 ist eine Fläche in jener Richtung abzutasten, in der sich der größte Rauheitswert ergibt [Deutsche Normen, 1995a]. Daher wurde das Abtasten der vorliegenden Prüfkörperoberflächen grundsätzlich senkrecht zur Orientierung der Riefen vorgenommen. Bei den u.a. mit Diamantschleifkörpern bearbeiteten Prüfkörpern war die Abtastrichtung eindeutig anhand von Riefen erkennbar, die durch das Finieren zustande kamen. Bei solchen, die mit *Sof-Lex* Scheiben bearbeitet wurden, entschied man sich aufgrund der kreisenden Bewegung bei der Bearbeitung für eine beliebige Abtastrichtung.

Zu Beginn jeder Messreihe wurde eine Kalibrierung des Tasters mit Hilfe eines Einstellnormals (PEN-10-1, Feinprüf GmbH, Göttingen) vorgenommen, wie sie vom Hersteller empfohlen wird [Feinprüf, 1989b].

Zusammenfassung der für die vorliegende Untersuchung ausgewählten Tast- und Auswertebedingungen:

- X-Taststreckenlänge: L_T = 1,750 mm
- Messstreckenlänge: L_M = 1,250 mm
- Vertikalbereich: VB = $\pm 62,50 \mu\text{m}$
- Grenzwellenlänge: λ_C = 0,250 mm
- Filter: Gaußfilter (GS)
- Profiltyp: P-Profil

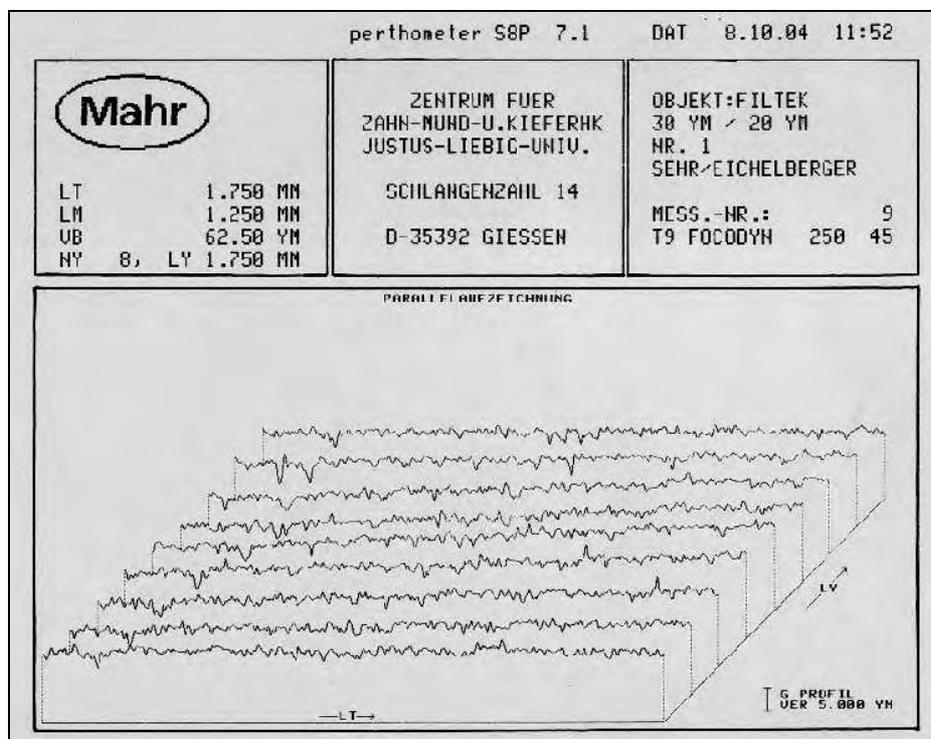


Abb. 11: Beispiel einer Parallelaufzeichnung nach neun Einzelmessungen einer Filtek Supreme-Oberfläche nach Bearbeitung mit einem $30 \mu\text{m}$ sowie einem $20 \mu\text{m}$ Diamantfinierer

3.6.1.4 Prüfstatistische Auswertung

Differenzen zwischen den Bearbeitungsmethoden und Kompositmaterialien wurden mittels einfacher und zweifacher Varianzanalysen sowie Post-hoc Tests nach Scheffé beurteilt. Normalverteilung konnte für die Oberflächenparameter vorausgesetzt werden. Sowohl alle Einzelmessergebnisse und Mittelwerte als auch alle Details der statistischen Auswertung sind im Anhang vermerkt.

3.6.2 Qualitative Beurteilung

Neben der quantitativen Bewertung der Oberflächen sollte eine qualitative Evaluierung erfolgen. Diese wurde im Rasterelektronenmikroskop PSEM 500 (Philips, Eindhoven, Niederlande) vorgenommen.

3.6.2.1 Vorbereitung der Proben zur rasterelektronenmikroskopischen Untersuchung

Von den fünfzehn Proben einer Gruppe wurden je zwei für die Untersuchung im REM zufällig ausgewählt. Von jedem Komposit wurden also $n = 8$ Prüfkörper untersucht. Sämtliche zu untersuchende Prüfkörper wurden erneut mit Alkohol (98%) gereinigt, im Wasserstrahl abgesprüht und mit einem Luftstrom getrocknet.

Anschließend wurden die Prüfkörper einzeln mit Hilfe eines leitfähigen Spezialklebers (*Leit-C* nach Göcke, Neubauer Chemikalien, Münster) auf einem Rasterteller befestigt. Zur vollständigen Verdampfung des im Kleber enthaltenen Lösungsmittels wurden die fixierten Prüfkörper für 24 Stunden bei 37 °C in einem Trockenschrank gelagert.

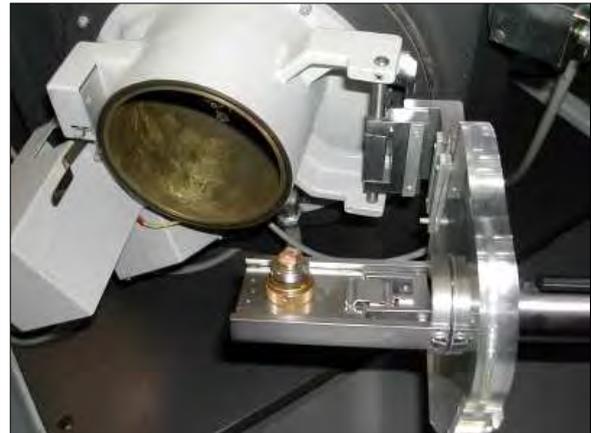
Für eine Untersuchung im REM wird neben der Vakuumbeständigkeit auch die oberflächliche, elektrische Leitfähigkeit des Objektes gefordert [Lange und Blödorn, 1981]. Die hier verwendeten Kompositprüfkörper waren als vakuumbeständig anzusehen, jedoch nicht als leitfähig. Aus diesem Grund wurden die Proben im Folgenden mit einem dünnen, elektrisch leitenden Überzug versehen. Dies geschah in einer Bedampfungs- bzw. Sputterungsanlage des Typs SCD 040 (Bal-Tec, Balzers, Liechtenstein; Abb. 12 a), in welcher die Oberflächen mit einer ca. 30 nm dicken Goldschicht überzogen wurden.

An der Sputterungsanlage wurden folgende Geräteeinstellungen gewählt:

- Stromstärke: 20 mA
- Leerlaufspannung: 160 V
- Zeit: 4 Minuten
- Druck: 0,1 mbar
- Dreimaliges Fluten der Sputterkammer mit Stickstoff



a)



b)

Abb. 12: Sputteranlage des Typs SCD 040 (a) und besputterter Kompositprüfkörper eingesetzt in den Probenschlitten des Rasterelektronenmikroskops PSEM 500 (b)

3.6.2.2 Anfertigung der REM-Aufnahmen am PSEM 500



Abb. 13: Arbeitsplatz am Rasterelektronenmikroskop PSEM 500

Beim Einsetzen der Präparate in den Probenschlitten des Rasterelektronenmikroskops (Abb. 12 b) müssen alle Proben in gleicher vertikaler Ausrichtung justiert werden. Dies ermöglichte ein durchsichtiger Kunststoffring, den man auf den Schlitten aufsetzte und mit dessen Hilfe alle Präparate entsprechend der Oberkante des Ringes in gleicher Höhe ausgerichtet wurden.

In allen Aufnahmen kam die gleiche Aperturblende ($400\ \mu\text{m}$) zum Einsatz. Durch nachträgliche manuelle Justierung wurde die Endlinsenaperturblende auf der optischen Achse zentriert, um bei Änderung des Fokus Lateralbewegungen des Objektes zu

vermeiden [Blödorn und Syed-Ali, 1987]. Nach Korrektur des Astigmatismus wurde bei standardisierter 80-facher Monitorvergrößerung eine Bildstichprobe pro Prüfkörper erhoben. Bei diesem Vergrößerungsfaktor sind Feinstrukturen und Mikrorauigkeiten deutlich zu erkennen (Abb. 14). Besondere Formabweichungen der Oberfläche, wie z.B. Porositäten, Lufteinschlüsse oder aus der Matrix herausgerissene Füllpartikel können hiermit im REM dargestellt werden. Solche Formabweichungen werden bei der Rauheitsmessung des Oberflächenprofils aufgrund der integrierten Filterung nur ungenügend berücksichtigt.

Für die rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen wählte man folgende Einstellungen:

- Spannung: 25 kV
- Emission: 2 μ A
- Blende: 400 μ m
- Spot-Size: 0,125 μ m
- Line-Time: 32 ms
- Vergrößerungsfaktor: 80

Der Vergrößerungsfaktor 80 nimmt Bezug auf die digitale Anzeige am PSEM 500 (Abb. 13). Zur tatsächlichen Vergrößerung der hier gezeigten Aufnahmen führte die jeweilige Nachvergrößerung der Negative.

Als Filmmaterial kam in dieser Arbeit der Negativfilm T-Max 100 (Kodak, Rochester, USA) zur Anwendung.

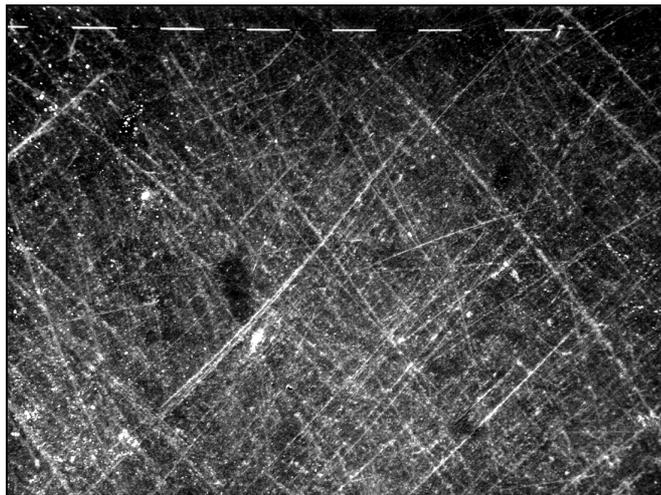


Abb. 14: Beispiel für eine Filtek Supreme-Oberfläche nach Bearbeitung mit Sof-Lex Scheiben (RG) bei 80-facher Monitorvergrößerung am PSEM 500; die Länge eines Balkens entspricht 100 μ m.

3.6.2.3 Deskriptive Beurteilung und Auswertung der REM-Aufnahmen

Zur Evaluierung der Rauheit der finierten Prüfkörper wurden photographische Abzüge der rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen in der Größe 16 cm x 12 cm angefertigt. Um eine möglichst genaue Oberflächenbewertung vornehmen zu können, wurde jedes dieser Fotos durch Überlagerung eines Rasters in 96 Felder der Größe 2 cm x 1 cm unterteilt und jedes einzelne Rasterfeld rein deskriptiv einem der folgenden vier qualitativen Merkmale zugeordnet:

- Merkmal 1: Oberfläche glatt/homogen, d.h. keinerlei Bearbeitungsspuren erkennbar
- Merkmal 2: Mittlere Rauigkeiten, d.h. seltene oder gering ausgeprägte Riefenbildung, einzelne Unregelmäßigkeiten
- Merkmal 3: Starke Rauigkeiten, d.h. zahlreiche oder stark ausgeprägte Riefen
- Merkmal 4: Oberflächendestruktionen erkennbar, d.h. die Profilunregelmäßigkeiten erscheinen größer und tiefer als die Korngröße des Schleifkörpers, die Oberflächenkontinuität ist unterbrochen

Vor Beginn der Auswertung der Abzüge wurden die beiden Testpersonen im Hinblick auf die qualitative Beurteilung der Oberflächen kalibriert.

Die definitive Evaluierung der Oberflächen wurde von beiden Testpersonen unabhängig voneinander und verblindet durchgeführt, d.h. ohne Kenntnis der zugrunde liegenden Kombination aus Kompositsorte und Bearbeitungsverfahren.

Abschließend konnte der prozentuale Anteil eines bestimmten Merkmals an der Gesamtoberfläche angegeben werden, indem die Anzahl der Felder ermittelt wurde, die dem betreffenden Kriterium zugeordnet war.

4 Ergebnisse

4.1 Profilographische Befunde

Zu Beginn dieses Kapitels sei angemerkt, dass sowohl alle Einzelmessergebnisse und Mittelwerte als auch alle Details der statistischen Auswertung im Anhang vermerkt sind.

Eine zweifaktorielle Varianzanalyse zeigte hinsichtlich beider Oberflächenparameter R_a und LR signifikante Unterschiede sowohl zwischen den verschiedenen Materialien als auch zwischen den unterschiedlichen Ausarbeitungsverfahren ($p < 0,001$). Zudem waren signifikante Wechselwirkungen zwischen den Werkstoffen und den Bearbeitungsmethoden nachweisbar ($p < 0,001$). Die Bearbeitungsverfahren wirkten sich also unterschiedlich auf die fünf verschiedenen Komposite aus.

Bei vergleichender Betrachtung der Gesamtmittelwerte jedes einzelnen Komposites nach Anwendung der vier Bearbeitungsverfahren weist *Premise* die geringsten Rauigkeiten sowohl in Bezug auf R_a als auch LR auf ($R_a = 0,933 \mu\text{m}$; $LR = 1,340$; Abb. 15 a, b). Dabei war der R_a -Wert von *Premise* signifikant kleiner als die der Komposite *Herculite XR*V und *Ceram X Duo* ($p < 0,001$), der LR-Wert dagegen signifikant geringer als der aller übrigen Materialien ($p \leq 0,039$). Die Oberflächen der *Herculite XR*V-Prüfkörper wiesen die größten R_a -Werte auf ($R_a = 1,101 \mu\text{m}$), wobei Signifikanzen zu den weiteren Kompositen mit Ausnahme von *Ceram X Duo* zu verzeichnen waren ($p < 0,001$). Für *Ceram X Duo*-Oberflächen ergaben sich die höchsten LR-Werte ($LR = 1,528$), wobei hier signifikante Unterschiede zu den anderen Werkstoffen bis auf *Herculite XR*V vorlagen ($p < 0,001$).

Betrachtet man die Gesamtmittelwerte jedes einzelnen Bearbeitungsverfahrens über alle Komposite, hinterließ der 30 μm Diamantfinierer (AV1) sowohl in Bezug auf R_a als auch LR die signifikant rauhesten Oberflächen ($R_a = 2,012 \mu\text{m}$; $LR = 1,581$; $p < 0,001$; Abb. 16 a, b).

Nach Anwendung von zwei Diamantfinierern (AV2) war eine deutliche Reduktion des Profillängenverhältnisses sowie des arithmetischen Mittenrauhwertes feststellbar. Alle Paarvergleiche zwischen der Kombination eines 30 μm und eines 20 μm Diamantfinierers (AV2) einerseits und den übrigen Bearbeitungsverfahren andererseits lieferten signifikante Unterschiede ($p < 0,001$).

Durch die zusätzliche Anwendung eines Hartmetallfinierers (AV3) kam es zu den geringsten Rauigkeiten ($R_a = 0,538 \mu\text{m}$; $LR = 1,302$), wobei hinsichtlich beider Oberflächenparameter signifikante Unterschiede zu einem sowie zwei Diamantfinierern (AV1, AV2) bestanden ($p < 0,001$), nicht aber zu den flexiblen Scheiben (R_a : $p = 0,442$ und LR : $p = 0,996$).

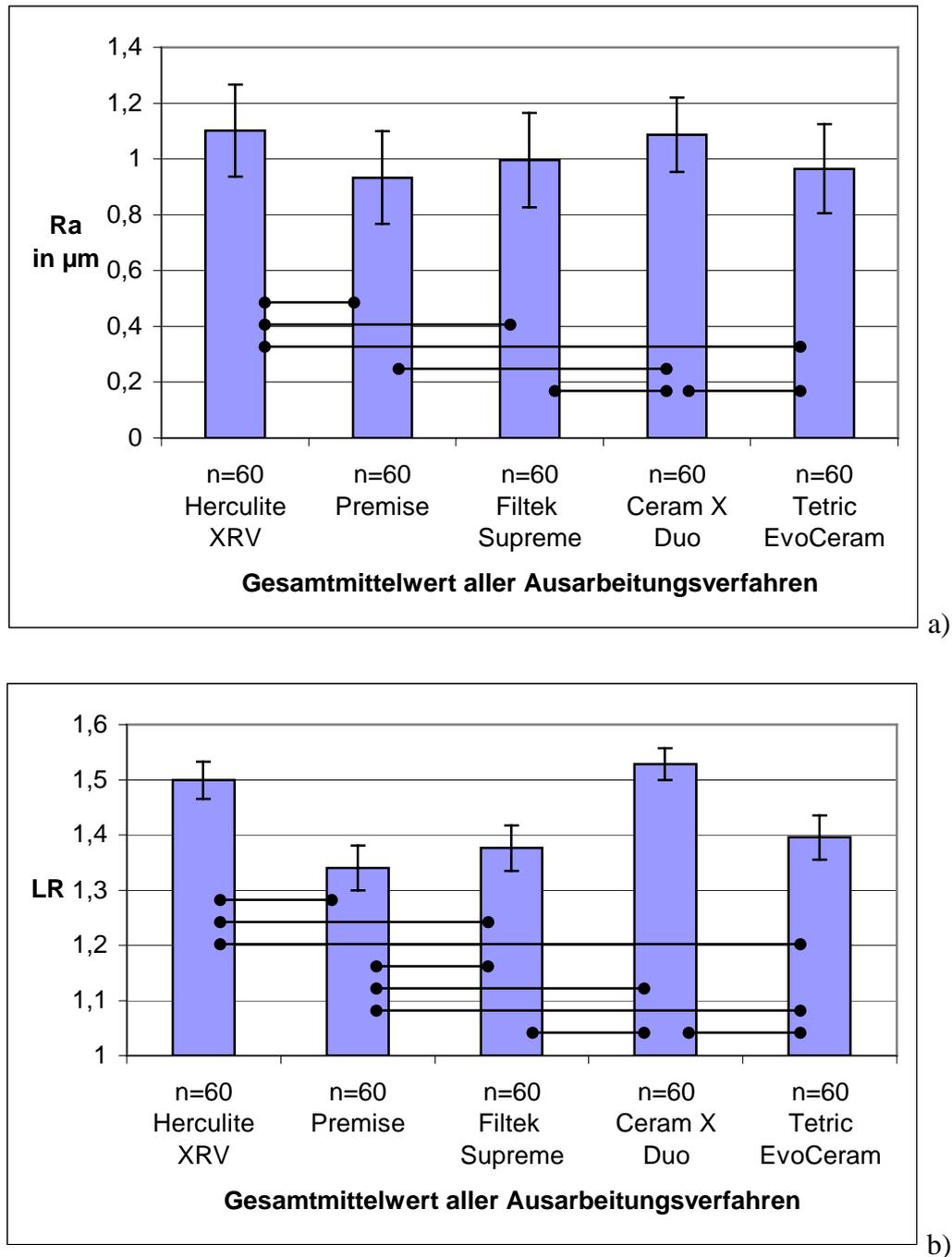


Abb. 15: Arithmetischer Mittenrauhwert R_a (a) sowie Profillängenverhältnis LR (b) der fünf verschiedenen Composite jeweils gemittelt über die vier Ausarbeitungsverfahren (AV1 – AV3, RG); (MW mit 95% Konfidenzintervall). Die horizontalen Balken kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p < 0,05$).

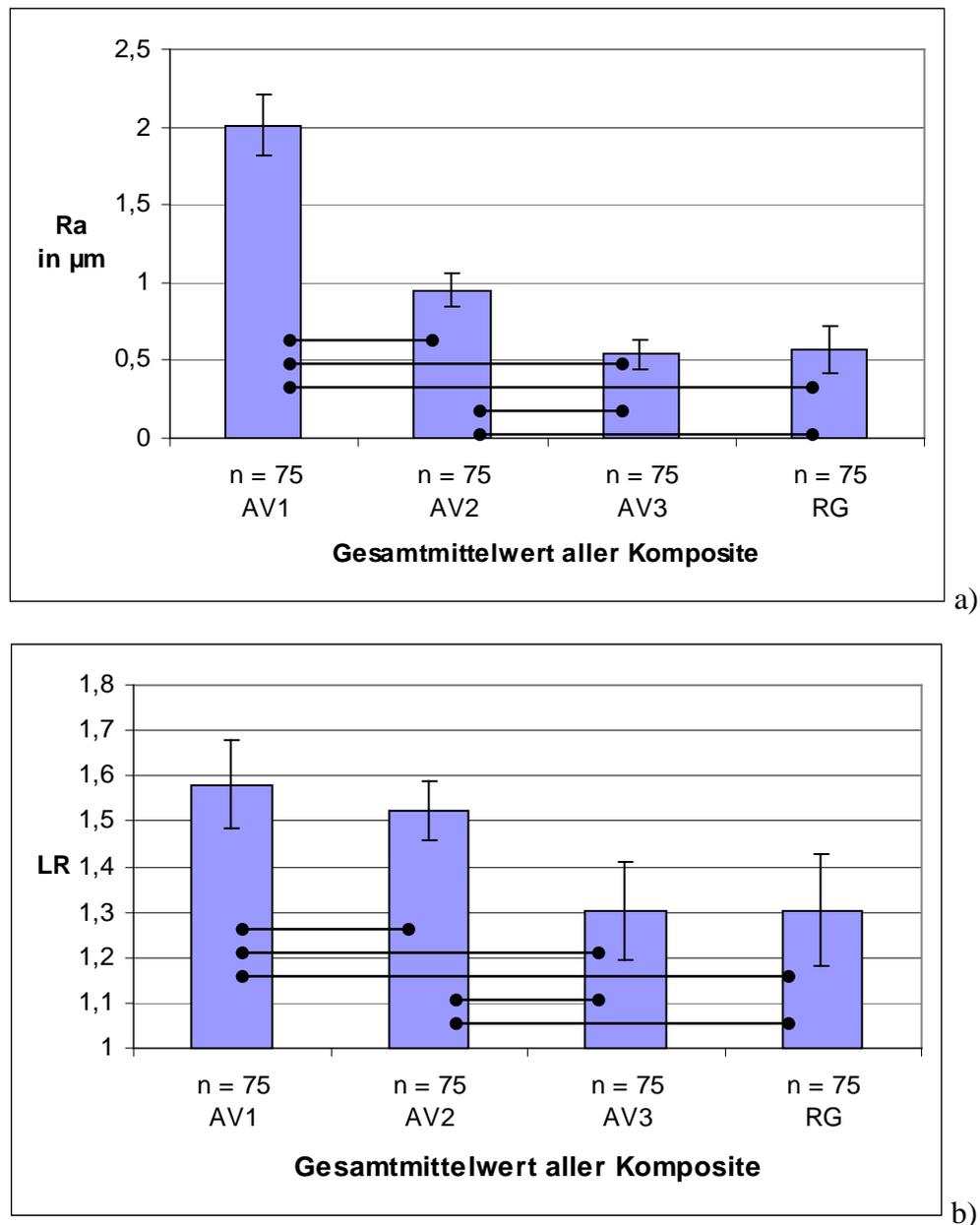


Abb. 16: Arithmetischer Mittenrauhwert R_a (a) sowie Profilflächenverhältnis LR (b) der vier verschiedenen Bearbeitungsverfahren AV1 – AV3 und RG jeweils gemittelt über die fünf Komposite; ($MW \pm SA$). Die horizontalen Balken kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p < 0,05$).

AV1: 30 μm Diamantfinierer; AV2: 30 μm und 20 μm Diamantfinierer; AV3: 30 μm Diamant- und Hartmetallfinierer; RG: dreifach abgestufte Sof-Lex Scheiben

Da sich bezüglich R_a sowie LR sowohl der signifikante Einfluss der Materialien und Ausarbeitungsverfahren auf die Rauigkeit als auch signifikante Wechselwirkungen zwischen diesen beiden Faktoren feststellen ließen ($p < 0,001$), sollen im Folgenden die unterschiedlichen Ausarbeitungsverfahren sowie die verschiedenen Materialien getrennt betrachtet werden.

4.1.1 Einfluss der Bearbeitungsverfahren

4.1.1.1 Vergleichende Betrachtung der unterschiedlichen Bearbeitungsverfahren anhand des arithmetischen Mittenrauhwertes

Ungeachtet des jeweils zugrundeliegenden Kompositmaterials wiesen Prüfkörper nach Einsatz des 30 μm Diamantfinierers (AV1) die größten R_a -Werte auf (Abb. 17). Dabei stellten sich bei allen fünf Werkstoffen signifikante Differenzen im Vergleich zu den übrigen Methoden dar ($p < 0,001$). Die Messergebnisse für R_a lagen zwischen 1,923 μm (*Ceram X Duo*) und 2,142 μm (*Herculite XRV*).

Eine deutliche Reduktion der R_a -Werte wurden unabhängig vom benutzten Komposit nach weiterer Bearbeitung mit einem 20 μm Finierdiamanten (AV2) gemessen (zwischen 0,863 μm bei *Teric EvoCeram* und 1,025 μm bei *Ceram X Duo*) und entsprachen etwa der Hälfte des jeweiligen R_a -Wertes nach Anwendung von AV1. Sämtliche Unterschiede zwischen AV2 und den übrigen Verfahren waren signifikant ($p < 0,001$).

Durch die zusätzliche Anwendung eines Hartmetallfinierers (AV3) sowie durch den Einsatz der zum Vergleich getesteten *Sof-Lex* Scheiben in drei verschiedenen Korngrößen (RG) waren signifikant geringere R_a -Werte als nach Anwendung eines 30 μm Diamantfinierers (AV1) sowie nach Ausarbeitung mit zwei Finierdiamanten (AV2) zu erreichen ($p < 0,001$). So reduzierten sich die R_a -Werte nach Bearbeitung mit einem Hartmetallfinierer (AV3) bzw. mit flexiblen Scheiben (RG) bei *Ceram X Duo* sowie *Herculite XRV* auf etwa ein Drittel und bei *Premise*, *Filtek Supreme* sowie *Tetric EvoCeram* sogar auf etwa ein Viertel des jeweiligen R_a -Wertes gemessen nach alleiniger Ausarbeitung mit einem groben Diamantfinierer (AV1). Die Differenzen zwischen den beiden Bearbeitungsmethoden Hartmetallfinierer (AV3) und flexible Scheiben (RG) fielen bei allen Werkstoffen gering aus und waren in ihrer Ausprägung vom jeweils zugrundeliegenden Kompositmaterial abhängig. Lediglich für das Komposit *Ceram X Duo* waren die Unterschiede nach Anwendung eines Hartmetallfinierers (AV3) bzw. flexibler Scheiben (RG) statistisch signifikant ($p = 0,007$); hier erzielte der Hartmetallfinierer die deutlich niedrigeren Rauhtiefen.

Insgesamt lagen die resultierenden R_a -Werte nach AV3 zwischen 0,429 μm (*Premise*) und 0,641 μm (*Ceram X Duo*), nach RG zwischen 0,412 μm (*Premise*) und 0,761 μm (*Ceram X Duo*).

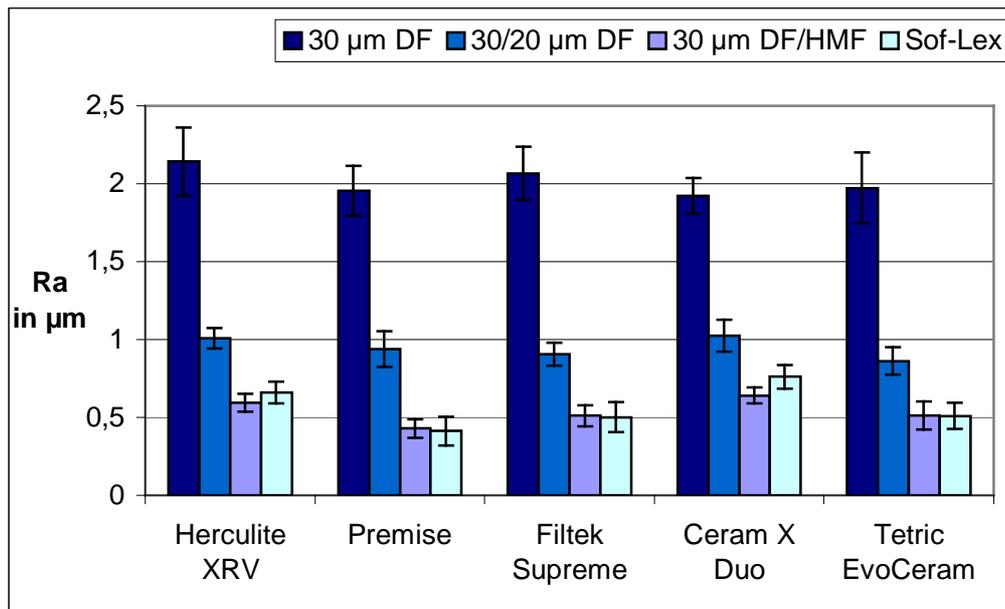


Abb. 17: Arithmetischer Mittenrauhwert R_a von fünf verschiedenen Kompositen nach Anwendung unterschiedlicher Verfahren zur Bearbeitung (AV1 – AV3, RG); (MW \pm SA; $n = 15$ pro Säule)

DF: Diamantfinierer; HMF: Hartmetallfinierer

4.1.1.2 Vergleichende Betrachtung der unterschiedlichen Bearbeitungsverfahren anhand des Profillängenverhältnisses

Hinsichtlich des Oberflächenparameters LR zeigten sich - mit Ausnahme des Hartmetallfinierers (AV3) im Vergleich zu den flexiblen Scheiben (AV4) - signifikante Unterschiede zwischen den vier verschiedenen Bearbeitungsverfahren ($p < 0,001$).

Die mit dem groben Diamantfinierer bearbeiteten Oberflächen (AV1) stellten sich nach Analyse der LR-Werte bis auf eine Ausnahme (*Premise*) als die rauhesten dar (Abb. 18). Lediglich die Unterschiede der LR-Werte nach Anwendung von AV1 im Vergleich zu denen nach Bearbeitung gemäß AV3 und RG waren für alle Komposite statistisch signifikant ($p < 0,001$). Zwischen AV1 und AV2 waren für *Premise* bzw. *Filtek Supreme* keine signifikanten Unterschiede zu verzeichnen ($p = 0,558$ bzw. $0,274$). Anders als bei den übrigen Kompositen konnte dabei bei *Premise* nach Anwendung eines Finierdiamanten (AV1) ein niedrigeres Profillängenverhältnis gemessen werden als nach zwei Diamantschleifkörpern (AV2). Die LR-Werte befanden sich nach Anwendung von AV1 insgesamt zwischen 1,474 (*Premise*) und 1,657 (*Ceram X Duo*).

Das zweite Ausarbeitsverfahren (AV2) konnte bis auf *Premise* eine Reduktion des Profillängenverhältnisses innerhalb jedes einzelnen Kompositmaterials verzeichnen. Unterschiede zwischen AV2 und den Methoden AV3 bzw. RG bezüglich LR waren bei

allen Werkstoffen statistisch signifikant ($p < 0,001$). Die LR-Werten lagen nach Bearbeitung mit zwei Diamantinstrumenten zwischen 1,486 bei *Tetric EvoCeram* und 1,569 bei *Ceram X Duo*.

Für alle untersuchten Materialien waren hierbei jedoch die Unterschiede zwischen den LR-Werten nach Bearbeitung gemäß AV3 und RG statistisch nicht signifikant. Die Resultate für das Profillängenverhältnis lagen nach AV3 zwischen 1,177 (*Premise*) und 1,436 (*Ceram X Duo*), nach RG zwischen 1,208 (*Premise*) und 1,452 (*Ceram X Duo*).

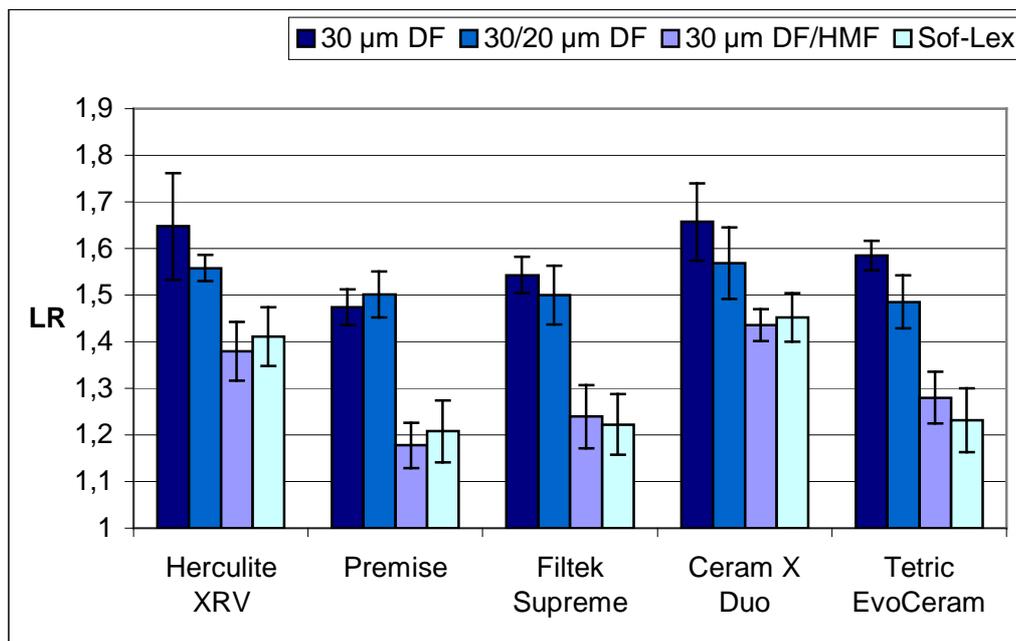


Abb. 18: Profillängenverhältnis LR von fünf verschiedenen Kompositen nach Anwendung unterschiedlicher Verfahren zur Bearbeitung (AV1 – AV3, RG); (MW \pm SA; $n = 15$ pro Säule)

DF: Diamantfinierer; HMF: Hartmetallfinierer

4.1.2 Einfluss der Kompositmaterialien

4.1.2.1 Vergleichende Betrachtung der verschiedenen Materialien anhand des arithmetischen Mittenrauhwertes

Eine vergleichende Betrachtung der fünf Komposite nach Bearbeitung mit einem 30 µm Finierdiamanten (AV1) zeigte, dass die Differenzen zwischen den verschiedenen Oberflächen in Bezug auf den arithmetischen Mittenrauhwert gering ausfielen (Abb. 19), wobei *Ceram X Duo* mit $R_a = 1,923$ µm den niedrigsten Mittenrauhwert aufwies. Lediglich

zwischen *Ceram X Duo* und *Herculite XRV* ($R_a = 2,142 \mu\text{m}$) bestanden nach AV1 signifikante Unterschiede ($p = 0,037$).

Anders verhielt es sich nach zusätzlicher Ausarbeitung mit einem $20 \mu\text{m}$ Finierdiamanten (AV2). Hier waren die Differenzen zwar ebenfalls gering (zwischen $0,863 \mu\text{m}$ bei *Tetric EvoCeram* und $1,025 \mu\text{m}$ bei *Ceram X Duo*), jedoch waren sowohl zwischen *Herculite XRV* und *Tetric EvoCeram* ($p = 0,001$) bzw. zwischen *Filtek Supreme* und *Ceram X Duo* ($p = 0,018$) als auch zwischen *Ceram X Duo* und *Tetric EvoCeram* ($p < 0,001$) signifikante Unterschiede bezüglich der Oberflächenrauigkeit zu verzeichnen.

Nach dem Bearbeiten mit einem Hartmetallfinierer (AV3) sowie nach der Anwendung flexibler Scheiben (RG) fiel für den Parameter R_a eine bei beiden Bearbeitungsmethoden identische Einordnung der fünf Werkstoffe nach der Rauigkeit auf. Beginnend mit dem Material mit dem kleinsten LR-Wert war diese Staffelung *Premise*, *Filtek Supreme*, *Tetric EvoCeram*, *Herculite XRV*, *Ceram X Duo*. Die glattesten Oberflächen lieferte *Premise* mit $R_a = 0,429 \mu\text{m}$ bei AV3 bzw. $0,412 \mu\text{m}$ bei RG. Dabei waren die Differenzen zwischen *Premise* und den vier weiteren Werkstoffen bei beiden Bearbeitungsverfahren – mit Ausnahme von *Filtek Supreme* bei RG – signifikant ($p \leq 0,03$). Die höchsten Mittenrauhwerte wurden bei beiden Methoden wiederholt bei *Ceram X Duo* gemessen ($R_a = 0,641 \mu\text{m}$ bei AV3 bzw. $0,761 \mu\text{m}$ bei RG). Die Unterschiede zwischen *Ceram X Duo* und den übrigen Materialien waren bei AV3 und RG bis auf *Herculite XRV* nach AV3 von statistischer Signifikanz ($p \leq 0,035$).

Es ist als bemerkenswert hervorzuheben, dass bei den Kompositen *Ceram X Duo* sowie *Herculite XRV* der Hartmetallfinierer in Kombination mit dem groben Finierdiamanten (AV3) geringere R_a -Werte erzielte als die *Sof-Lex* Disks (RG), während sich dieser Sachverhalt bei den übrigen drei Materialien umkehrte. Lediglich für das Komposit *Ceram X Duo* waren dabei die Unterschiede statistisch signifikant ($p = 0,007$).

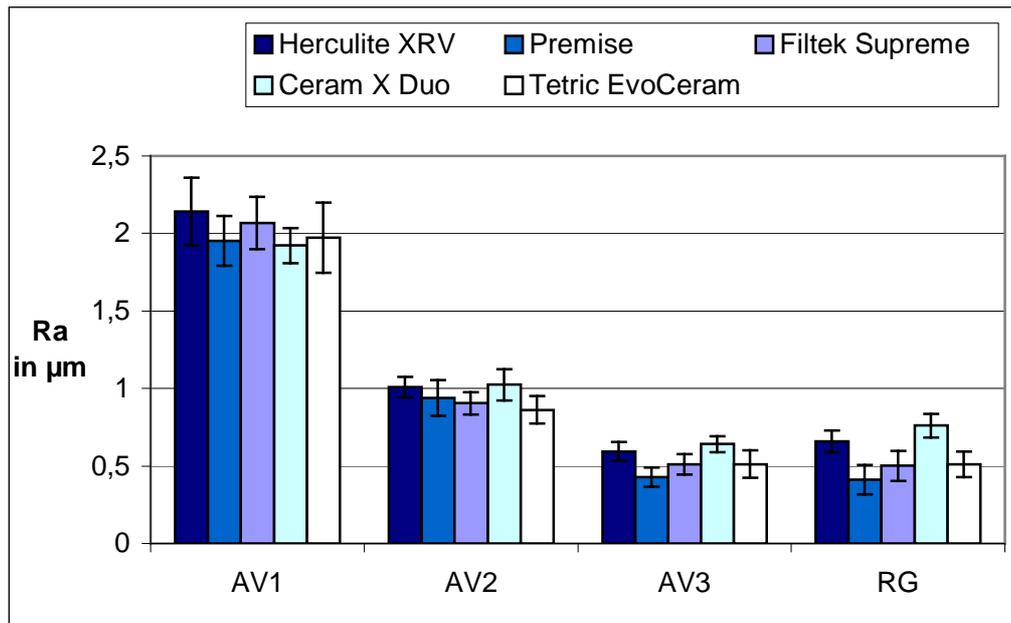


Abb. 19: Arithmetischer Mittenrauhwert R_a nach unterschiedlicher Bearbeitung von fünf verschiedenen Kompositen; (MW \pm SA; $n = 15$ pro Säule)
 AV1: 30 μm Diamantfinierer; AV2: 30 μm und 20 μm Diamantfinierer; AV3: 30 μm Diamant- und Hartmetallfinierer; RG: dreifach abgestufte Sof-Lex Scheiben

4.1.2.2 Vergleichende Betrachtung der verschiedenen Materialien anhand des Profillängenverhältnisses

Nach Ausarbeitung mit einem 30 μm Finierdiamanten (AV1) wies *Premise* den niedrigsten LR-Wert (LR = 1,474) auf (Abb. 20). Im Vergleich zu *Herculite XRV* (LR = 1,647), *Ceram X Duo* (LR = 1,657) und *Tetric EvoCeram* (LR = 1,585) konnten signifikante Unterschiede festgestellt werden ($p \leq 0,002$). Das Ergebnis mit dem höchsten LR-Wert war hier bei *Ceram X Duo* nachzuweisen, wobei Signifikanzen neben *Premise* nur zu *Filtek Supreme* (LR = 1,543) bestanden ($p \leq 0,001$).

Nach Einsatz von zwei Diamantfinierern (AV2) zeigten *Tetric EvoCeram*-Prüfkörper mit einem LR-Wert von 1,486 die geringsten Rauigkeiten im Vergleich zu den übrigen Werkstoffen. Signifikante Differenzen stellten sich dabei lediglich zu *Herculite XRV* und *Ceram X Duo* ein ($p \leq 0,024$). Die rauhesten Oberflächen konnten wiederholt bei *Ceram X Duo* festgestellt werden (LR = 1,569). Die Unterschiede erwiesen sich für alle möglichen Paarvergleiche zwischen *Ceram X Duo* einerseits und *Premise*, *Filtek Supreme* und *Tetric EvoCeram* andererseits als signifikant ($p \leq 0,044$).

Bei Analyse der LR-Werte nach Bearbeitung der Kompositoberflächen mit einem Hartmetallfinierer (AV3) sowie nach der Anwendung flexibler Scheiben (RG) wurden bei beiden Methoden auf *Premise*-Oberflächen die niedrigsten Werte gemessen (LR = 1,177

bei AV3; LR = 1,208 bei RG) und bei *Ceram X Duo* wiederholt die höchsten (LR = 1,436 bei AV3; LR = 1,452 bei RG). Die Unterschiede zwischen *Premise* und den vier weiteren Kompositen bis auf *Filtek Supreme* waren dabei nach AV3 und nach RG – mit Ausnahme von *Tetric EvoCeram* nach RG – von statistischer Signifikanz ($p < 0,001$). Die Differenzen zwischen *Ceram X Duo* und den übrigen Werkstoffen bis auf *Herculite XRV* waren sowohl bei AV3 als auch bei RG signifikant ($p < 0,001$). Bezüglich LR war nach beiden Verfahren AV3 und RG dieselbe Einordnung der fünf Komposite nach der Rauigkeit erkennbar, wie sie bereits hinsichtlich R_a beschrieben wurde.

Bemerkenswert ist, dass auch im Hinblick auf die LR-Werte bei den Materialien *Ceram X Duo* und *Herculite XRV* der Hartmetallfinierer in Kombination mit dem groben Finierdiamanten (AV3) die Güte einer mit sehr feinen *Sof-Lex* Scheiben geglätteten Oberfläche erreichte. In Bezug auf das Profillängenverhältnis ist an dieser Stelle zusätzlich der Werkstoff *Premise* zu nennen. Bei *Filtek Supreme* und *Tetric EvoCeram* dagegen führte der Einsatz flexibler Scheiben zu den niedrigsten LR-Werten. Für keines der fünf Komposite bestanden dabei Signifikanzen zwischen den LR-Werten nach Anwendung eines Hartmetallfinierers (AV3) bzw. flexibler Scheiben (RG).

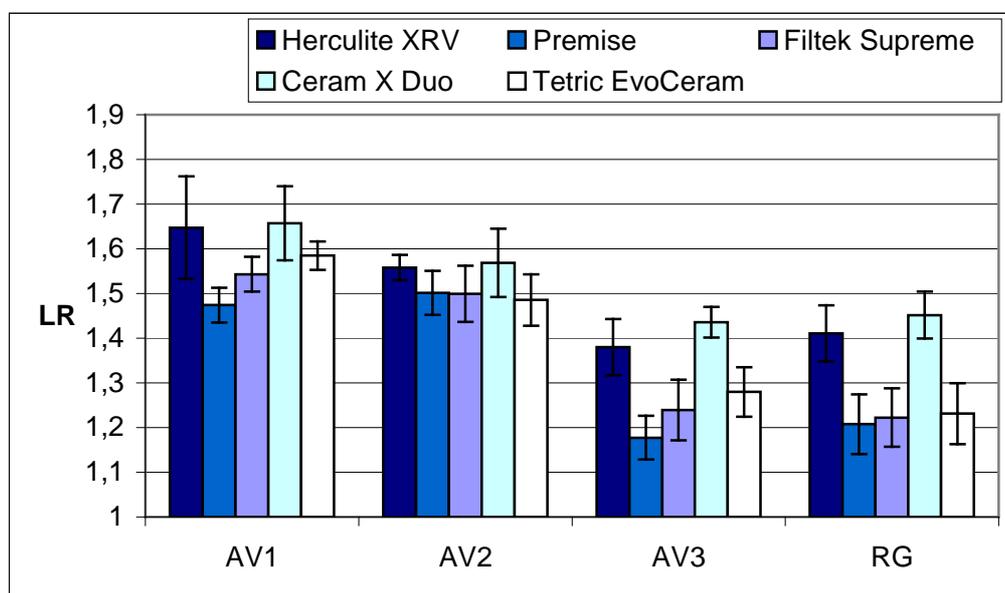


Abb. 20: Profillängenverhältnis LR nach unterschiedlicher Bearbeitung von fünf verschiedenen Kompositen; (MW \pm SA; $n = 15$ pro Säule)

AV1: 30 μ m Diamantfinierer; AV2: 30 μ m und 20 μ m Diamantfinierer; AV3: 30 μ m Diamant- und Hartmetallfinierer; RG: dreifach abgestufte *Sof-Lex* Scheiben

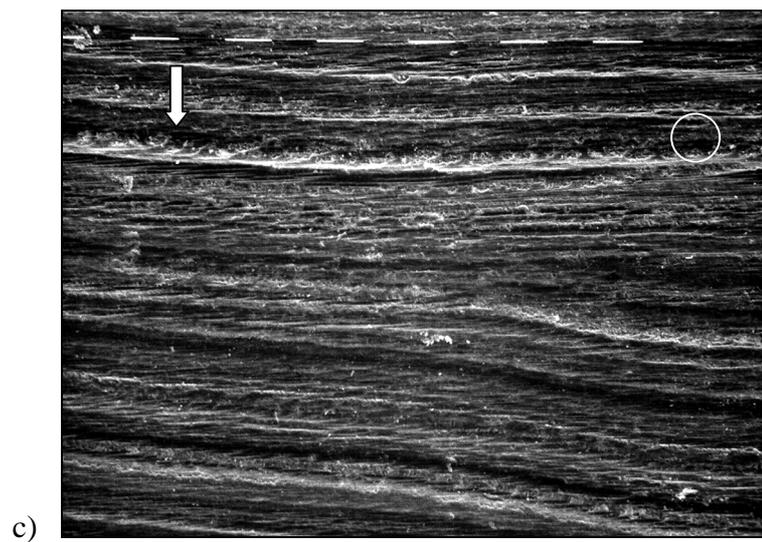
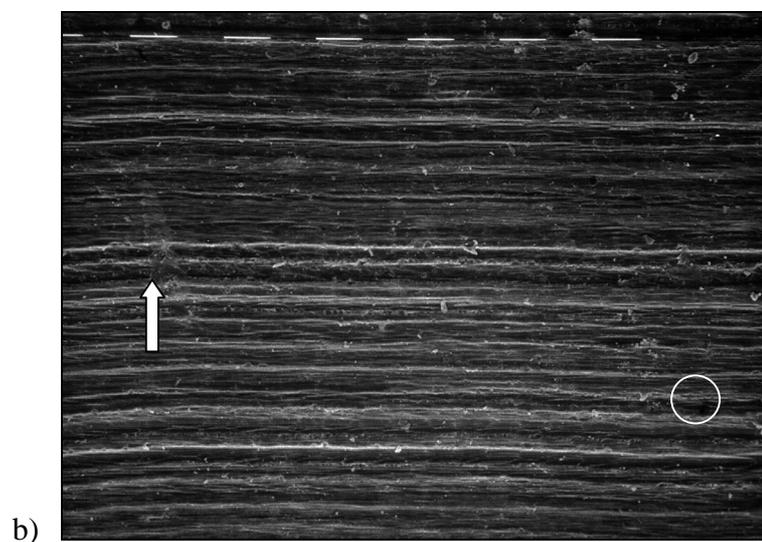
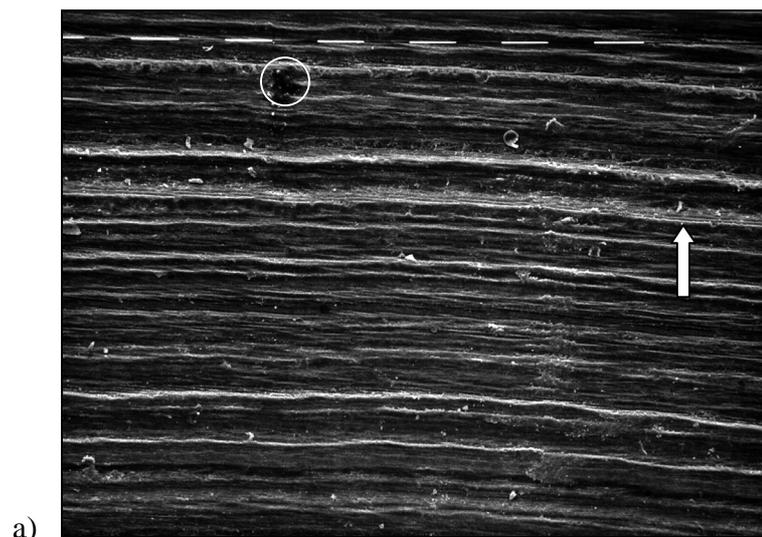
4.1 Rasterelektronenmikroskopische Befunde

4.2.1 Deskriptive Beurteilung der rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen

Anhand der folgenden Auswahl an REM-Bildern sollen die verschiedenen Oberflächencharakteristiken der unterschiedlichen Komposite exemplarisch dargestellt werden. Es sei angemerkt, dass alle in der vorliegenden Studie angefertigten REM-Aufnahmen dieselbe Monitorvergrößerung (80-fach) sowie die gleiche Orientierung zum rotierenden Instrument aufwiesen.

4.2.1.1 Kompositoberflächen im REM nach Ausarbeitung mit AV1

Betrachtet man im REM die Oberflächen nach Bearbeitung mit einem 30 µm Diamantfinierer, so fallen bei allen fünf Kompositosorten neben vereinzelt Destruktionen und Porositäten weitestgehend sehr raue Areale auf. Diese wurden bestimmt durch die für den eingesetzten Diamantfinierer charakteristischen Riefen auf den Kompositoberflächen (Abb. 21 a-e), welche grundsätzlich parallel zur Bearbeitungsrichtung verliefen. Die Orientierung der Riefen war bei allen Kompositmaterialien gleich, nicht aber deren Ausprägung und das Vorkommen von Destruktionen. *Premise* wies annähernd gleichmäßig tiefe Riefen auf sowie gering ausfallende Destruktionsspuren (Abb. 21 b). Alle anderen Komposite zeigten hingegen unterschiedliche Ausprägungen der Bearbeitungsriefen sowie breitere und gleichzeitig tiefere Destruktionsspuren als *Premise*. Auf allen Kompositoberflächen ließen sich vereinzelt Unregelmäßigkeiten finden, welche auf Porositäten hinwiesen. Dass es sich hierbei – genau wie nach Anwendung der übrigen Bearbeitungsverfahren – nicht um dislozierte Füllerpartikel handelt sondern um Porositäten, macht eine stark vergrößerte REM-Aufnahme solcher Unregelmäßigkeiten deutlich (Abb. 21 f). In der vorliegenden Arbeit sind grundsätzlich keine dislozierten Füllerpartikel beobachtet worden.



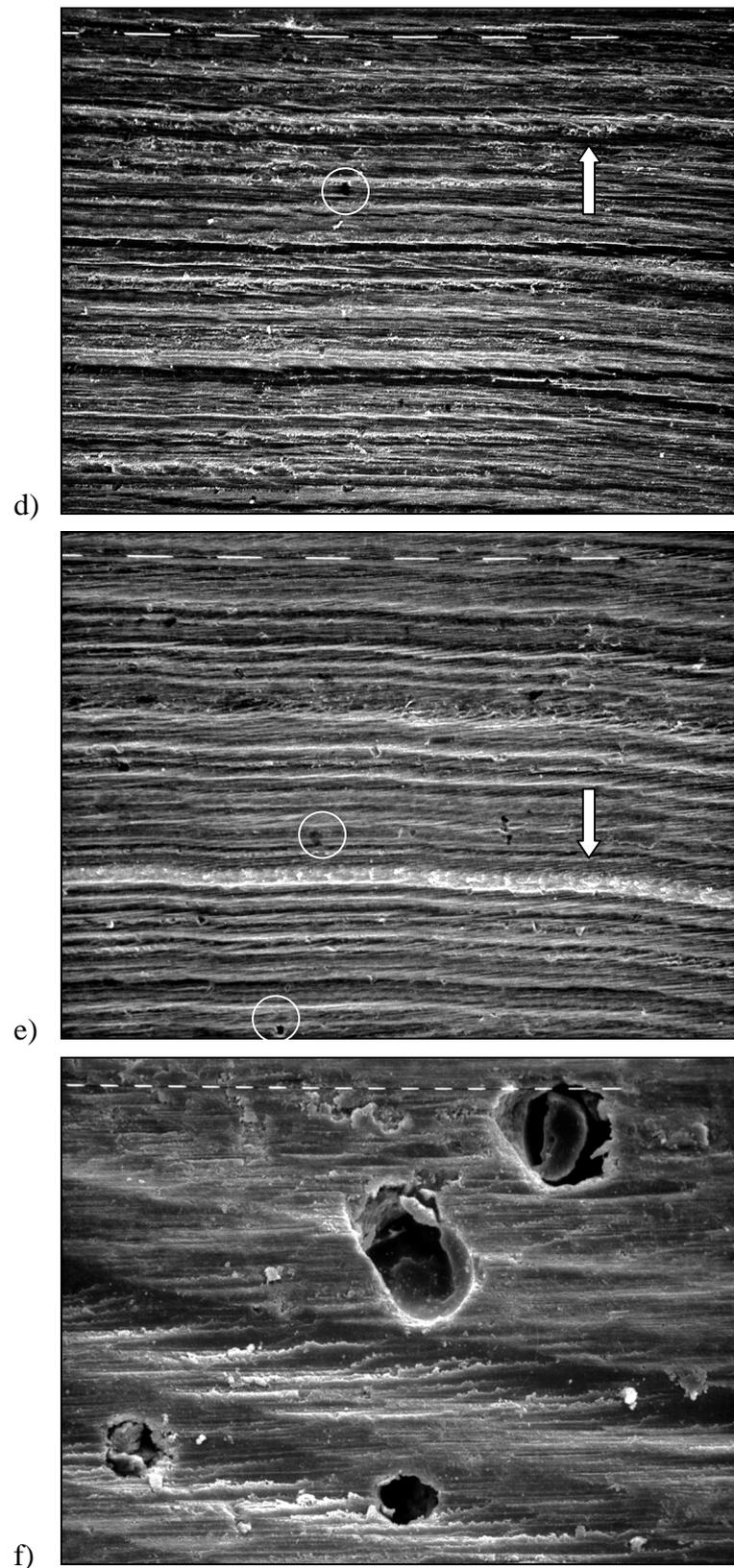
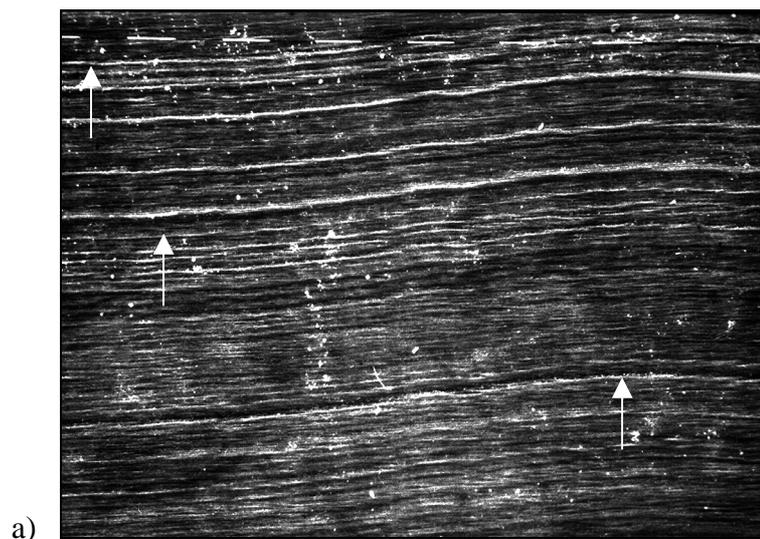


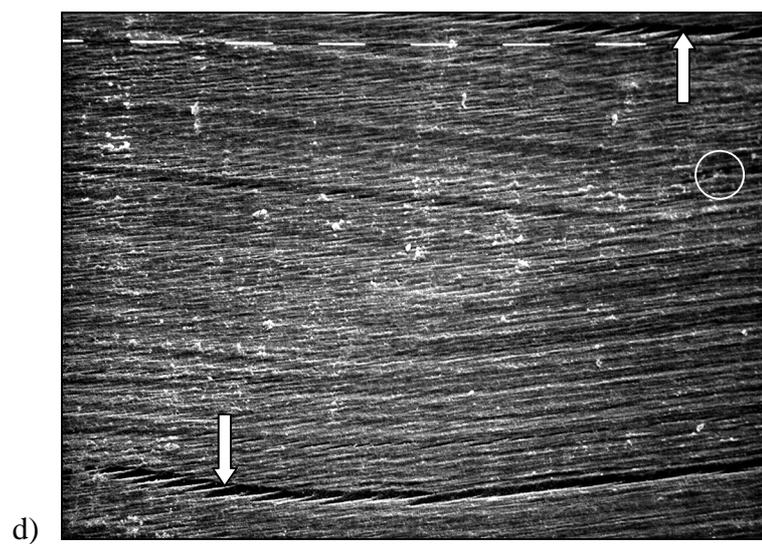
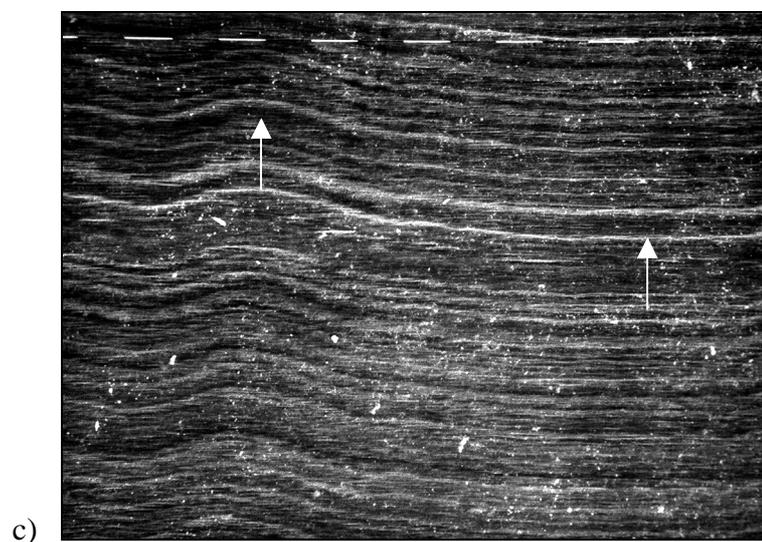
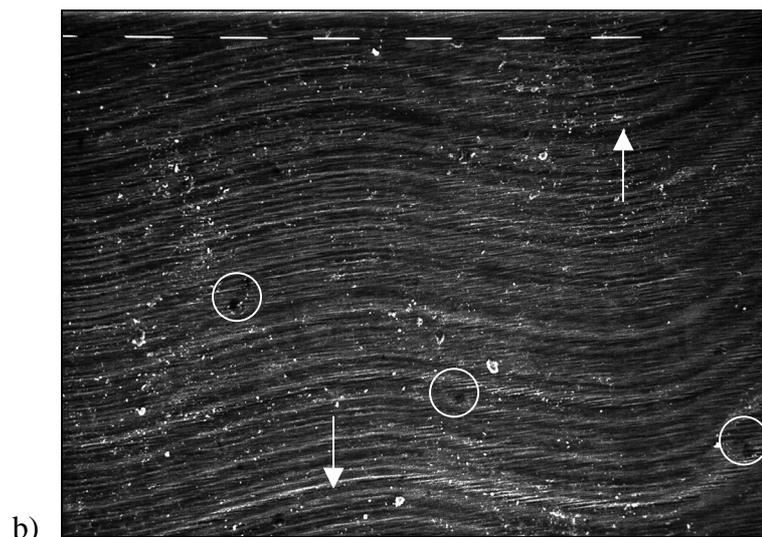
Abb. 21

- a) – e) REM-Aufnahmen der Oberflächen der Composite Herculite XRV (a), Premise (b), Filtek Supreme (c), Ceram X Duo (d), Tetric EvoCeram (e) nach Bearbeitung mit einem 30 μm Diamantfinierer (AV1). Pfeile zeigen mögliche Destruktionen, Kreise weisen auf Porositäten hin; die Länge eines Balkens entspricht 100 μm .
- f) Porositäten auf der Oberfläche eines Tetric EvoCeram-Prüfkörpers bei näherer Betrachtung; die Länge eines Balkens entspricht hier 10 μm .

4.2.1.2 Kompositoberflächen im REM nach Ausarbeitung mit AV2

Der Einsatz eines zweiten Diamantfinierers mit 20 µm Körnung führte bei allen Kompositmaterialien zu einer deutlichen Verfeinerung der Oberflächen im Vergleich zur Ausarbeitung nach AV1 (Abb. 22 a-e). So weisen die mit beiden Diamantfinierern bearbeiteten Probenflächen neben Arealen mit ausgeprägten Riefen auch solche mit nur wenigen tieferen Riefen auf. Die Riefenrichtung war erneut parallel zur Rotationsrichtung der Instrumente. Bei allen Kompositen nahm die Anzahl der Profilunregelmäßigkeiten bei gleichzeitig verringerter Ausprägung zu. Allen Kompositmaterialien war gemeinsam, dass im Anschluss an AV2 vereinzelt noch mehr oder weniger tiefe Riefen des ersten, größeren Diamantfinierers erkennbar waren, welche der zweite Finierer mit feinerer Körnung nicht vollständig zu entfernen vermochte. Dabei ließ *Premise*, wie auch schon nach Ausarbeitung mit AV1 aufgefallen war, eine recht gleichmäßige Oberflächengestaltung erkennen, bei der die verbliebenen Spuren des ersten Diamantschleifkörpers wesentlich geringer als bei den anderen vier Kompositen ausfielen (Abb. 22 b). Destruktive Effekte waren nach AV2 auf Oberflächen der Komposite *Premise*, *Filtek Supreme*, *Ceram X Duo* und *Tetric EvoCeram* in geringer Ausprägung feststellbar. Insbesondere bei *Ceram X Duo* erkennt man eindeutig die unterbrochene Oberflächenkontinuität auf der jeweiligen Probenoberfläche (Abb. 22 d). Bei den Prüfkörpern der Komposite *Premise*, *Ceram X Duo* und *Tetric EvoCeram* ließen sich vereinzelt Unregelmäßigkeiten auf der bearbeiteten Oberflächen erkennen, welche wiederum von Porositäten stammen könnten.





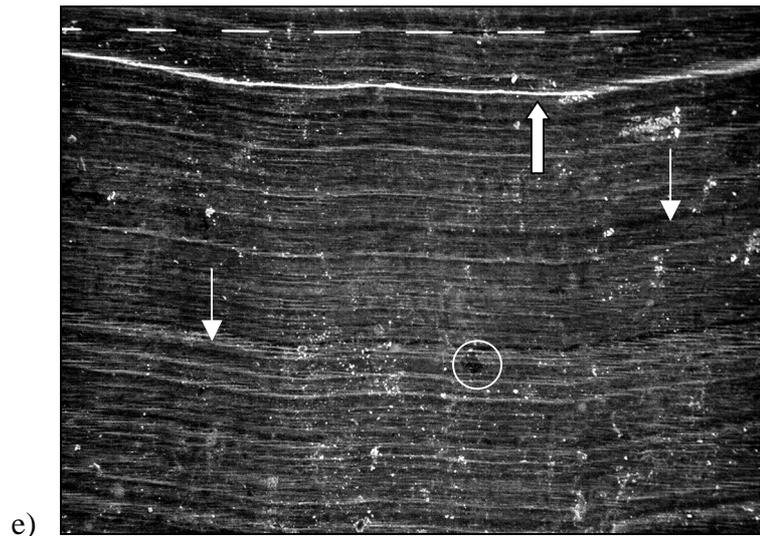
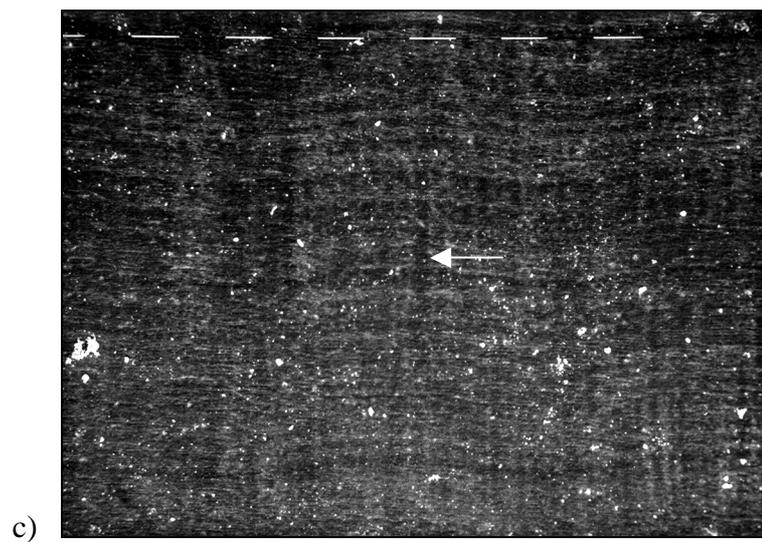
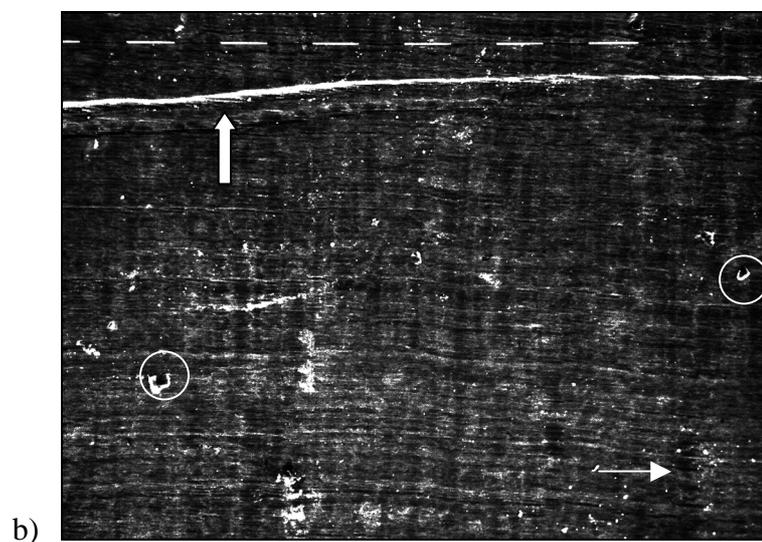
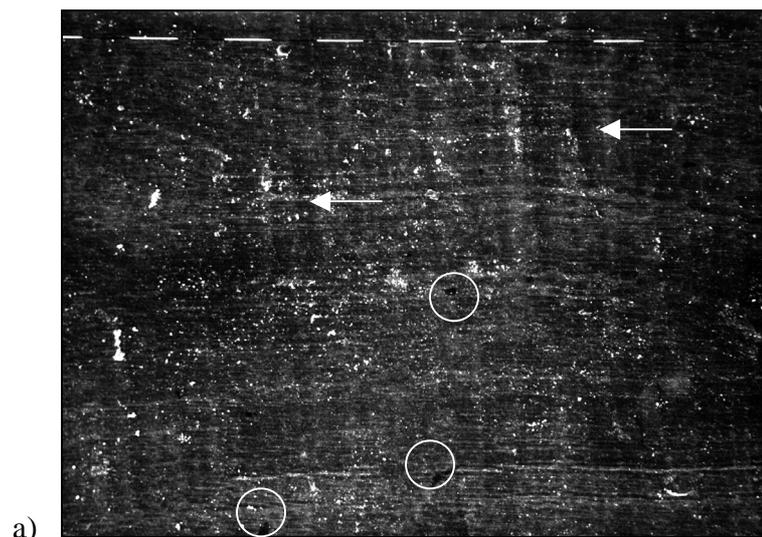


Abb. 22: REM-Aufnahmen der Oberflächen der Komposite *Herculite XRV* (a), *Premise* (b), *Filtek Supreme* (c), *Ceram X Duo* (d), *Tetric EvoCeram* (e) nach Bearbeitung mit einem 30 µm- sowie einem 20 µm Diamantfinierer (AV2). Dünne Pfeile kennzeichnen initiale Bearbeitungsspuren des groben Diamantfinierers. Dicke Pfeile zeigen mögliche Destruktionen; Kreise weisen auf Porositäten hin; die Länge eines Balkens entspricht 100 µm.

4.2.1.3 Kompositoberflächen im REM nach Ausarbeitung mit AV3

Grundsätzlich erschienen bei allen fünf Kompositosorten die Oberflächen nach Anwendung des Hartmetallfinierers homogener als nach Anwendung von einem bzw. zwei Diamantfinierern. Charakteristisch für Hartmetallfinierer waren auf allen damit bearbeiteten Oberflächen dezente, senkrecht zur Schleifrichtung angeordnete wellen- bzw. muldenförmige Unregelmäßigkeiten (Abb. 23 a-e). Damit unterschieden sich diese Oberflächen stark von den mit Diamantfinierern bearbeiteten, welche durch parallel zur Bearbeitungsrichtung verlaufende Riefen gekennzeichnet waren. Ein Vergleich der fünf Kompositmaterialien im REM zeigte, dass sowohl die Spuren des Diamant- als auch des Hartmetallfinierers bei *Filtek Supreme*-Proben am geringsten (Abb. 23 c) und bei *Ceram X Duo*-Prüfkörpern am stärksten ausgeprägt erschienen (Abb. 23 d). Die Komposite *Premise* und *Tetric EvoCeram* wiesen vereinzelte, dafür aber sehr breite und tiefe Destruktionsspuren auf, welche parallel zur Schleifrichtung verliefen. Besonders auf *Herculite XRV*- und *Premise*-Oberflächen ließen sich vermehrt mögliche Porositäten erkennen.



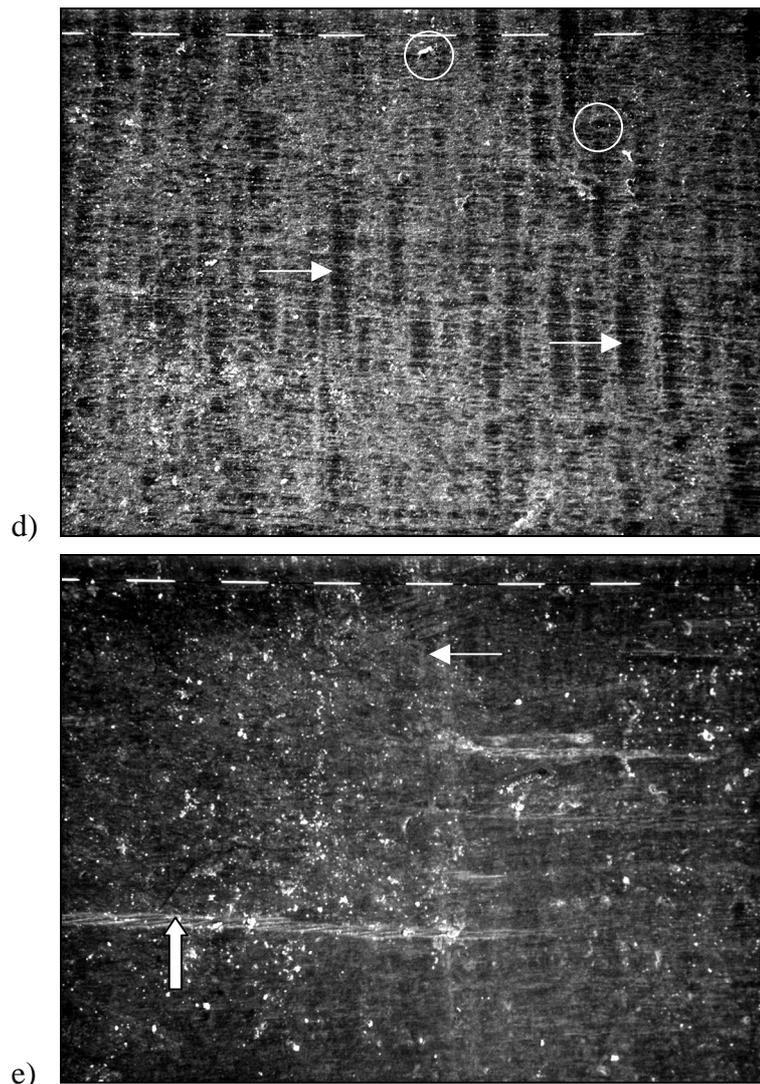
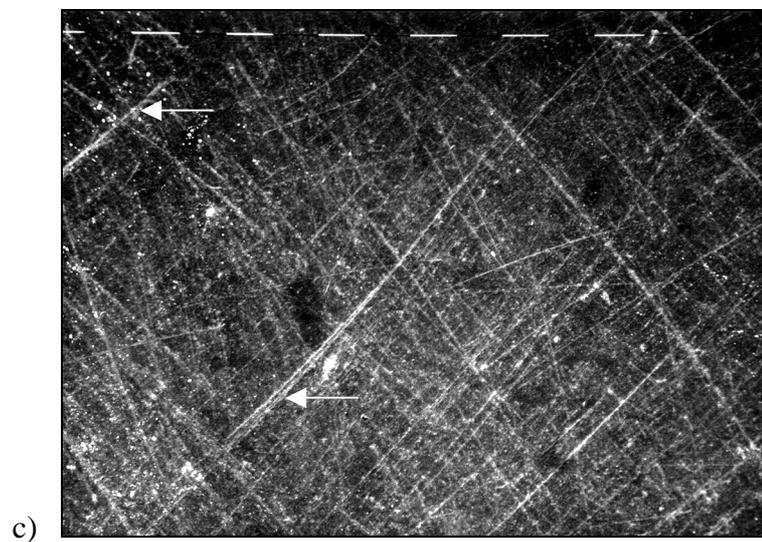
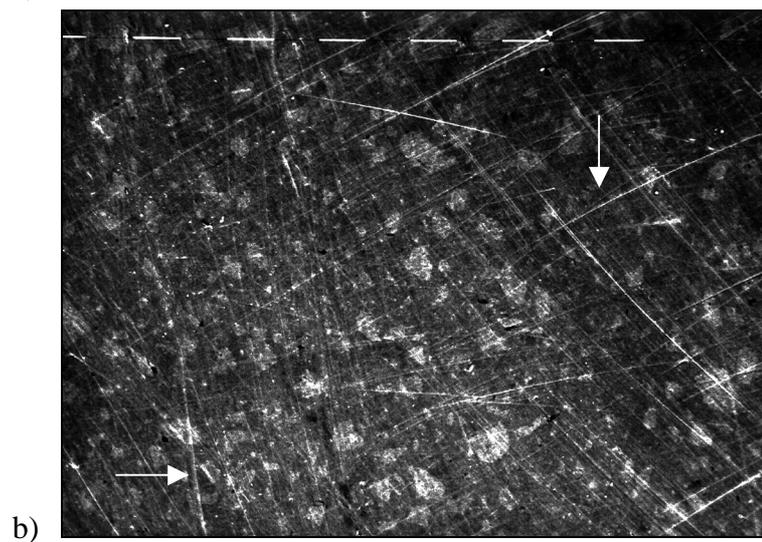
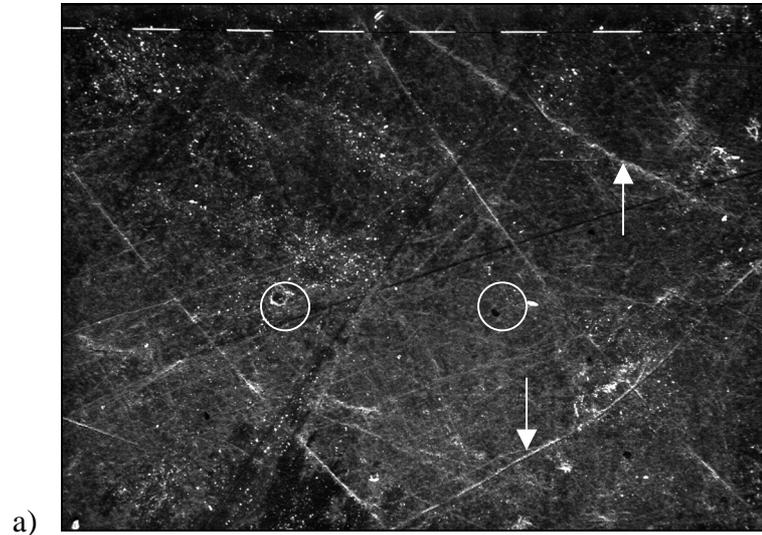


Abb. 23: REM-Aufnahmen der Oberflächen der Komposite Herculite XRV (a), Premise (b), Filtek Supreme (c), Ceram X Duo (d), Tetric EvoCeram (e) nach Bearbeitung mit einem 30 μm Diamantfinierer sowie einem Hartmetallfinierer mit 12 gewendelten Schneiden (AV3). Dünne Pfeile kennzeichnen Spuren des Hartmetallfinierers. Dicke Pfeile zeigen mögliche Destruktionen; Kreise weisen auf Porositäten hin; die Länge eines Balkens entspricht 100 μm .

4.2.1.4 Kompositoberflächen im REM nach Bearbeitung mit RG

Im REM wurden bei allen Kompositproben aufgrund der kreisenden Bewegung bei der Anwendung der flexiblen Scheiben ungeordnete, bogenförmig verlaufende Riefen sichtbar, welche unterschiedlich starke Ausprägungen aufwiesen (Abb. 24 a-e). Im Anschluss an die Bearbeitung mit der sehr feinen *Sof-Lex* Scheibe waren bei allen Materialien fast ausschließlich gering raue Oberflächen festzustellen. Es ließen sich viele sehr feine bis hin zu dezenten Riefen erkennen und nur vereinzelt Spuren der größeren Disks. Das vereinzelte Vorkommen tiefer Riefen wies daraufhin, dass die feinen Disks es nicht durchgehend vermochten, die Spuren der größeren Scheiben vollständig zu entfernen.

Mögliche Porositäten ließen sich vermehrt auf *Ceram X Duo*- und vereinzelt auf *Herculite XRV*-Oberflächen feststellen.



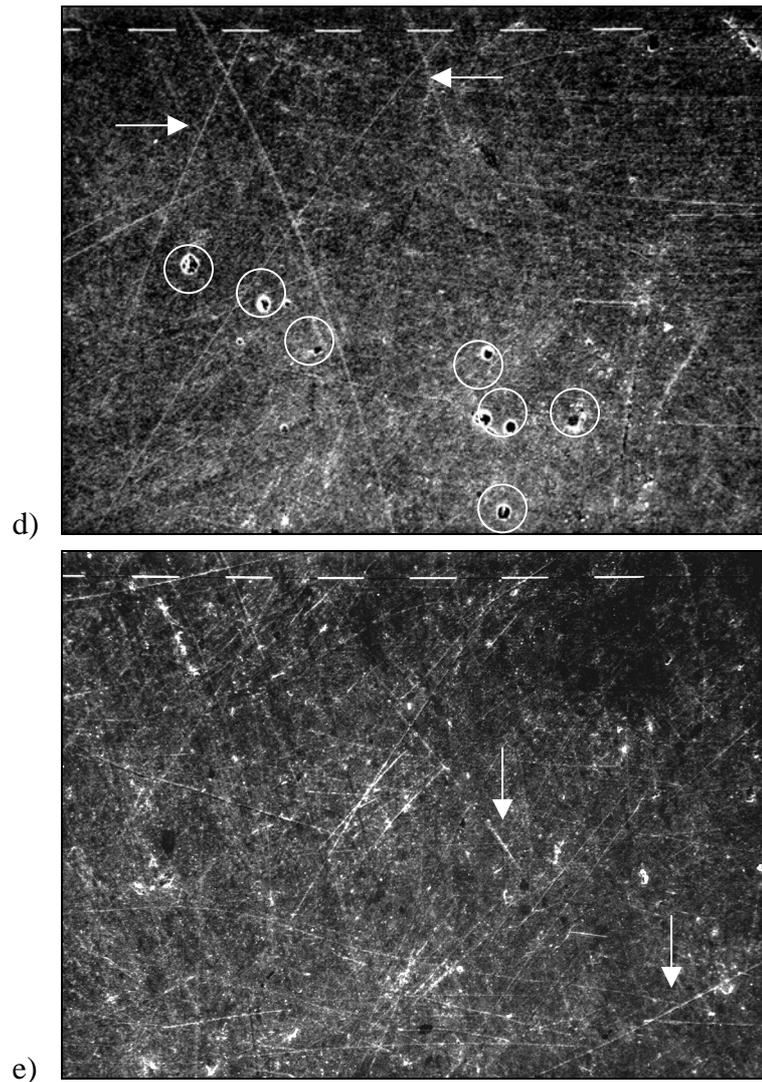


Abb. 24: REM-Aufnahmen der Oberflächen der Komposite Herculite XRV (a), Premise (b), Filtek Supreme (c), Ceram X Duo (d), Tetric EvoCeram (e) nach Bearbeitung mit Sof-Lex Scheiben in drei verschiedenen Körnungen (RG). Dünne Pfeile kennzeichnen initiale Bearbeitungsspuren der groben Scheibe. Kreise zeigen mögliche Porositäten; die Länge eines Balkens entspricht 100 μm .

4.2.2 Quantifizierte Auswertung der rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen

Bei der Auswertung der REM-Aufnahmen von Oberflächen nach Ausarbeitung mit einem 30 μm Diamantfinierer zeigten *Ceram X Duo*- sowie *Tetric EvoCeram*-Proben mit jeweils 80,5% den höchsten Anteil an sehr rauhen Arealen (Merkmal 3), *Herculite XRV*-Oberflächen den geringsten Anteil mit 56,8% (Abb. 25). Umgekehrt konnten letztgenanntem Komposit die meisten gering rauhen Areale (Merkmal 2) zugeordnet werden (33,6%). Die übrigen Materialien dagegen wiesen teilweise nur einen sehr niedrigen Anteil an gering rauhen Arealen auf (zwischen 1,8% bei *Tetric EvoCeram* und

9,4% bei *Filtek Supreme*). AV1 war das einzige Verfahren, bei dem auf Oberflächen aller Kompositmaterialien destruktive Effekte erkennbar waren. *Herculite XRV* zeigte dabei den kleinsten Anteil (9,4%), *Filtek Supreme* den größten Anteil (22,4%) an Destruktionen.

Nach dem Einsatz von zwei unterschiedlich gekörnten Diamantfinierern (AV2) überwogen mit 51,6% bei *Premise*- und 53,6% bei *Herculite XRV*-Prüfkörpern die gering rauhen Areale (Merkmal 2). Bei den anderen drei Materialien ist der Anteil an sehr rauhen Arealen (Merkmal 3) im Vergleich zu den gering rauhen höher. Des Weiteren konnten bis auf *Herculite XRV* bei allen Werkstoffen in geringem Umfang Destruktionsspuren festgestellt werden.

Überwiegend geringe Rauigkeiten (Merkmal 2) waren nach AV3 bei allen fünf Materialien feststellbar, wobei bei *Premise* aber auch ein Anteil von 37,5% an sehr rauhen Arealen (Merkmal 3) auffiel. Zudem zeigten bis auf *Premise* die übrigen Komposite einen Anteil zwischen 0,8% und 2,3% an glatten, homogenen Oberflächenarealen (Merkmal 1). Außer bei *Ceram X Duo* und *Herculite XRV* wurden nach AV3 bei jedem Werkstoff vereinzelt destruktive Areale registriert.

Nach Bearbeitung mit den *Sof-Lex* Scheiben (RG) konnten bei allen Kompositen mehr als 93% der Oberflächen Merkmal 2 zugeordnet werden (Abb. 25). Es zeigten sich mit Ausnahme von *Filtek Supreme* auf allen Werkstoffoberflächen homogene Areale (Merkmal 1), bei *Herculite XRV* mit 5,5% die vergleichsweise meisten. Geringe Anteile sehr rauher Oberflächenareale (Merkmal 3) zeigten sich bis auf *Ceram X Duo*-Proben bei allen Kompositen (zwischen 1% bei *Herculite XRV* und 2,6% bei *Filtek Supreme*).

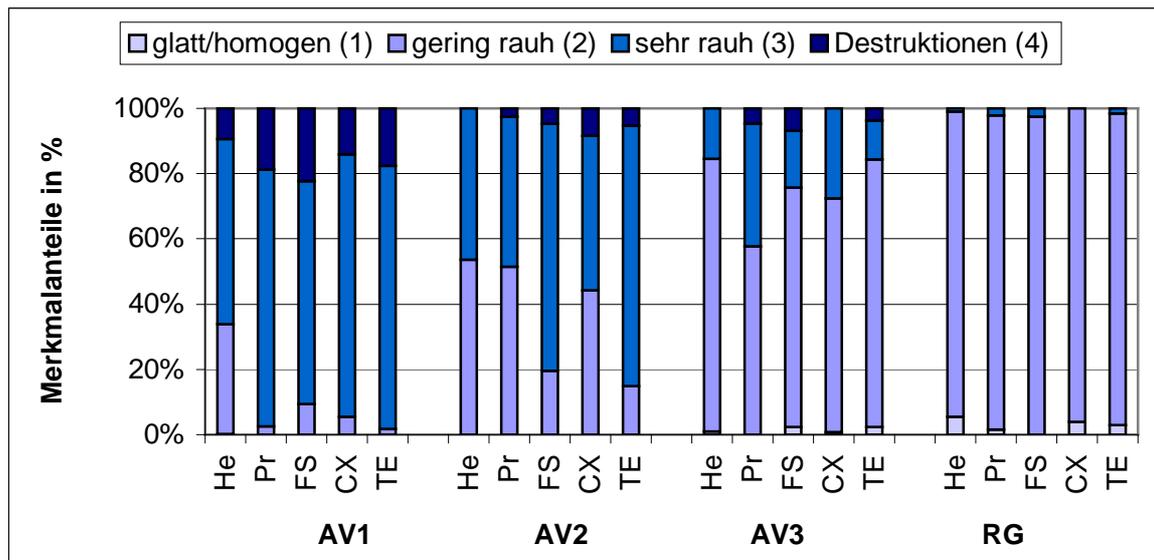


Abb. 25: Prozentuale Verteilung der vier Merkmale auf Kompositoberflächen nach unterschiedlicher Bearbeitung (AV1: 30 µm Diamantfinierer; AV2: 30 µm und 20 µm Diamantfinierer; AV3: 30 µm Diamant- und Hartmetallfinierer; RG: dreifach abgestufte Sof-Lex Scheiben; He: Herculite XRV, Pr: Premise, FS: Filtek Supreme; CX: Ceram X Duo, TE: Tetric EvoCeram)

5 Diskussion

5.1 Diskussion der Methode

5.1.1 Studiendesign

- Unterschiedliche Applikationssysteme der Kompositmaterialien

Wie bereits in Kapitel 3.1 erwähnt, wurde *Ceram X Duo* als einziges der verwendeten Komposite in Karpulen statt in Applikationsspritzen geliefert. Bei der Herstellung der Kompositprüfkörper wurden daher bei *Ceram X Duo* mehrere Portionen benötigt, um die jeweilige Hohlform auszufüllen, bei den weiteren Kompositen wurde der gesamte Inhalt einer Applikationsspritze auf einmal eingebracht.

Bei Evaluierung der REM-Aufnahmen der bearbeiteten Prüfkörper fielen zwar bei allen fünf Kompositmaterialien Unregelmäßigkeiten in Form von Porositäten auf, jedoch waren sie bei *Ceram X Duo* am häufigsten (Abb. 24 d). Zusätzlich waren bereits bei der Voruntersuchung aller Prüfkörper unter dem Stereomikroskop insbesondere bei *Ceram X Duo*-Proben Unregelmäßigkeiten auf den Probenoberflächen erkennbar, welche auf mögliche Porositäten hinwiesen. Solche Proben wurden vor der Bearbeitung direkt verworfen und grundsätzlich nur jene verwendet, welche unter dem Stereomikroskop keine oberflächlichen Poren erkennen ließen. Dennoch lässt sich nicht ausschließen, dass insbesondere bei der Bearbeitung der *Ceram X Duo*-Prüfkörper aufgrund des Materialabtrages dicht unterhalb der Oberfläche lokalisierte Porositäten freigelegt wurden, wodurch der hohe Anteil an Poren im REM-Bild zu erklären war. Die Ursache bzw. Herkunft der Porositäten ist unklar. Ein Zusammenhang zwischen dem Einbringen mehrerer Karpulen und dem Auftreten von Porositäten konnte ausgeschlossen werden, weil auch nach der Verwendung des Inhaltes einer einzigen Karpule im Stereomikroskop Hinweise auf Porositäten erkennbar waren. Es ist davon auszugehen, dass die Lufteinschlüsse entweder bereits im Material vorlagen oder durch das Auspressen durch die relativ kleine Ausführungsöffnung der Karpule zustande gekommen sind.

- Bearbeitung planer Prüfkörper

Die Wirkung verschiedener rotierender Instrumente auf Oberflächen von Kompositmaterialien war bereits häufig Gegenstand von in vitro Untersuchungen. In den meisten Studien, so auch bei der vorliegenden, wurde die Wirkung unterschiedlicher

Bearbeitungsmethoden an planen Prüfkörpern untersucht, wie beispielsweise auch bei Hoelscher et al. (1998), Joniot et al. (2000), Jung (1997), Jung et al. (1997, 2003a, 2003b, 2004), Marigo et al. (2001), Ozgunaltay et al. (2003), Roeder et al. (2000), Yap und Mok (2002). Eher selten wurden Studien unter praxisähnlichen Bedingungen an extrahierten natürlichen Zähnen durchgeführt, wie z.B. bei Berastegui et al. (1992) sowie Mitchell et al. (2002). Noch seltener sind in vivo Untersuchungen zu dieser Fragestellung, was an dem hohen methodischen Aufwand und der hierbei erforderlichen Replika-Technik zu liegen scheint. Letztgenannte Studien findet man u.a. bei Jung et al. (2004, 2005). Der in der vorliegenden Studie gewählte Versuchsaufbau entspricht im Hinblick auf die Bearbeitung planer Prüfkörper dem einer Vielzahl oben genannter Veröffentlichungen, was Vergleiche der jeweils resultierenden Ergebnisse prinzipiell ermöglicht (vgl. Kapitel 5.3). Klinische Aspekte spielten in der vorliegenden Studie eine untergeordnete Rolle. Die vorliegende Studie fokussiert somit auf die Effekte der direkten Interaktion der rotierenden Instrumente und der Werkstoffe. Weitere Studien müssen die Werkstoffe und Bearbeitungsverfahren unter klinischen Bedingungen bewerten. Eine Übertragung von Resultaten, welche in solchen in vitro Studien an idealisierten ebenen Prüfkörpern gewonnen wurden, auf die klinische Praxis ist deshalb nur eingeschränkt möglich.

- Randomisierungsliste zur Oberflächenbearbeitung

Die Auswahl der Werkstoffe und der Bearbeitungsverfahren wurde anhand einer speziell an diese Studie angepassten und in Kapitel 3.5 beschriebenen Randomisierungsliste durchgeführt; eventuelle Gewöhnungs- und Lerneffekte der zwei Behandler sowohl bei der Benutzung der verschiedenen rotierenden Instrumente als auch bei der Bearbeitung der unterschiedlichen Komposite sollten gleichmäßig auf alle Versuchsreihen verteilt werden.

- Methoden zur Oberflächenevaluierung

Mittlerweile sind viele verschiedene Verfahren bekannt, um in der Zahnheilkunde Oberflächen im Hinblick auf ihre Rauigkeit zu charakterisieren. Hierbei liefern quantitative Verfahren Zahlenwerte, welche sich aus dem Vermessen von Profilunregelmäßigkeiten ergeben. Qualitative Methoden eignen sich dagegen insbesondere zur unterstützenden Interpretation von den in quantitativen Verfahren gewonnen Messergebnissen [Pantke et al., 1985]. Somit ist es empfehlenswert, zur exakten Oberflächenevaluierung quantitative und qualitative Methoden miteinander zu

kombinieren [Pantke et al., 1985; Whitehead et al., 1995]. In der vorliegenden Studie wurde als quantitative Methode ein Profilometer sowie als qualitative Methode ein Rasterelektronenmikroskop benutzt, wie dies auch bei vielen Veröffentlichungen zu finden ist. Zudem erfolgte in der vorliegenden Untersuchung zusätzlich noch eine Quantifizierung der REM-Aufnahmen mittels eines aufgelegten Rasters.

5.1.2 Profilometrische Untersuchung und Oberflächenparameter

Ein Vorteil der Profilographen ist deren Exaktheit bei der Darstellung von Oberflächenprofilen [Brodmann, 1984].

Um eine ausreichende Genauigkeit der Messgeräte zu gewährleisten, sollten adäquate Mikrotaster Verwendung finden. In der Literatur werden insbesondere mechanische Mikrotaster häufig beschrieben. Für die vorliegende Studie wurde dagegen ein optischer Mikrotaster gewählt, da es zum einen der optischen Profilometrie im Gegensatz zur mechanischen vorbehalten ist, insbesondere Oberflächen mit geringen Rauhtiefen wie z.B. feinierte oder polierte Kompositmaterialien noch präziser zu studieren. Dies liegt an dem Durchmesser des Laserbündels des optischen Mikrotasters, welcher mit ca. 1 μm [Feinprüf, 1989a] um einiges kleiner ist als der Radius des typisch mechanischen Tasters mit Werten zwischen 2,5 und 10 μm bei einem Kegelwinkeln von meist 60°. Die optische Profilometrie arbeitet mit einem Laserstrahl, welcher zwar genau wie der Taster bei der mechanischen Profilometrie die Taststrecke zeilenweise abfährt, dabei jedoch Mikrostrukturen aufspürt, welche ein mechanischer Taster aufgrund der Größe des Prüfkegels nur unzureichend berücksichtigt [Wassell et al., 1994]. Anhand der in der vorliegenden Studie gemessenen arithmetischen Mittenrauhwerte mit z.T. unter 1 μm liegenden Werten erkennt man die für solch ausgearbeitete Oberflächen zu grob dimensionierte Diamantnadel. Trotz der in beiden Fällen identischen technischen Vorgehensweise sind damit bei mechanischer im Vergleich zu optischer Profilometrie kleinere Werte für Rauheitsparameter derselben Taststrecke möglich [Jung, 1998].

Zum anderen wurde hier der optische dem mechanischen Mikrotaster vorgezogen, da der Laserstrahl in keinem mechanischen Kontakt zur Probe steht und so ein zerstörungsfreies Abtasten derselben ermöglicht. Hierin liegt ein weiterer Unterschied zur mechanischen Profilometrie, bei der der Taster die Oberfläche beim Abtasten grundsätzlich berührt. So kann es zu Beschädigungen von Oberflächenstrukturen kommen, welche zudem mit einem Verlust an Genauigkeit bei der Messwertermittlung einhergehen [Brodmann, 1984].

Insbesondere das Abtasten elastischer oder weicher Materialien kann zu irreversiblen Verformungen der Probe führen. So zeigte z.B. Jung (1998), dass bei der mechanischen Profilometrie das Abtasten der Kompositoberflächen zu einer Beschädigung in Form von Rillenbildung auf der Probenoberfläche führte.

Zusätzlich ist der unvermeidbare Verschleiß der Tastnadel als Nachteil der mechanischen Profilometrie aufzufassen [Brodmann, 1984]. Aufgrund ihrer Kegelform nimmt die Nadel bei ihrer Abnutzung an Durchmesser zu, sodass die Messwerte einen Verlust an Genauigkeit erfahren. Dies verlangt schon bei geringem Verschleiß einen Austausch der Tastnadel. Bei optischen Tastsystemen dagegen treten Ungenauigkeiten bei der Messwertermittlung aufgrund von Verformung und Abnutzung des Tasters nicht auf.

Als grundsätzlicher Nachteil des Tastschnittverfahrens unabhängig vom gewählten Tastsystem ist die fehlende flächenmäßige Erfassung der zu untersuchenden Oberfläche zu nennen. Dies liegt an der Methodik des Tastschnittverfahrens, da sich nur Teilbereiche von Oberflächen in Form von ausgewählten Oberflächenkennlinien beurteilen lassen. Es besteht jedoch die Möglichkeit, sich durch mehrere parallele Messungen, welche jede für sich stets nur eine Zeile der Oberfläche erfasst, einer flächenhaften Darstellung anzunähern. Um diese näherungsweise dreidimensionale, topographische Darstellung von Oberflächen zur besseren Evaluierung zu erhalten, nutzte man die Option Parallelaufzeichnung, welche bei dem verwendeten Perthometer ausgewählt werden konnte.

Profilometrische Untersuchungen erlauben eine umfangreiche Auswertung der Messergebnisse anhand verschiedener Rauheitsparameter. Diese Oberflächenparameter stellen ein objektives Mittel zur Oberflächenevaluierung dar. Hierdurch sind bei der Auswertung von Tastschnittverfahren zum einen Vergleiche der Ergebnisse aus unterschiedlichen Bearbeitungsverfahren innerhalb einer Studie möglich. Zum anderen können bei Übereinstimmung der Parameter Ergebnisse verschiedener Autoren miteinander verglichen werden.

Im Rahmen der vorliegenden Studie wurden an Rauheitsparametern der arithmetische Mittenrauwert R_a sowie das Profillängenverhältnis LR ausgewählt. In vielen Publikationen zum Thema Oberflächenrauigkeit ist es allein R_a , welcher zur quantitativen Beurteilung herangezogen wird. Dieser Oberflächenparameter ist damit als Vergleichswert der eigenen Ergebnisse mit denen anderer Autoren von Bedeutung. Bei der Berechnung des

arithmetischen Mittenrauwertes werden sämtliche Profilwerte des Rauheitsprofils berücksichtigt. Man erhält jedoch nur unzureichend Informationen über Profilform und Anzahl von Oberflächenunregelmäßigkeiten [Rimondini et al., 1997]. Nachteilig an dieser Messgröße ist zudem ihre Abstraktheit, da die Ergebnisse keinen Hinweis darauf geben, welche Rautiefen im Profil tatsächlich zu finden sind. Der arithmetische Mittenrauwert beschreibt als rein mathematisch berechnete Größe in erster Linie die Grundrauigkeit; er gibt nur Anhaltspunkte über die durchschnittliche Rauigkeit einer Oberfläche [Leitão und Hegdahl, 1981].

R_a sowie weitere Vertikalparameter kennzeichnen eine Oberfläche durch ihre Profilamplitude. Whitehead et al. (1995) kritisieren an solchen Parametern, welche sich ausschließlich an Profilamplituden orientieren, die ungenügende Charakterisierung von Oberflächenstrukturen. Mit ihnen alleine seien keine Aussagen über die Geometrie einer Oberfläche möglich. Um dies zu gewährleisten, wird häufig das Profillängenverhältnis LR als ein weiterer Parameter genutzt, so auch in der vorliegenden Studie. LR ist ein sogenannter Hybridparameter. Im Unterschied zu R_a berücksichtigt LR nämlich zusätzlich zu der vertikalen auch die horizontale Dimension und erlaubt so beispielsweise Rückschlüsse auf die Anzahl von Profilunregelmäßigkeiten [Jung, 1994; Jung et al., 1997]. Je größer nun die Anzahl oder die Ausprägung der Profilunregelmäßigkeiten ist, desto größer wird auch die Länge des gestreckten Profils und damit LR. Somit sind anhand der Größe des LR-Wertes differenziertere Aussagen über Gestaltung der jeweiligen Oberfläche möglich. Während der arithmetische Mittenrauwert zur grundsätzlichen Einstufung in eher rauhe oder eher glatte Oberflächen beiträgt, manifestiert sich also die Darstellung von Mikrorauigkeiten im Parameter der gestreckten Profillänge.

So weist z.B. ein im Vergleich zu R_a niedriger LR-Wert auf wenige ausgeprägte Profilunregelmäßigkeiten hin, wie es bei allen untersuchten Kompositen nach AV1 der Fall war. Umgekehrt lässt eine Vielzahl an Riefen einen in Relation zu R_a großen LR-Wert erwarten. Diese Hinweise auf die Charakteristiken von Oberflächen konnten beim Vergleich der unterschiedlich ausgearbeiteten Prüfkörper bestätigt werden, insbesondere bei *Filtek Supreme*-Proben nach Ausarbeitung mit AV2 im Gegensatz zu AV1. Die REM-Aufnahmen lassen nach Einsatz eines groben Finierdiamanten gemäß AV1 starke Zerklüftungen mit wenigen, tiefen Riefen erkennen, während sich nach Ausarbeitung mit einem feinen Diamantfinierer (AV2) die Rillenzahl vervielfacht und gleichzeitig die Ausprägung der Rillentiefe deutlich abnimmt. Da LR im Gegensatz zu R_a eine veränderte

Anzahl von Profilunregelmäßigkeiten berücksichtigt, waren also nach Ausarbeitung mit AV2 ein deutlich niedrigerer R_a - sowie ein nur relativ gering veränderter LR-Wert zu erwarten. Die Auswertung der Oberflächen nach LR und R_a bestätigte diese Hypothese. Hier konnte eine Reduktion des LR-Wertes von 1,543 nach Ausarbeitung gemäß AV1 auf 1,500 nach Einsatz beider Diamantfinierer (AV2) registriert werden. Aufgrund der Tatsache, dass eine ideal glatte Oberfläche einen LR-Wert von 1 aufweisen würde, entspricht dies einer Verminderung des Profillängenverhältnisses um 8%. Im Vergleich dazu verminderte sich der R_a -Wert von 2,067 μm nach AV1 auf 0,906 μm nach AV2 und damit um 56%. Bei den übrigen Kompositen war das Ausmaß der Veränderung der R_a - gegenüber den LR-Werten ähnlich. Dieser Sachverhalt macht deutlich, dass bei feinerer Diamantkörnung die Werte für die Rauhtiefen zwar signifikant kleiner wurden, sich durch die Zunahme der Profilunregelmäßigkeiten die Zerklüftung der Oberflächen und damit der LR-Wert jedoch nur geringfügig änderte.

Zusammenfassend ist daher festzuhalten, dass eine Messgröße allein nicht ausreicht, um eine Oberfläche differenziert und anschaulich profilographisch evaluieren zu können. Es sollten stets sowohl vertikale als auch horizontale Oberflächenparameter zur Beurteilung herangezogen werden [Whitehead et al., 1995].

5.1.3 Rasterelektronenmikroskopische Untersuchung

Die naturgetreue Wiedergabe [Reimer und Vahl, 1967], das hohe Auflösungsvermögen sowie die hervorragende Tiefenschärfe im REM [Lange und Blödorn, 1981] ermöglichen fundierte Aussagen über Oberflächenqualitäten.

Grundsätzlich hat man am REM die Möglichkeit, durch Auswahl eines geringeren Vergrößerungsfaktors einen größeren Bereich einer Oberfläche zu begutachten und in Detailaufnahmen die Feinstruktur der Füllungsoberflächen zu beurteilen. Das REM bietet außerdem die Möglichkeit, Profilunregelmäßigkeiten im Hinblick auf ihre Entstehung zu unterscheiden. So können z.B. Differenzierungen zwischen werkstoffbedingten und durch rotierende Bearbeitung hervorgerufenen Oberflächenrauigkeiten erfolgen. Exemplarisch sei hier das vergleichsweise schlechte Abschneiden von *Ceram X Duo*-Proben hinsichtlich ihrer profilometrischen Ergebnisse gegenüber den übrigen Kompositen benannt. Anhand der REM-Aufnahmen könnte man einen möglichen Erklärungsansatz hierfür finden. Mit Ausnahme der *Ceram X Duo*-Flächen wiesen alle weiteren Werkstoffe lediglich sehr vereinzelte Porositäten auf. Auf nahezu allen *Ceram X Duo*-Oberflächen dagegen war eine

Vielzahl solcher Poren zu finden, was besonders deutlich bei Betrachtung der REM-Aufnahmen nach Bearbeitung mit *Sof-Lex* Scheiben wurde.

Des Weiteren konnten mit Hilfe des REM Unregelmäßigkeiten der bearbeiteten Oberflächen wie Destruktionen oder verschieden orientierte Riefen bzw. Rillen spezifiziert und voneinander unterschieden werden. So zeigten z.B. Oberflächen, welche mit Diamantfinierern bearbeitet wurden, parallel zur Ausarbeitungsrichtung orientierte Riefen. Diese fielen nach Anwendung des groben Diamantfinierers (AV1) breiter und tiefer aus als solche nach Einsatz des feinen Diamantfinierers (AV2). Ebenso konnten Spuren des Hartmetallfinierers von denen des groben Diamantfinierers differenziert werden. Erstgenannte verliefen in Form von muldenförmigen Unregelmäßigkeiten senkrecht zu den Riefen des Diamantfinierers. Anhand der Gegenüberstellung der quantitativen Resultate und der qualitativen Ergebnisse von Kompositoberflächen nach Anwendung dieser dritten Bearbeitungsmethode kann exemplarisch die Wichtigkeit einer zusätzlichen qualitativen Bewertung unterstrichen werden. Obwohl die Oberflächen nach Einsatz des Hartmetallfinierers aufgrund niedriger R_a - sowie LR-Werte auf eine gute Oberflächenqualität hindeuteten, wurde erst im REM deutlich, dass es neben einer Einebnung der Riefen des vorangegangenen 30 μm Diamantfinierers zu Rillen bzw. muldenförmigen Unregelmäßigkeiten senkrecht zur Bearbeitungsrichtung und damit parallel zur Abtastrichtung des Mikrotasters gekommen war. Da es sich bei diesen Mulden zudem eher um Welligkeiten statt um Rauigkeiten handelte, kann man davon ausgehen, dass auch bei veränderter Abtastrichtung keine Auswirkungen auf Rauigkeitswerte zu erwarten gewesen wären. Makroskopisch sowie im REM waren diese Mulden dagegen eindeutig zu spezifizieren.

Die bildliche Darstellung im REM erlaubt neben der Beurteilung der Oberflächenqualität der Kompositproben auch Aussagen über das mögliche destruktive Potential der verwendeten Instrumente. So fielen Destruktionen besonders nach Einsatz des groben Diamantfinierers auf, welche auch nach Anwendung eines feineren Diamantfinierers bzw. eines Hartmetallfinierers nicht vollständig beseitigt werden konnten.

Anders als nach der Abtastung durch den laseroptischen Mikrotaster sind die Kompositproben zudem nach der Untersuchung im REM für weitere Untersuchungen gegebenenfalls unbrauchbar. Dies liegt an der in der Regel notwendigen Bedampfung der Oberflächen mit Gold mit dem Ziel, eine oberflächliche, elektrische Leitfähigkeit des

Objektes zu erreichen. Diese Leitfähigkeit der zu untersuchenden Präparate ist notwendig, um ein Aufladen derselben und dadurch starke Schwankungen im Bild des REM zu verhindern [Blödorn und Syed-Ali, 1987; Lange und Blödorn, 1981].

Für die Bewertung der mit Finierern verschiedener Arten sowie Scheiben verursachten Rauigkeiten ist eine quantitative Methode wie die Profilometrie unerlässlich. Dieses Verfahren liefert quantifizierbare Resultate, welche objektiv sowie bei der Auswahl eines laseroptischen Mikrotasters hinreichend genau sind. Eine zusätzliche qualitative Beurteilung mit Hilfe des REM ist notwendig, da Formabweichungen hiermit dargestellt werden können, welche bei der Rauigkeitsmessung des Oberflächenprofils mit Hilfe des Profilometers aufgrund der integrierten Filterung nur ungenügend berücksichtigt werden. Außerdem ist eine Interpretation der Rauigkeitswerte nur mittels qualitativer Methoden wie z.B. im REM möglich. Dies unterstreicht die Wichtigkeit zusätzlicher REM-Aufnahmen, mit deren Hilfe sich die Ergebnisse der profilometrischen Bewertung der Oberfläche sinnvoll ergänzen lassen.

5.2 Diskussion der Ergebnisse

5.2.1 Einfluss der Bearbeitungsverfahren

Die Betrachtung der profilometrischen Messergebnisse sowie der ausgewerteten REM-Aufnahmen der bearbeiteten Probenflächen ermöglicht einen Vergleich der vier verschiedenen Bearbeitungsverfahren. Die Charakteristik für jede einzelne Bearbeitungsmethode war erkennbar. So sind es parallel zur Bearbeitungsrichtung verlaufende Riefen, welche für mit Diamantfinierern bearbeitete Proben typisch und im REM deutlich erkennbar sind. Solche Riefen kommen zustande, da Diamantfinierer durch zahlreiche Diamantpartikel punktuell auf die zu bearbeitende Oberfläche einwirken. Dabei sind die Spuren eines solchen Schleifkörpers unterschiedlich tief, da seine Diamantpartikel aufgrund ihrer Verankerung am Instrument nur teilweise und verschieden tief in das Material eindringen können.

Ungeachtet des jeweils zugrundeliegenden Kompositmaterials wiesen Prüfkörper nach Einsatz des groben, 30 μm Diamantfinierers (AV1) bei der profilometrischen Untersuchung die größten R_a - und LR-Werte sowie bei der REM-Untersuchung die größte

Anzahl sehr rauher Areale auf. Insgesamt stellten sich damit die ausschließlich mit dem groben Diamantfinierer bearbeiteten Oberflächen als die rauhesten dar. Dies ist mit deren hoher Schneidleistung [Jung, 1997] bzw. ihrem aggressiven Schneidverhalten [Xu et al., 1997] zu begründen, welches jedoch möglicherweise auch zu den auf REM-Aufnahmen erkennbaren destruktiven Effekten führte. Zur Entstehung der Destruktionen lässt sich vermuten, dass Finierer mit einer Korngröße von 30 µm und mehr zu Rupturen innerhalb der Kompositmatrix führen. Nach den vorliegenden Untersuchungsergebnissen eignet sich damit die alleinige Anwendung eines 30 µm Diamantfinierers nicht für die Ausarbeitung von Kompositoberflächen. Lediglich für die grobe Überschussbeseitigung sowie das Konturieren von Kompositfüllungen könnte ein 30 µm Diamantfinierer eingesetzt werden. Bei beiden Arbeitsgängen ist zu vermuten, dass sie wegen der hohen Schneidleistung mit einem groben Diamantfinierer innerhalb einer kürzeren Zeitspanne bewerkstelligt werden können als mit den anderen verwendeten Finierern. Aufgrund der vorkommenden Destruktionen auf Kompositoberflächen nach Bearbeitung mit einem 30 µm Finierdiamanten bleibt jedoch zu fordern, vor der abschließenden Politur auf den Einsatz zusätzlicher feinerer Finierer nicht zu verzichten. An dieser Stelle sei anzumerken, dass ein feiner Diamant- (AV2) bzw. Hartmetallfinierer (AV3) im zweiten Ausarbeitungsschritt die Destruktionen des 30 µm Finierdiamanten zwar reduzieren konnte, es jedoch keiner der beiden Finierer vermochte, die initialen Bearbeitungs- und Destruktionsspuren des groben Diamantfinierers vollständig zu beseitigen. Dies zieht eine weitere Forderung nach sich, und zwar im Hinblick auf die Politur. Im Falle der Anwendung eines 30 µm Diamantfinierers im Rahmen der Kompositausarbeitung ist neben den feineren sich anschließenden Finierern grundsätzlich ein abrasives Polierverfahren zu wählen. Eine andere Konsequenz wäre, einen 30 µm Diamantfinierer nur dann zu verwenden, wenn eine große Menge an Überschüssen vorhanden oder umfangreiches Konturieren notwendig ist.

Auf den REM-Aufnahmen waren nach Einsatz des 20 µm Diamantfinierers eine größere Anzahl an Unregelmäßigkeiten bei gleichzeitig verringerter Ausprägung erkennbar. Dies liegt an der größeren Anzahl kleinerer Diamantpartikel auf dem Arbeitsteil des feinen im Vergleich zum groben Diamantfinierer. Die mit beiden Diamantschleifkörpern ausgearbeitete Kompositflächen erschienen somit ebenmäßiger als solche nach bloßer Bearbeitung mit dem groben Diamantfinierer. Diese Beobachtung stimmt mit den profilometrischen Befunden überein, da die großen Rauheitswerte nach Ausarbeitung

mit AV1 durch den zweiten Diamantfinierer bei AV2 signifikant reduziert wurden. Zusätzlich waren die Destruktionsspuren nach AV2 (zwischen 0% bei Herculite XRV und 8,3% bei Ceram X Duo) geringer ausgeprägt bzw. seltener als jene nach AV1 (zwischen 9,4% bei Herculite XRV und 22,4% bei Filtek Supreme). Dies lässt möglicherweise auf eine weniger destruktive Arbeitsweise des feinen im Vergleich zum groben Diamantfinierer schließen.

Auf Prüfkörpern, welche mit Hartmetallfinierern ausgearbeitet wurden, waren im REM senkrecht zur Schleifrichtung angeordnete rillen- bzw. muldenförmige Unregelmäßigkeiten zu erkennen. Diese Mulden kommen zustande, da Hartmetallfinierer jeweils über die gesamte auf der zu bearbeitenden Oberfläche aufliegende Schneidenlänge gleichmäßig Material abtragen. Es fallen auch Bereiche auf, welche lediglich eine geringe Rillenbildung aufweisen sowie vereinzelt riefenfreie Areale. Damit vermittelten die Proben nach Anwendung dieser Methode (AV3) den Eindruck homogener Kompositoberflächen. Diese Beobachtung steht im Einklang mit den Ergebnissen der profilometrischen Untersuchung, bei der die Werte von R_a sowie LR bei allen Kompositen nach AV3 signifikant geringer waren als solche nach AV2 ($p < 0,001$). Zudem schienen bei keinem der fünf untersuchten Werkstoffe zusätzliche destruktive Effekte für Hartmetallfinierer nachweisbar.

Die letzte Bearbeitungsmethode sah die Verwendung flexibler Al_2O_3 -beschichteter Scheiben in unterschiedlicher Körnung vor (RG). Bei der Bearbeitung und Politur von Kompositflächen gilt die Verwendung flexibler Scheiben als klinischer Standard. Daher sollte diese Methode als Referenz dienen, um die Resultate der übrigen drei Ausarbeitsverfahren einordnen zu können. Nach Abschluss der Bearbeitung mit *Soft-Lex* Scheiben wurden in der vorliegenden Untersuchung die gut glättenden Eigenschaften dieser Disks aufgrund geringer Rauheitswerte bei allen Kompositen bestätigt. Dennoch verblieben auch bei dieser Bearbeitungsmethode Riefen in verschiedener Ausprägung auf allen Kompositoberflächen, welche bei 80-facher Monitorvergrößerung deutlich gemacht werden konnten (Abb. 24).

Der insgesamt gute Glättungseffekt ist darauf zurückzuführen, dass die Härte der Al_2O_3 -Partikel signifikant größer ist als die der Kompositfüllstoffe [Roeder et al., 2000; Tjan und Clayton, 1989]. Daher können mit solchen Scheiben sowohl die weiche Matrix als auch die harten Füllpartikel eines Komposites gleichmäßig abgetragen werden, was zu qualitativ

hochwertigen Oberflächen führt. Dennoch erreichte der Hartmetallfinierer (AV3) in zwei Fällen (*Ceram X Duo*, *Herculite XRV*) im Hinblick auf beide Oberflächenparameter R_a und LR und in einem Fall (*Premise*) bezüglich R_a sogar die Güte der mit sehr feinen *Sof-Lex* Scheiben geblähten Oberfläche.

Hinsichtlich der Bearbeitung mit einem Hartmetallfinierer (AV3) sowie mit flexiblen Scheiben (RG) lässt sich eine Diskrepanz zwischen Profilometrie und REM in der Rauheitsbeurteilung erkennen. Während sich nämlich anhand der Oberflächenparameter R_a und LR bei den verschiedenen Werkstoffen eine vergleichbare Oberflächengüte im Anschluss an AV3 und RG darstellte, ergab die quantifizierte Auswertung der REM-Aufnahmen einen größeren Anteil an glatten und gering rauen Arealen nach Einsatz der *Sof-Lex* Disks (RG) als nach Bearbeitung mit einem Hartmetallfinierer (AV3). Diese voneinander abweichenden Ergebnisse könnten möglicherweise darauf zurückzuführen sein, dass man anhand von REM-Aufnahmen die Profilamplituden lediglich abschätzen kann, während sie mit Hilfe der Profilometrie explizit bestimmt werden können. So war bei der Rauheitsbeurteilung im REM bei den mit einem Hartmetallfinierer (AV3) bearbeiteten Oberflächen der fünf Komposite zwar nur eine geringe Riefenbildung feststellbar (Abb. 23), dennoch erschienen die Riefen stärker ausgeprägt und häufiger in der Anzahl als solche nach Bearbeitung mit flexiblen Scheiben. Dieser auf den ersten Blick im Widerspruch zu den Rauheitsmessungen stehende Befund zeigt, dass sich anhand von REM-Bildern Aussagen über das Vorhandensein von Profilunregelmäßigkeiten machen lassen, nicht jedoch über deren exakte Tiefe.

Zusammenfassend ist der Hartmetallfinierer nach den vorliegenden Untersuchungsergebnissen für das Finieren von Nanokompositoberflächen zu empfehlen. Dies ist sowohl aufgrund der profilographischen als auch der rasterelektronenmikroskopischen Befunde mit den wesentlich besseren Glättungsergebnissen bei Verwendung des Hartmetallfinierers im zweiten Ausarbeitungsschritt (AV3) im Vergleich zu zwei Finierdiamanten (AV2) zu begründen.

Zu erwähnen bleibt, dass nach alleinigem Einsatz des 30 μm Finierdiamanten relativ hohe Anteile an Destruktionen auf Oberflächen der Komposite *Filtek Supreme* (22,4%), *Premise* (18,8%) und *Tetric EvoCeram* (17,7%) im REM auffielen. Insbesondere bei *Filtek Supreme*-Oberflächen waren auch nach zusätzlicher Anwendung eines zweiten

Diamantfinierers (AV2) bzw. eines Hartmetallfinierers (AV3) noch vermehrt Destruktionen zu erkennen. Es scheint somit empfehlenswert, bei *Filtek Supreme* auf den 30 µm Diamantfinierer eher zu verzichten. Bei den übrigen Werkstoffen lässt sich der 30 µm Diamantfinierer dagegen als geeignet für eine grobe Überschussentfernung und Konturierung bezeichnen, weil die initialen Destruktionen des groben Finierdiamanten durch den 20 µm Diamant- bzw. der Hartmetallfinierer eher eingeebnet werden konnten. Dieser Unterschied zwischen *Filtek Supreme* und den übrigen Materialien könnte möglicherweise auf deren unterschiedliche Füllerzusammensetzung zurückzuführen sein. Während *Filtek Supreme* nämlich unter den gewählten vier Nanokompositen das einzige Nanofüllerkomposit ist, sind die übrigen drei der Gruppe der Nanohybridkomposite zuzuordnen (vgl. Kapitel 3.1), und *Herculite XRV* stellt ein Hybridkomposit dar. Wie bereits in Kapitel 2.2.3 beschrieben, weisen Mikrofüllerkomposite ungenügende mechanisch-physikalische Eigenschaften auf, wohingegen Hybridkomposite durch eine hohe physikalische Festigkeit überzeugen. Damit könnte der Einsatz grober Schleifkörper, wie z.B. des 30 µm Diamantfinierers in der vorliegenden Studie, bei Nanofüllerkompositen wie *Filtek Supreme* eher zu Destruktionen führen als bei Nano- oder Feinpartikelhybridkompositen.

5.2.2 Einfluss der Kompositmaterialien

Im Hinblick auf das Profillängenverhältnis ist weiterhin eine identische, charakteristische Einordnung der fünf Komposite nach der Rauigkeit erkennbar. So ist die Staffelung beginnend mit dem Material mit dem kleinsten LR-Wert stets *Premise*, *Filtek Supreme*, *Tetric EvoCeram*, *Herculite XRV*, *Ceram X Duo*. Bei AV2 sind innerhalb dieser Reihung lediglich die Komposite *Premise* und *Tetric EvoCeram* vertauscht. Bezüglich R_a fiel nach Bearbeitung mit den Methoden AV2, AV3 und RG dieselbe Staffelung der Werkstoffe auf.

Premise wies also neben den jeweils geringsten LR-Werten aller Komposite – mit Ausnahme nach Anwendung von AV2 – ebenfalls die geringsten Rauigkeiten im Hinblick auf den arithmetischen Mittenrauhwert nach Bearbeitung mit AV3 sowie RG im Vergleich zu den vier weiteren Kompositen auf. Daher lässt sich zusammenfassend festhalten, dass die *Premise*-Prüfkörper nach Bearbeitung mit AV1, AV3 und RG (bis auf eine Ausnahme) niedrigere Rauigkeitswerte aufwiesen als die vier weiteren Komposite.

Ein möglicher Grund hierfür könnte der relativ hohe Volumenanteil der Füller sein. Mit einem Fülleranteil von 69 Vol.-% weist dieses Komposit verglichen mit den anderen den größten Anteil an Füllpartikeln auf. Zudem liegt der Fülleranteil nur knapp unter dem von Kullmann (1990) angegebenen maximalen volumenmäßigen Gehalt an Füllstoff in einem Kompositkunststoff, nämlich etwa 70 Vol.-%. Durch diesen hohen Volumenanteil der Füllstoffe wird die Angriffsfläche der Schleifkörperpartikel bzw. -schneiden auf die Matrix reduziert sowie auf die Füllpartikel vergrößert. Dies könnte ein Grund dafür sein, dass sich die Oberflächen der *Premise*-Proben gleichmäßiger als die der anderen Kompositproben abtragen ließen, da eine unterschiedlich starke Einebnung von Matrix sowie Füllern erschwert war. Der beschriebene Effekt des gleichmäßigeren Materialabtrags von *Premise* im Vergleich zu den anderen Materialien fiel auch bei Betrachtung der Oberflächen im REM auf. Hier zeigten die Oberflächen der *Premise*-Prüfkörper z.B. nach Ausarbeitung mit AV1 und AV2 eine nahezu gleichmäßige Riefenbildung (Abb. 21 b, 22 b), während Proben der anderen vier Werkstoffe sich durch ungleichmäßig starke Bearbeitungsspuren auszeichneten.

Ein weiterer Grund für die vergleichsweise niedrig ausfallenden Rauigkeiten der *Premise*-Prüfkörper könnte seine Füllerzusammensetzung sein. Dieses Material enthält Vorpolymerisate, deren Größe von 30-50 μm [RCD/AG, 2004] ein Vielfaches der Füllergrößen aller weiteren verwendeten Komposite darstellt. Da die Vorpolymerisate u.a. Matrixbestandteile (Resin) enthalten, kann es zwischen ihnen und der sie umgebenden Matrix leichter zu Interaktionen kommen als zwischen nicht präpolymerisierten Füllstoffen und Matrix. Dies könnte eine sehr intensive chemische Verankerung ermöglichen, was neben der Silanisierung letztlich zur verbesserten Integration der Füller in der Matrix führen könnte. Damit wäre ein Effekt entstanden, welcher den rotierenden Instrumenten das Herauslösen von Füllerpartikeln aus der Matrix erschwert.

Ceram X Duo wies bei allen Bearbeitungsmethoden das jeweils größte Profillängenverhältnis auf sowie bei AV2, AV3 und RG auch den höchsten arithmetischen Mittenrauhwert. Die Differenzen waren dabei vergleichend zu *Premise*, *Filtek Supreme* und *Tetric EvoCeram* bis auf eine Ausnahme sowohl hinsichtlich R_a als auch LR signifikant. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die *Ceram X Duo*-Prüfkörper insgesamt größere Oberflächenrauigkeiten aufwiesen als die vier weiteren Komposite.

Der Erklärungsansatz des Zusammenhangs zwischen Rauheitswerten und Volumenanteil der Füller wird für den Fall *Ceram X Duo* ebenfalls angewendet. Mit einem Fülleranteil von 57 Vol.-% weist *Ceram X Duo* nämlich bezüglich seines volumenmäßigen Gehaltes die niedrigste Dichte an Füllpartikeln auf im Vergleich zu den übrigen Kompositen. Aufgrund dieses niedrigen Volumenanteils der Füllstoffe wird die Angriffsfläche der Schleifkörperpartikel bzw. -schneiden auf die Matrix vergrößert, welche weicher und damit leichter abzutragen ist als die härteren Füllpartikel. So könnte es zu einer verstärkten Ausprägung von Rauigkeiten nach rotierender Bearbeitung gekommen sein.

Des Weiteren könnten die durchweg hohen Rauigkeiten bei *Ceram X Duo* in Bezug auf LR sowie die höheren R_a -Werte nach AV2, AV3 und RG möglicherweise auch an den bei diesem Komposit aufgefallenen Porositäten liegen. Zusätzlich zu den Bearbeitungsspuren der Instrumente tastet der optische Mikrotaster bei der profilometrischen Untersuchung auch die oberflächlichen Poren ab. Damit können aufgrund der vermehrten Porositäten die eigentlichen Rauhtiefenamplituden der Bearbeitungsspuren in ihrer Ausprägung noch verstärkt werden, wodurch die erhöhten Rauheitswerte zu erklären wären.

5.3 Vergleich der Resultate mit denen anderer Autoren

Untersuchungen über die Wirksamkeit unterschiedlicher Finierverfahren auf verschiedene Kompositoberflächen sind bereits in großer Zahl publiziert worden, jedoch zum gegenwärtigen Zeitpunkt nur wenige zu den in der vorliegenden Studie gewählten Materialien. Ein direkter Vergleich der eigenen Resultate mit denen anderer Autoren ist deshalb nur bedingt möglich, da u.a. unterschiedliche Ausarbeitungs- und Untersuchungsbedingungen die Ergebnisse beeinflussen können. Der Literaturvergleich soll sich auf Studien beschränken, welche sich mit den gleichen Kompositmaterialien bei vergleichbarer Bearbeitung befassten.

Filtec Supreme wurde von den vier für diese Studie gewählten Nanokompositen bis heute am häufigsten untersucht. Dennoch lassen sich lediglich zwei im engeren Sinn themenbezogene Publikationen finden. Im Rahmen einer Studie von Yap et al. (2004b) wurde die Oberfläche von *Filtec Supreme*-Prüfkörpern nach Anwendung flexibler Scheiben untersucht. Nach Aufrauhung mit Sandpapier der Körnung 320 grit und

Bearbeitung mit beschichteten Scheiben (*Super-Snap*, Shofu) bei 12.000 U/min ohne Wasserkühlung erfolgte die Bestimmung des arithmetischen Mittenrauhwertes R_a mit Hilfe eines Profilometers. Der resultierende R_a -Wert für *Filtec Supreme* lag hier bei $R_a = 0,33 \mu\text{m}$. In der vorliegenden Studie ergab sich für dieses Komposit ein R_a -Wert von $0,50 \mu\text{m}$ nach Anwendung der *Sof-Lex* Scheiben. Zu den Differenzen bei den Messergebnissen könnten die unterschiedlichen Scheibensysteme beigetragen haben, deren Anwendungsdetails sich ebenfalls voneinander unterschieden. Während bei der eigenen Untersuchung nämlich unter Wasserkühlung und mit niedriger Drehzahl (3.000 U/min) gearbeitet wurde, findet man bei Yap et al. eine trockene, hochoberflächige Bearbeitung. Ebenso waren möglicherweise Abweichungen in der Messmethodik, welche im Detail nicht spezifiziert war, ein Grund für die unterschiedlichen R_a -Werte.

In einer weiteren Studie wurden nach vergleichbarer Vorbereitung (Sandpapier 320 grit) *Filtec Supreme*-Proben mit *Sof-Lex* Scheiben bearbeitet [Silikas et al., 2005]. Der arithmetische Mittenrauhwert betrug hiernach $0,125 \mu\text{m}$. Diese im Vergleich zu den eigenen Resultaten deutlich niedrigeren Werte sind vermutlich die Folge der Abtastung mit einem mechanischen Tastsystem, welches einen Tastspitzenradius von $5 \mu\text{m}$ hatte. Wie bereits vorher erläutert, können laseroptische Tastsysteme insbesondere bei Oberflächen mit geringen Rauhtiefen präzisere Messergebnisse und damit größere Werte als mechanische liefern.

Hinsichtlich *Herculite XRV* sind zwei Arbeiten insbesondere von Interesse, welche unter Verwendung dieses Komposites ebenfalls die Eigenschaften rotierender Instrumente untersuchten. In diesen Studien kamen nämlich sowohl ähnliche Bearbeitungsinstrumente als auch die gleiche Auswerteeinheit und der gleiche Lasertaster zur Anwendung. Aufgrund dieser Übereinstimmungen ist ein Vergleich der jeweiligen Messwerte möglich.

In einer der Untersuchungen [Jung et al., 2003b] stimmten die Ergebnisse nach Bearbeitung der *Herculite XRV*-Proben sowohl mit *Sof-Lex* Disks, als auch mit einem $30 \mu\text{m}$ sowie zwei unterschiedlich gekörnten Diamantfinierern (30 bzw. $20 \mu\text{m}$) gut mit den eigenen Resultaten überein. Die Autoren fanden jedoch für die mit einem $30 \mu\text{m}$ Diamant- in Kombination mit einem Hartmetallfinierer bearbeitete Oberflächen dieses Komposites deutlich höhere R_a -Werte. Da neben einer Übereinstimmung des Bearbeitungsverfahrens und der Messmethodik auch Drehzahl (40.000 U/min) und Bearbeitungsdauer (30 Sekunden pro Instrument) in der Arbeit von Jung et al. mit denen

der vorliegenden Studie identisch sind, kommen als mögliche Erklärung für die abweichenden Ergebnisse insbesondere Unterschiede bezüglich des Anpressdruckes der Finierinstrumente auf die Proben in Betracht.

Zu insgesamt vergleichbaren Ergebnissen mit denen der vorliegenden Untersuchung kam dagegen die zweite dieser beiden Studien [Jung, 1997]. So stellte dieser Autor fest, dass Diamantfinierer auf *Herculite XRV*-Proben relativ raue Oberflächen hinterließen, wogegen die Anwendung von Hartmetallfinierern zu deutlich glatteren Oberflächen führte. Zudem stimmten die Resultate nach Anwendung von *Sof-Lex* Scheiben, einem groben sowie zwei unterschiedlich gekörnten Diamantfinierern (ebenfalls 30 bzw. 20 μm) mit denen der eigenen Untersuchung überein.

Vergleichbare Untersuchungen der Nanokomposite *Premise*, *Ceram X Duo* und *Tetric EvoCeram* hinsichtlich der Ausarbeitung mit rotierenden Instrumenten liegen zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch nicht vor.

5.4 Klinische Relevanz

Bereits im Rahmen des Studiendesigns wurde die Auswahl von idealisierten Prüfkörpern in dieser Studie angesprochen. Deren plane Oberflächen lassen nur eingeschränkt Aussagen darüber zu, inwiefern rotierenden Instrumente geeignet sind, spezielle anatomisch geformte Strukturen an zum Teil schwer zugänglichen Stellen in der Mundhöhle zu bearbeiten. In der zahnärztlichen Praxis kommen bei der Ausarbeitung der Kompositflächen weiterhin einer ausreichenden Wasserkühlung sowie dem Parameter Zeit eine große Bedeutung zu. Diese beiden klinischen Aspekte wurden in der vorliegenden Untersuchung berücksichtigt, indem jede Probenfläche manuell unter ausreichender Wasserkühlung bearbeitet und ein konstantes Zeitintervall von 30 Sekunden pro Instrument eingehalten wurde. Zusätzlich wählte man speziell solche Instrumente für die rotierende Bearbeitung aus, welche sich für die Grob- und Feinausarbeitung von Kompositen sowohl in *in vitro* Studien als auch unter klinischen Bedingungen bewährt haben, nämlich flexible Scheiben sowie Hartmetall- und Diamantfinierer.

Bei einem Vergleich des Feinpartikelhybridkomposites *Herculite XRV* mit den vier untersuchten Nanokompositen lieferte lediglich *Ceram X Duo* höhere Werte als *Herculite*

XRV und dies - bis auf *AV1* bezüglich R_a - bei allen Methoden jeweils hinsichtlich beider Messgrößen. Die übrigen Werkstoffe *Premise*, *Filtek Supreme* und *Tetric EvoCeram* erzielten bei allen Methoden geringere Rauigkeiten als *Herculite XRV*, wobei nicht immer Signifikanzen vorlagen. Des Weiteren ergaben sich anhand der Gesamtmittelwerte der vier Bearbeitungsverfahren für *Herculite XRV* und *Ceram X Duo* vergleichbare R_a - und LR-Werte. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass *Herculite XRV*- sowie *Ceram X Duo*-Oberflächen nach Ausarbeitung mit verschiedenen rotierenden Instrumenten rauher waren als die der anderen untersuchten Nanokomposite.

Premise-Prüfkörper wiesen nach Bearbeitung mit *AV1*, *AV3* und *RG* bis auf eine Ausnahme niedrigere Rauigkeitswerte auf als die vier weiteren Komposite. Nach *AV2* zeigten *Filtek Supreme* und *Tetric EvoCeram* insgesamt geringere Rauigkeiten als *Premise*, jedoch lagen zu diesen beiden Materialien keine signifikanten Unterschiede vor. Bei vergleichender Betrachtung der Gesamtmittelwerte der vier Bearbeitungsverfahren weist *Premise* zudem die geringsten Rauigkeiten sowohl in Bezug auf R_a als auch LR auf. Zusammenfassend lässt sich daher festhalten, dass *Premise*-Proben durchschnittlich niedrigere Rauigkeitswerte aufwiesen als die übrigen Komposite. Weitere Studien müssen zeigen, ob *Premise* mit seinen mechanischen Eigenschaften den klinischen Anforderungen an ein Seitenzahnfüllungsmaterial gerecht wird und welche Auswirkungen dies auf die abschließende Politur hat.

Im Hinblick auf Oberflächenbearbeitung lässt sich aus der vorliegenden Studie ableiten, dass Nanokomposite Vorteile gegenüber herkömmlichen Hybridkompositen aufweisen und für den praktisch tätigen Zahnarzt eine sinnvolle Alternative darstellen.

Bei der rotierenden Bearbeitung von Nanokompositoberflächen entsteht Schleifstaub, der sowohl Quarz als auch Nanopartikel enthalten kann. Ob dies unter klinischen Bedingungen gesundheitliche Auswirkungen in arbeitsmedizinischem Sinne haben kann, ist nach dem gegenwärtigen Kenntnisstand nicht eindeutig zu beantworten.

Vor dem Hintergrund, dass bei Werkstoffoberflächen, die in antagonistischem Kontakt zu natürlichem Zahnschmelz stehen könnten, mindestens ein R_a -Wert von $0,64 \mu\text{m}$ oder weniger angestrebt werden sollte [Willems et al., 1991], würden in der vorliegenden Studie nach *AV3* alle Komposite diesem Kriterium entsprechen, bemerkenswerter Weise bereits

ohne weitere Politur. Dennoch darf in der Praxis auch nach einem Einsatz von Hartmetallfinierern auf eine abschließende Politur nicht verzichtet werden. Die R_a -Werte der vorliegenden Studie sind nämlich unter idealen Bedingungen entstanden und entsprechen daher nicht der klinischen Situation. Nach Bearbeitung mit flexiblen Disks unterschritten *Premise*-, *Filtek Supreme*- und *Tetric EvoCeram*-Proben diesen R_a -Wert von $0,64 \mu\text{m}$, nach Ausarbeitungsmethode AV1 und AV2 dagegen überschritten ihn alle Materialien deutlich.

Des Weiteren erfüllten alle Komposite nach AV3 und RG bereits die von Shintani et al. (1985) aufgrund der durchschnittlichen Bakteriengröße von $1 \mu\text{m}$ gestellte Forderung nach Rauhtiefen ebenfalls unter $1 \mu\text{m}$. Zusätzlich erscheinen sie damit optisch alle glatt [Chung, 1994]. *Premise*, *Filtek Supreme* und *Tetric EvoCeram* unterschritten diesen Wert von $1 \mu\text{m}$ auch nach Einsatz des feinen Diamantfinierers (AV2), während die andern zwei Komposite minimal darüber lagen.

Anders sind dagegen die Ergebnisse im Hinblick auf die Forderung von Bollen et al. (1997) einzuordnen. So lagen die R_a -Werte aller Komposite nach AV1 - AV3 sowie RG über dem von den Autoren angegebenen, hinsichtlich der bakteriellen Plaqueakkumulation kritischen Grenzwert der Oberflächenrauigkeit von $R_a = 0,2 \mu\text{m}$. Nach Anwendung der flexiblen Scheiben, deren Oberflächenqualität von nahezu allen Autoren als nicht weiter verbesserungsfähig angesehen wird, wurde dieser Wert bei keinem der zum gegenwärtigen Zeitpunkt modernsten Komposite durch die untersuchten Finiermethoden erreicht. Ob ein R_a -Wert von $0,2 \mu\text{m}$ durch eine Politur der Nanokomposite im Anschluss an die Ausarbeitungen gemäß AV2 und AV3 unterschritten werden kann, bleibt noch zu untersuchen. Insgesamt kam *Premise* diesem Zielwert von allen verwendeten Materialien am nächsten.

Nach den vorliegenden profilometrischen und rasterelektronenmikroskopischen Ergebnissen kann für das Bearbeiten der untersuchten Nanokompositoberflächen eine Kombination aus Diamant- und Hartmetallfinierer (AV3) empfohlen werden. Diese Instrumente führten nämlich auf allen Werkstoffen sowohl zu den geringsten R_a - und LR-Werten als auch im REM zu homogeneren Oberflächen im Vergleich zu den mit einem und zwei Diamantfinierern (AV1, AV2) bearbeiteten Proben. AV3 erzielte zudem vergleichbare Oberflächenrauigkeiten wie die als klinischer Standard akzeptierten *Sof-Lex*

Scheiben, bei *Ceram X Duo* lieferte der Hartmetallfinierer sogar einen signifikant niedrigeren R_a -Wert.

Insbesondere bei dem Komposit *Filtek Supreme* könnten durch einen weniger destruktiven Schleifkörper anstelle des 30 μm Finierdiamanten im ersten Arbeitsschritt eventuell noch bessere Ergebnisse erzielt werden. Bei dem genannten Werkstoff konnten nämlich die nach Einsatz des groben Diamantfinierers (AV1) vorhandenen Destruktionen weder durch Anwendung des feinen Diamant- (AV2) noch des Hartmetallfinierers (AV3) vollständig beseitigt werden.

5.5 Schlussfolgerungen

Sowohl die gewählten fünf Komposite als auch die zur Bearbeitung dieser Werkstoffe untersuchten vier Verfahren hatten einen signifikanten Einfluss auf die Oberflächenrauigkeit ($p < 0,001$). Außerdem waren Wechselwirkungen zwischen den Materialien und den Bearbeitungsverfahren nachweisbar ($p < 0,001$).

Ein 30 μm Finierdiamant hinterließ bei allen Kompositen sowohl in Bezug auf R_a als auch LR (mit zwei Ausnahmen) die signifikant rauhesten Oberflächen ($p < 0,001$). Dieses Verfahren erwies sich als das einzige, bei dem auf Oberflächen aller Kompositmaterialien Destruktionen erkennbar waren.

Nach zusätzlicher Ausarbeitung mit einem Hartmetallfinierer bzw. durch die Bearbeitung mit *Sof-Lex* Scheiben konnten bei allen Materialien signifikante Verbesserungen sowohl gegenüber einem als auch gegenüber zwei unterschiedlich gekörnten Diamantfinierern erreicht werden ($p < 0,001$). Signifikanzen zwischen Hartmetallfinierern und *Sof-Lex* Scheiben bestanden dabei hinsichtlich R_a und LR (bis auf eine Ausnahme) nicht.

Premise-Prüfkörper wiesen nach Bearbeitung gemäß AV1, AV3 und RG bezüglich R_a sowie LR – bis auf eine Ausnahme – niedrigere Rauheitswerte auf als die vier weiteren Komposite.

Ceram X Duo-Proben zeigten (mit einer Ausnahme) bei allen vier Bearbeitungsmethoden größere Oberflächenrauigkeiten als die übrigen Komposite, und zwar sowohl hinsichtlich R_a als auch LR.

Die Oberflächenrauigkeiten des Referenzproduktes *Herculite XRV* und des Nanokomposites *Ceram X Duo* waren vergleichbar, wohingegen bei *Premise*, *Filtek Supreme* und *Tetric EvoCeram* z.T. deutliche Reduktionen der Rauigkeit gegenüber *Herculite XRV* im Hinblick auf R_a und LR nach Anwendung der beschriebenen vier Bearbeitungsverfahren erreicht wurden.

6 Zusammenfassung

Das Ziel der vorliegenden Untersuchung war es, die Oberflächenrauigkeit von vier Kompositen auf Nanotechnologie-Basis sowie eines etablierten Feinpartikelhybridkomposites nach Ausarbeitung mit unterschiedlichen rotierenden Instrumenten zu ermitteln.

Hierbei fanden die Nanohybridkomposite *Ceram X Duo* (Dentsply DeTrey, Konstanz), *Tetric EvoCeram* (Ivoclar Vivadent, Schaan/Liechtenstein) und *Premise* (KerrHaWe, Karlsruhe) und das Nanofüllerkomposit *FiltekTM Supreme* (3M ESPE AG, Seefeld) Verwendung. Als Referenzprodukt diente das Feinpartikelhybridkomposit *Herculite XRV* (KerrHaWe, Karlsruhe). In dieser in vitro Studie kamen plane Prüfkörper mit einer Grundfläche von 7 mm x 7 mm und einer Höhe von 4 mm zur Anwendung. Nach Schaffung einer standardisierten Oberfläche mit Hilfe einer Sandpapierscheibe der Körnung 600 grit wurden die insgesamt 60 Prüfkörper je Kompositorte zufällig auf vier verschiedene Bearbeitungsverfahren verteilt. Jeweils 15 Prüfkörper eines Materiales wurden manuell mit einem 30 µm Diamantfinierer (AV1), einer Folge aus einem 30 µm sowie einem 20 µm Diamantfinierer (AV2) bzw. der Kombination eines 30 µm Diamant- und eines Hartmetallfinierers mit 12 gewendelten Schneiden (AV3) ausgearbeitet. Das vierte Bearbeitungsverfahren (RG) sah die Nutzung dreifach abgestufter *Sof-Lex* Scheiben vor (mittlere, feine, sehr feine Körnung). Da dieses Verfahren ein akzeptierter klinischer Standard ist, sollte es als Referenz zum Vergleich mit den übrigen Methoden dienen. Daraus ergaben sich also 20 Untersuchungsgruppen sowie insgesamt ein Probenumfang von n = 300 Prüfkörpern.

Die Kompositoberflächen wurden einer profilometrischen Untersuchung mit einem laseroptischen Mikrotaster unterzogen. Hierbei erfolgte die Abtastung der Oberfläche als schrittmotorgesteuerte vollautomatische Parallelaufzeichnung in neun Tastschnitten mit einer Taststreckenlänge von 1,75 mm sowie einem Abstand von jeweils 0,219 mm zwischen zwei Tastschnitten. Die Messstrecke betrug 1,25 mm; daraus ergab sich ein Messfeld von 1,25 mm x 1,75 mm. Die Charakterisierung der Oberflächenrauigkeit erfolgte mit den Rauigkeitsparametern arithmetischer Mittenrauhwert (R_a) sowie Profillängenverhältnis (LR).

Die quantitativ erhobenen Daten wurden prüfstatistisch ausgewertet mit einfacher und zweifacher Varianzanalyse und Anschlussstest nach Scheffé.

Weiterhin wurden jeweils zwei zufällig ausgewählte Prüfkörper aus jeder der 20 Gruppen im Rasterelektronenmikroskop bei 80-facher Monitorvergrößerung qualitativ beurteilt. Durch Auflegen eines Rasters wurde jedes REM-Bild in 96 kleinere Einheiten unterteilt und jedes einzelne Feld einem der folgenden vier qualitativen Kriterien zugeordnet:

- Merkmal 1: Oberfläche glatt/homogen
- Merkmal 2: Mittlere Rauigkeiten
- Merkmal 3: Starke Rauigkeiten
- Merkmal 4: Oberflächendestruktionen

Die prüfstatistische Auswertung der profilometrischen Messdaten zeigte hinsichtlich beider Oberflächenparameter R_a und LR signifikante Unterschiede sowohl zwischen den verschiedenen Materialien als auch zwischen den unterschiedlichen Ausarbeitungsverfahren ($p < 0,001$). Zudem waren signifikante Wechselwirkungen zwischen den Kompositen und den Bearbeitungsmethoden nachweisbar ($p < 0,001$). Die Bearbeitungsverfahren wirkten sich also unterschiedlich auf die fünf verschiedenen Werkstoffen aus.

Eine Kombination aus 30 μm Diamant- und Hartmetallfinierer (AV3) wie auch *Sof-Lex* Scheiben (RG) hinterließen auf allen verwendeten Materialien signifikant glattere Oberflächen als ein 30 μm Diamantfinierer (AV1) bzw. eine Kombination aus 30 μm und 20 μm Diamantfinierer (AV2) ($p < 0,001$). Dabei lagen die signifikant höchsten arithmetischen Mittenrauhwerte aller Komposite nach Anwendung von AV1 vor (zwischen $R_a = 1,923 \mu\text{m} - 2,142 \mu\text{m}$). Die Rauigkeiten nach AV3 sowie RG waren im Vergleich dazu deutlich reduziert (nach AV3 zwischen $R_a = 0,429 \mu\text{m} - 0,641 \mu\text{m}$, nach RG $R_a = 0,412 \mu\text{m} - 0,761 \mu\text{m}$). Bei den Werkstoffen *Herculite XRV*, *Ceram X Duo* und *Premise* ließen sich mit dem Hartmetallfinierer sogar tendenziell geringere Rautiefen in Bezug auf R_a und LR erzielen (mit Ausnahme *Premise* hinsichtlich LR) als nach Einsatz der flexiblen Scheiben. Zwischen diesen zwei Verfahren bestanden jedoch bis auf eine Ausnahme keine Signifikanzen ($p > 0,05$).

Die rasterelektronenmikroskopischen Befunde standen weitestgehend im Einklang mit Ergebnissen der Tastschnittuntersuchung. So fielen bei allen fünf Kompositen nach Anwendung des Hartmetallfinierers (AV3) mehr gering raue (Merkmal 2) als sehr raue Areale auf (Merkmal 3). Dahingegen ließ ein 30 µm Diamantfinierer (AV1) hauptsächlich sehr raue Anteile auf den Probenflächen zurück. Zusätzlich erwies sich dieses Verfahren als das einzige, bei dem auf Oberflächen aller Kompositmaterialien Destruktionen erkennbar waren (Merkmal 4). Des Weiteren hinterließen zwei Finierdiamanten (AV2) lediglich bei *Premise* und *Herculite* etwa gleich viele gering raue wie sehr raue Areale, bei den anderen Materialien überwogen ebenfalls die sehr rauhen Anteile.

Nach den vorliegenden quantitativen und qualitativen Resultaten kann eine Kombination aus Diamant- und Hartmetallfinierer (AV3) für das Ausarbeiten der verwendeten Kompositoberflächen empfohlen werden. Diese Bearbeitungsmethode führte nämlich auf allen Materialien zu den geringsten R_a - und LR-Werten und im REM zu den glattesten Oberflächen im Vergleich zu den mit einem bzw. zwei Diamantfinierern bearbeiteten Proben. Zum anderen erzielte AV3 vergleichbare Oberflächenrauigkeiten wie die als klinischer Standard akzeptierten *Sof-Lex* Scheiben.

Ceram X Duo zeigte bei allen Bearbeitungsmethoden – mit Ausnahme von AV1 bezüglich R_a – die größten Oberflächenrauigkeiten gegenüber den übrigen Kompositen. Die Unterschiede zwischen *Ceram X Duo* und dem Referenzprodukt *Herculite XRV* fielen dabei jedoch gering aus. Damit lässt sich *Ceram X Duo* nicht besser ausarbeiten als ein herkömmliches Feinpartikelhybridkomposit. Im Vergleich zu dem Referenzprodukt wurden dagegen bei *Premise*, *Filtek Supreme* und *Tetric EvoCeram* bei sämtlichen Bearbeitungsmethoden geringere Rauigkeiten im Hinblick auf R_a und LR erreicht und dies mit z.T. signifikanten Reduktionen. *Premise*-Prüfkörper wiesen dabei nach Bearbeitung gemäß AV1, AV3 und RG bezüglich R_a sowie LR (mit einer Ausnahme) sogar niedrigere Rauigkeitswerte auf als alle weiteren Komposite. Zusätzlich war der LR-Wert der *Premise*-Oberflächen gemittelt über alle Methoden signifikant kleiner als der der anderen verwendeten Materialien ($p \leq 0,039$).

Summary

The purpose of the study was to evaluate surface geometry of four nanocomposites and one hybrid composite after finishing with rigid rotary instruments.

Four nanofilled composites (*Premise*, KerrHawe; *Tetric EvoCeram*, Ivoclar Vivadent; *Filtek Supreme*, 3M Espe; *Ceram X Duo*, Dentsply) and one hybrid composite (*Herculite XRV*, KerrHawe) were used for the study. Sixty specimens were made of each product, 7x7 mm in size. Fifteen specimens of each composite were subjected to the following finishing procedures: a 30 µm diamond (FM1), a sequence of a 30 µm and a 20 µm diamond (FM2) and a 30 µm diamond followed by a 12-fluted tungsten carbide finishing bur (FM3). As a reference, 15 other specimens of each material were treated with *Sof-Lex* discs. Evaluation of the surfaces was done with laser-stylus profilometry. Roughness parameters were average roughness (R_a) and profile-length ratio (LR). Statistical analysis of the data was performed by two-way and one-way Anova and post-hoc tests by Scheffé. Additional qualitative assessment of the finished composite surfaces was done by scanning electron microscopy (SEM) at a tension of 25 kV.

The composite materials and the finishing methods had a significant effect on surface roughness ($p < 0.001$ for R_a and LR). There were significant interactions between the materials and the finishing methods ($p < 0.001$ for R_a and LR). Three of the nanocomposites were significantly smoother after finishing according to FM1-3 and after the application of *Sof-Lex* discs compared to *Herculite XRV*. *Ceram X Duo* and *Herculite XRV* had similar surface roughness in terms of R_a and LR. Compared to a single 30 µm diamond and to a sequence of two diamonds (FM2), significantly lower roughness values on all composites were achieved by using a 30 µm diamond followed by a tungsten carbide instrument ($p < 0.001$ for R_a and LR). R_a - and LR-values after FM3 were similar or in some cases even lower than surface roughness measured after the application of *Sof-Lex* discs. Evaluation by SEM revealed that the use of a 30 µm diamond caused detrimental surface alteration on all types of composites. A remarkable number of porosities were detected on one of the nanofilled composites.

7 Literaturverzeichnis

1. Asmussen, E.:
Clinical relevance of physical, chemical, and bonding properties of composite resins. *Oper Dent* 10, 61-73 (1985).
2. Barthenstein, U., Finger, W.:
Bestimmung der Oberflächengüte von Composit-Füllungsmaterialien. *Dtsch zahnärztl Z* 29, 276-282 (1974).
3. Baseren, Meserret;
Surface Roughness of Nanofill and Nanohybrid Composite Resin and Ormocer-based Tooth-colored Restorative Materials after Several Finishing and Polishing Procedures. *J Biomater Appl* 19, 121-134 (2004).
4. Bauer, J.G., Caputo, A.A.:
The Surface of Composite Resin Finished with Instruments and Matrices. *J Prosthet Dent* 50, 351-357 (1983).
5. Bayne, S.C., Heymann, H.O., Swift Jr, E.J.:
Update on Dental Composite Restorations. *J Am Dent Assoc* 125, 687-701 (1994).
6. Bedran de Castro, A.K., Pimenta, L.A., Amaral, C.M., Ambrosano, G.M.:
Evaluation of microleakage in cervical margins of various posterior restorative systems. *J Esthet Restor Dent* 14, 107-114 (2002).
7. Berastegui, E., Canalda, C., Brau, E., Miquel, C.:
Surface roughness of finished composite resins. *J Prosthet Dent* 68, 742-749 (1992).
8. Blödorn, J., Syed-Ali, S.:
Bedienungsanleitung für das Rasterelektronenmikroskop PSEM 500 am Zentrum für Anatomie und Cytobiologie der Justus Liebig-Universität, Gießen, 1987.
9. Boghosian, A.A., Randolph, R.G., Jekkals, V.J.:
Rotary instrument finishing of microfilled and small-particle hybrid composite resins. *J Am Dent Assoc* 115, 299-301 (1987).
10. Bollen, C.M., 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, 258-269 (1997).
11. Bowen, R.L.:
Adhesive bonding of various materials to hard tooth tissues. II. Bonding to dentin promoted by a surface-active comonomer. *J Dent Res* 44, 895-902 (1965).
12. Bowen, R.L.:
Compatibiliy of various materials with oral tissues. I: The components in composite restorations. *J Dent Res* 58, 1493-1503 (1979).

13. Bowen, R.L., Nemoto, K., Rapson, J.E.:
Adhesive bonding of various materials to hard tissues : Forces developing in composite materials during hardening. J Am Dent Assoc 106, 475-477, (1983).
14. Brackett, W.W., Gilpatrick, R.O., Gunnin, T.D.:
Effect of finishing method on the microleakage of Class V resin composite restorations. Am J Dent 10, 189-191 (1997).
15. Brasseler, Gebr.:
Komet Dental Produktkatalog. Gebr. Brasseler GmbH & Co. KG, Lemgo, 2005
16. Brodmann, R.:
Optische Rauheitsmessung in der Fertigung. Sonderdruck aus: ATZ (Automobiltechnische Zeitschrift) 86, 521- 525 (1984).
17. Causton, B.:
Acrylic and Bis-GMA polymers. In: O'Brian, W.J., Ryge, G. (Hrsg.) An outline of dental materials and their selection. WB Saunders Co: Philadelphia, 1978.
18. Chapman, R.J., Nathanson, D.:
Excessive wear of natural tooth structure by opposing composite restorations. J Am Dent Assoc 196, 51-53 (1983).
19. Chen, R.C.S., Chan, D.C.N., Chan, K.C.:
A quantitative study of finishing and polishing techniques for composite. J Prosthet Dent 59, 292-297 (1988).
20. Christensen, G.J.:
Composites in der restaurativen Zahnmedizin. Phillip J Restaur Zahnmed 2, 245-254 (1985).
21. Christensen, R.P., Christensen, G.J.:
Comparison of Instruments and Commercial Pastes Used for Finishing and Polishing Composite Resin. Gen Dent 21, 40-45 (1981).
22. Chung, K.:
Effects of polishing procedures on the surface texture of resin composites. Dent Mater 10, 325-330 (1994).
23. Cobb, D.S., MacGregor, K.M., Vargas, M.A., Denehy, G.E.:
The physical properties of packable and conventional posterior resinbased composites: a comparison. J Am Dent Assoc 131, 1610-1615 (2000).
24. Collard, S.M., Vogel, J.J., Ladd, G.D.:
Respirability, microstructure and filler content of composite dusts. Am J Dent 4, 143-151 (1991).
25. Cook, W.D., Beech, D.R., Tyas, M.J.:
Structure and properties of methacrylate based dental restorative materials. Biomaterials 6, 362-368 (1985).

26. Cooley, R.L., Barkmeier, W.W., Matis, B.A., Siok, J.F.:
Staining of posterior resin restorative materials. *Quintessence Int* 18, 823-827 (1987).
27. Deliperi, S., Bardwell, D.N.:
An alternative method to reduce polymerization shrinkage in direct posterior composite restorations. *J Am Dent Assoc* 133, 1387-1398 (2002).
28. Denehy, G.E.:
A direct approach to restore anterior teeth. *Am J Dent* 13, 55-59 (2000).
29. Dentsply DeTrey:
Ceram X Duo - Produktinformation. Dentsply DeTrey; Konstanz, 2003
30. Dentsply DeTrey:
Firmenangaben zu *Ceram X Duo*. Dentsply DeTrey; Konstanz, 2005
31. DIN Normen:
DIN 4768 Ermittlung der Rauheitskenngrößen Ra, Rz, Rmax mit elektrischen Tastschnittgeräten. In DIN Deutsches Institut für Normung e.V., (Ed.): *DIN-Taschenbuch 1 Mechanische Technik Grundnormen*; Beuth Verlag GmbH: Berlin, Wien, Zürich, 295-297, 1995.
32. DIN Normen:
DIN 4777 Oberflächenmesstechnik Profilfilter zur Anwendung in elektrischen Tastschnittgeräten Phasenkorrekte Filter. In DIN Deutsches Institut für Normung e.V., (Ed.): *DIN-Taschenbuch 1 Mechanische Technik Grundnormen*; Beuth Verlag GmbH: Berlin, Wien, Zürich, 301-304, 1995.
33. DIN Normen:
DIN 4762 Oberflächenrauheit. In DIN Deutsches Institut für Normung e.V., (Ed.): *DIN-Taschenbuch 106 Verzahnungsterminologie Normen (Antriebstechnik 1)*; Beuth Verlag GmbH: Berlin, Wien, Zürich, 345, 1996.
34. 3M ESPE:
FiltekTM Supreme - Produktinformation. 3M ESPE AG; Seefeld, 2002a
35. 3M ESPE:
FiltekTM Supreme – Technisches Produkt Profil. 3M ESPE AG; Seefeld, 2002b
36. 3M ESPE:
Sof-LexTM – Technisches Produkt Profil. 3M ESPE AG; Seefeld, 2002c
37. 3M ESPE:
Sof-LexTM System – Gebrausanweisung. 3M ESPE AG; Seefeld, 2001
38. Eide, R., Tveit, A.B.:
Finishing and polishing of composites. *Acta Odontol Scand* 46, 307-312 (1988).
39. Ernst, C., Willershausen, B.:
Eine aktuelle Standortbestimmung zahnärztlicher Füllungskomposite. *Zm* 93, 30 (2003).

40. Feinprüf GmbH:
Betriebsanleitung Optischer Mikrotaster Focodyn. Göttingen, 1989
41. Feinprüf GmbH:
Betriebsanleitung Perthometer S8P. Oberflächenmessgerät zur Erfassung, graphischen Darstellung, Auswertung und Protokollierung von Oberflächenprofilen. Göttingen, 1989
42. Feinprüf-Perthen GmbH:
Betriebsanleitung Option Parallelaufzeichnung S8P. Göttingen, 1990
43. Ferreira Rde, S., Lopes, G.C., Baratieri, L.N.:
Direct posterior resin composite restorations: considerations on finishing/polishing. Clinical procedures. Quintessence Int 35, 359-366 (2004).
44. Gilde, H., Lenz, P., Richter, U.:
Experimentelle und statistische Untersuchungen zur Präparationsmethodik. Dtsch Zahnärztl Z 39, 798 (1984).
45. Gleghorn, T.:
Hybrid composites: providing the best for conservative restorations. Dent Today 19, 90-92 (2000).
46. Goldstein, G.R., Waknine, S.:
Surface roughness evaluation of composite resin polishing techniques. Quintessence Int 20, 199-204 (1989).
47. Guertsen, W.:
Klinik der Kompositfüllung. Hanser: München, 1989.
48. Hahn, R.:
Entwicklung und experimentelle Anwendungsprüfung keramischer und polymerkeramischer Zahnersatzwerkstoffe aus polymeren Werkstoffvorstufen. Dtsch Zahnärztl Z 52, 515-519 (1997).
49. Hannah, C.M., Smith, G.A.:
The surface finish of composite restorative materials. Br Dent J 135, 483-488 (1973).
50. Haywood, V.B., Heymann, H.O., Kusy, R.P., Whitley, J.O., Andreaus, S.B.:
Polishing porcelain veneers: an SEM and specular reflectance analysis. Dent Mater 4, 116-21 (1988).
51. Hellwig, E., Klimek, J., Attin, Th.:
Restaurationen mit plastischen Füllungsmaterialien. In: Hellwig, E., Klimek, J., Attin, Th. (Hrsg.) Einführung in die Zahnerhaltung. Urban & Fischer: München - Jena, 2003.
52. Heath, J.R., Jordan, J.H., Watts, D.C.:
The effect of time of trimming on the surface finish of anterior composite resins. J Oral Rehabil 20, 45-52 (1993).

53. Herrgott, A.M.L., Ziemiecki, T.L., Dennison, J.B.:
An evaluation of different composite resin systems finished with various abrasives. *J Am Dent Assoc* 119, 729-732 (1989).
54. Hickel, R.:
Moderne Füllungswerkstoffe. *Dtsch Zahnärztl Z* 52, 572-585 (1997).
55. Hickel, R.:
Aktuelle Stellungnahme der DGZMK/DGZ zur Einführung und Verwendung neuer Füllungswerkstoffe. DGZMK/DGZ vom 11.12.1998
56. Hoelscher, D.C., Neme, A.M.L., Pink, F.E., Hughes, P.J.:
The effect of three finishing systems on four esthetic restorative materials. *Oper Dent* 23, 36-42 (1998).
57. Hohmann, A., Hielscher, W.:
Lehrbuch der Zahntechnik, Bd.3: Werkstofftechnik. Quintessenz Verlags GmbH: Berlin, 2005.
58. Hondrum, S.O., Fernández Jr, R.:
Contouring, finishing, and polishing class 5 restorative materials. *Oper Dent* 22, 30-36 (1997).
59. Ivoclar Vivadent:
Firmenangaben zu *Tetric EvoCeram*. Ivoclar Vivadent; Schaan/ Liechtenstein, 2005a
60. Ivoclar Vivadent:
Tetric EvoCeram - Produktinformation. Ivoclar Vivadent; Schaan/ Liechtenstein, 2005b
61. Janda, R.:
Chemie und Physik zahnärztlicher Kunststoffe. In Eichner, K. Kappert, H.F. (Hrsg.): *Zahnärztlich Werkstoffe und ihre Verarbeitung*. Band 1: Grundlagen und Verarbeitung. Hüthig: Heidelberg, 1996.
62. Janda, R.:
Der Stand der Entwicklung auf dem Gebiet der Zahnfüllungskunststoffe I-III. *Quintessence Int* 6-8, 1067-1073, 1243-1253, 1393-1398 (1988).
63. Jefferies, S.R.:
The Art and Science of Abrasive Finishing and Polishing in Restorative Dentistry. *Dent Clin North Am* 42, 613-627 (1998).
64. Jones, C.S., Billington, R.W., Pearson, G.J.:
The in vivo perception of roughness of restorations. *Br Dent J* 10, 42-45 (2004).
65. Joniot, S.B., Grégoire, G.L., Auther, A.M., Roques, Y.M.:
Three-Dimensional Optical Profilometry Analysis of Surface States Obtained After Finishing Sequences for Three Composite Resins. *Oper Dent* 25, 311-315 (2000).
66. Jung, M.:
Der Einfluß unterschiedlicher Finierer auf die Kompositoberflächen. *Dtsch Zahnärztl Z* 49, 884-888 (1994).

67. Jung, M.:
Die Abtragsleistung unterschiedlicher Finierinstrumente an einem modernen Hybridkomposit. Dtsch Zahnäztl Z 51, 86-89 (1996).
68. Jung, M.:
Surface Roughness and Cutting Efficiency of Composite Finishing Instruments. Oper Dent 22, 98-104 (1997).
69. Jung, M.:
Ausarbeitung und Politur von laborgefertigten Keramik- und Kompositinlays in-vitro und in-vivo. Medizinische Habilitation, Gießen 1998.
70. Jung, M.:
Finishing and Polishing of a Hybrid Composite and a Heat-Pressed Glass Ceramic. Oper Dent 27, 175-183 (2002).
71. Jung, M., Baumstieger, M., Klimek, J.:
Effectiveness of diamond-impregnated felt wheels for polishing a hybrid composite. Clin Oral Investig 1, 71-76 (1997).
72. Jung, M., Bruegger, H., Klimek, J.:
Surface geometry of three packable and one hybrid composite after polishing. Oper Dent 28, 816-824 (2003a).
73. Jung, M., Voit, S., Klimek, J.:
Surface geometry of three packable and one hybrid composite after finishing. Oper Dent 28, 53-59 (2003b).
74. Jung, M., Wehlen, O., Klimek, J.:
Finishing and polishing of indirect composite and ceramic inlays in-vivo: occlusal surfaces. Oper Dent 29, 131-141 (2004).
75. Jung, M., Hornung, K., Klimek, J.:
Polishing Occlusal Surfaces of Direct Class II Composite Restorations *In Vivo*. Oper Dent 30, 139-146 (2005).
76. Jung, T., Borchers, L.:
Schleif- und Poliermittel. In Eichner, K. Kappert, H.F. (Hrsg.): Zahnärztlich Werkstoffe und ihre Verarbeitung. Band 1: Grundlagen und Verarbeitung. Hüthig: Heidelberg, 1996.
77. Kanter, J., Koski, R.E., Bogdan, M.S. :
How to achieve the best surface polish on composite resins. Can Dent Assoc J 11, 40-44 (1983).
78. Kaplan, B.A., Goldstein, G.R., Vijayaraghavan, T.V., Nelson, I.K.:
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, 34-38 (1996).
79. Kawaguchi, M., Fukushima, T., Horiba, T.:
Effect of monomer Structure on the Mechanical Properties of Light-cured Composite Resin. Dent Mater 8, 40-45 (1989).

80. Kawai, K., Urano, M.:
Adherence of plaque components to different restorative materials. *Oper Dent* 26, 396-400 (2001).
81. Kelsey, W.P., Latta, M.A., Shaddy, R.S., Stanislav, C.M.:
Physical properties of three packable resin-composite restorative materials. *Oper Dent* 25, 331-335 (2000).
82. KerrHAWe:
Herculite XRV - Produktinformation. KerrHaWe; Karlsruhe, 2000
83. KerrHAWe:
Premise - Produktinformation. KerrHaWe; Karlsruhe, 2005
84. Kournetas, N., Chakmakchi, M., Kakaboura, A., Rahiotis, C., Geis-Gerstorfer, J.:
Marginal and internal adaptation of Class II ormocer and hybrid resin composite restorations before and after load cycling. *Clin Oral Investig* 8, 123-129 (2004).
85. Krejci, I.:
Zahnfarbenen Restaurationen: Qualität, Potential und Indikationen. Hanser: München – Wien, 1992.
86. Krejci, I., Lutz, F.:
Kompositfüllungen – das 1 x 1 des Ausarbeitens. *Schweiz Monatsschr Zahnmed* 94, 1015-1028 (1984).
87. Kullmann, W.:
Die Oberflächenbeschaffenheit sog. Hybrid-Komposite. *Dtsch Zahnärztl Z* 40, 915-921 (1985).
88. Kullmann, W.:
Atlas der Zahnerhaltung mit Glas-Ionomer-Zement und Komposit-Kunststoffen. Hanser: München, 1990.
89. Lambrechts, P., Braem, M., Vanherle, G.:
Evaluation of clinical performance for posterior composite resins and dentin adhesivs. *Oper Dent* 12, 53-78 (1987).
90. Lange, R.H., Blödorn, J.:
Das REM. In: Lange, R.H., Blödorn, J. (Hrsg.) *Das Elektronenmikroskop: TEM + REM - Leitfaden für Biologen und Mediziner*. Thieme: Stuttgart-New York, 1981.
91. Leinfelder, K.F.:
New developments Resin restorative systems. *J Am Dent Assoc* 128, 573-581 (1997).
92. Leinfelder, K.F.:
Using composite resins as a posterior restorative material. *J Am Dent Assoc* 122, 65-70 (1991).
93. Leitão, J., Hegdahl, T.:
On the measuring of roughness. *Acta Odontol Scand* 39, 379-384 (1981).

94. Lendenmann, U.:
Tetric EvoCeram. Wissenschaftliche Dokumentation Ivoclar Vivadent (2005).
95. Lopes, G.C., Franke, M., Maia, H.P.:
Effect of finishing time and techniques on marginal sealing ability of two composite restorative materials. *J Prosthet Dent* 88, 32-36 (2002).
96. Lutz, F.:
Kompositfüllungen – Rationelleres Ausarbeiten und bessere Randqualität dank neu entwickelter Schleifköper (I). *Quintessenz* 31, 273-84 (1980).
97. Lutz, F., Phillips, R.W.:
A classification and evaluation of composit resin systems. *J Prosthet Dent* 50, 480-488 (1983).
98. Lutz, F., Phillips, R.W., Roulet, J.F., Imfeld, T.:
Kompositklassifikation und Wertung. *Schweiz Monatsschr Zahnmed* 93, 914-929 (1983).
99. Lutz, F., Setcos, J.C., Phillips, R.W.:
New finishing instruments for composite resins. *J Am Dent Assoc* 107, 575-580 (1983).
100. Manhart, J.:
Ästhetische Restauration im Seitenzahnbereich mit plastischen Kompositfüllungen. *Dental Spiegel* 23, 22-26 (2003).
101. Manhart, J., Kunzelmann, K.H., Chen, H.Y., Hickel, R.:
Mechanical properties and wear behavior of light-cured packable composite resins. *Dent Mater* 16, 33-40 (2000a).
102. Manhart, J., Kunzelmann, K.H., Chen, H.Y., Hickel, R.:
Mechanical properties of new composite restorative materials. *J Biomed Mater Res* 53, 353-361 (2000b).
103. Manhart, J., Chen, H.Y., Hickel, R.:
The suitability of packable resin-based composites for posterior restorations. *J Am Dent Assoc* 132, 639-645 (2001).
104. Marigo, L., Rizzi, M., La Torre, G., Rumi, G.:
3-D surface profile analysis: different finishing methods for resin composites. *Oper Dent* 26, 562-568 (2001).
105. Marshall Jr, G.W., Balooch, M., Tench, R.J., Kinney, J.H., Marshall, S.J.:
Atomic force microscopy of acid effects on dentin. *Dent Mater* 9, 265-268 (1993).
106. Martin, G., Loaëc, R.:
Makrofotografie. Christian: München, 2003.
107. Meier, M.:
Forschungsfeld Nanotechnologie – Querschnittstechnologie mit Raumfahrtspotenzial. *Newsletter Raumstation* 1, 4-9 (2000).

108. Mitchell, C.A., Pintado, M.R., Douglas, W.H.:
Iatrogenic tooth abrasion comparisons among composite materials and finishing techniques. *J Prosthet Dent* 88, 320-328 (2002).
109. Mitra, S.B., Wu, D., Holmes, B.N.:
An application of nanotechnology in advanced dental materials. *J Am Dent Assoc* 134, 1382-1390 (2003).
110. Morgan, M.:
Finishing and polishing of direct posterior resin restorations. *Pract Proced Aesthet Dent* 16, 211-217 (2004).
111. Nadarajah, V., Neiders, M.E., Cohen, R.E.:
Local inflammatory effects of composite resins. *Comp Contin Educ Dent* 18, 367-368, 370, 372-374 (1997).
112. Ohnsorge, J., Holm, P., Pfefferkorn, G.:
Rasterelektronenmikroskopie: Eine Einführung für Mediziner und Biologen. Thieme: Stuttgart-New York (1987).
113. Ozgunaltay, G., Yazici, A.R., Gorucu, J.:
Effect of finishing and polishing procedures on the surface roughness of new tooth-coloured restoratives. *J Oral Rehabil* 30, 218-224 (2003).
114. Peutzfeldt, A., Asmussen, E.:
Composite restorations: influence of flowable and self-curing resin composite linings on microleakage in vitro. *Oper Dent* 27, 569-575 (2002).
115. Phillips, R.W.:
Kunststoffe in der restaurativen Zahnmedizin. *Phillip J* 3, 183 (1986).
116. Pratten, D.H., Johnson, G.H.:
An evaluation of finishing instruments for an anterior and a posterior composite. *J Prosthet Dent* 60, 154-158 (1988).
117. Rabe, U., Pantke, H.:
Die Erfassung der Oberflächenverhältnisse biologischer Objekte mit charakteristischen Maßzahlen. *Dtsch Zahnärztl Z* 37, 869-873 (1982).
118. RCD/AG:
KerrHawe, *Premise*. Dental Newspaper 9, 3 (2004).
119. Riedel, H., Vahl, J.:
Experimentelle Untersuchungen über neuzeitliche Füllungsmaterialien mit Hilfe des Rasterelektronen-Auflichtmikroskops. *Dtsch Zahnärztl Z* 22, 476-486 (1967).
120. Riethe, P., Rau, G.:
Kariesprophylaxe und konservierende Therapie. In: Rateitschak, K.H. (Hrsg.) *Farbatlanten der Zahnmedizin*. Band 6. Thieme: Stuttgart – New York, 1988.

121. Rimondini, L., Faré, 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, 556-562 (1997).
122. Robert, D.:
The polishing of composite resins, a preliminary study using laser reflection. *J Can Dent Assoc* 55, 561-565 (1989).
123. Roeder, L.B., Tate, W.H., Powers, J.M.:
Effect of finishing and polishing procedures on the surface roughness of packable composites. *Oper Dent* 25, 534-543 (2000).
124. Roulet, J.F.:
Degradation of dental polymers. Karger: Basel, 1986.
125. Sander, M.:
A Practical Guide to the Assessment of Surface Texture. Feinprüf-Perthen GmbH, Göttingen (1991).
126. Schaad, Ph., Paris, E., Cuisinier, F.J.G., Voegel, J.-C.:
Atomic force microscopy study of human tooth enamel surfaces. *Scanning Microscopy* 7, 1149-1152 (1993).
127. Shintani, H., Satou, J., Satou, N., Hayashihara, T.I.:
Effects of various finishing methods on staining and accumulation of *Streptococcus mutans* HS-6 on composite resins. *Dent Mater* 1, 225-227 (1985).
128. Silikas, N., Kavvadia, K., Eliades, G., Watts, D.:
Surface characterization of modern resin composites: A multitechnique approach. *Am J Dent* 18, 95-100 (2005).
129. Stewart, G.P., Bachman, T.A., Hatton, J.F. :
Temperature rise due to finishing of direct restorative materials. *Am J Dent* 4, 23-28 (1991).
130. Suzuki, S., Leinfelder, K., Kawai, K., Tsuchitani, Y.:
Effect of particle variation on wear rates of posterior composites. *Am J Dent* 8, 173-178 (1995).
131. Swift Jr, E.J., Perdigao, J., Heymann, H.O.:
Bonding to enamel and dentin: A brief history and state of the art, 1995 *Quintessence Int* 26, 95-110 (1995).
132. Tate, W.H., DeSchepper, E.J., Cody, T.:
Quantitative analysis of six composite polishing techniques on a hybrid composite material. *J Esthet Dent* 4, 30-32 (1992).
133. Tate, W.H., Powers, J.M.:
Surface roughness of composites and hybrid ionomers. *Oper Dent* 21, 53-58 (1996).

134. Tjan, A.H.L., Clayton, A.C.:
The polishability of posterior composites. *J Prosthet Dent* 61, 138-146 (1989).
135. Turssi, C.P., Saad, J.R., Duarte Jr, S.L., Rodrigues Jr, A.L.:
Composite surfaces after finishing and polishing techniques. *Am J Dent* 13, 136-138 (2000).
136. van Dijken, J.W.V.:
A clinical evaluation of anterior conventional, microfilled and hybrid composite resin fillings. A 6 year follow up study. *Acta Odontol Scand* 44, 357-367 (1986).
137. van Noort, R., Davis, L.G.:
The surface finish of composite resin restorative materials. *Br Dent J* 157, 360-364 (1984).
138. Venz, S.:
Optische und profilometrische Untersuchung zur Politur und Oberflächenglätte von Komposits. *Zahnärztliche Welt* 92, 31-37 (1983).
139. Viohl, J.:
Kunststoff-Füllungswerkstoffe. In: Eichner, K. (Hrsg.): *Zahnärztlich Werkstoffe und ihre Verarbeitung. Band 2: Werkstoffe unter klinischen Aspekten.* Hüthig: Heidelberg, 1985.
140. Warren, J.R., Clark, N.P.:
Posterior composite resin: Current trends in restorative techniques. Part 2: Insertion, finishing, and polishing. *Gen Dent* 35, 497-499 (1985).
141. Wassel, R.W., McCabe, J.F., Walls, A.W.:
Wear characteristics in a two-body wear test. *Dent Mater* 10, 269-274 (1994).
142. Weitman, R.T., Eames, W.B.:
Plaque accumulation on composite surfaces after various finishing procedures. *J Am Dent Assoc* 91, 101-106 (1975).
143. Whitehead, S.A., Shearer, A.C., Watts, D.C., Wilson, N.H.F.:
Comparison of two stylus methods for measuring surface texture. *Dent Mater* 15, 79-86 (1999).
144. Whitehead, S.A., Shearer, A.C., Watts, D.C., Wilson, N.H.F.:
Comparison of methods for measuring surface roughness of ceramic. *J Oral Rehabil* 22, 421-427 (1995).
145. 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, 1299-1305 (1991).
146. Wilson, N.H.F., Wilson, M.A., Smith, G.A.:
A clinical trial of a visible light cured posterior composite resin material. 4-year result. *Quintessence Int* 19, 133-139 (1988).

147. Xu, H.H.K., Kelly, J.R., Jahanmir, S., Thompson, V.P., Rekow, E.D.:
Enamel subsurface damage due to tooth preparation with diamonds. *J Dent Res* 76, 1698-1706 (1997).
148. Yap, A.U.J., Lim, L.Y., Yang, T.Y., Ali, A., Chung, S.M.:
Influence of dietary solvents on strength of nanofill and ormocer composites. *Oper Dent* 30, 129-133 (2005).
149. Yap, A.U.J., Lye, K.W., Sau, C.W. :
Surface characteristics of tooth-colored restoratives polished utilizing different polishing systems. *Oper Dent* 22, 260-265 (1997).
150. Yap, A.U.J., Mok, B.Y.Y.:
Surface finish of a new hybrid aesthetic restorative material. *Oper Dent* 27, 161-166 (2002).
151. Yap, A.U.J., Tan, C.H., Chung, S.M.:
Wear behaviour of new composite restoratives. *Oper Dent* 29, 269-274 (2004a).
152. Yap, A.U.J., Wong, M.L., Lim, A.C.:
The effect of polishing systems on microleakage of tooth-coloured restoratives.
Part 2: Composite and polyacid-modified composite resin. *J Oral Rehabil* 27, 205-210 (2000).
153. Yap, A.U.J., Wong, N.Y., Siow, K.S.:
Composite cure and shrinkage associated with high intensity curing light. *Oper Dent* 28, 357-364 (2003).
154. Yap, A.U.J., Yap, S.H., Teo, C.K., Ng, J.J.:
Comparison of surface finish of new aesthetic restorative materials. *Oper Dent* 29, 100-104 (2004b).
155. Yu, X.Y., Wieczkowski, G., Davis, E.L., Joynt, R.B.:
Influence of finishing technique on microleakage. *J Esthet Dent* 2, 142-144 (1990).

8 Anhang

Das folgende Kapitel liefert die Messergebnisse, die prüfstatistischen Auswertungen sowie die REM-Auswertung in tabellarischer Form. Zunächst werden die verwendeten Abkürzungen aufgelistet:

He = Herculite XRV

Pr = Premise

FS = Filtek Supreme

CX = Ceram X Duo

TE = Tetric EvoCeram

AV1 = Ausarbeitung mit einem Diamantfinierer (30 μm)

AV2 = Ausarbeitung mit zwei Diamantfinierern (30 μm , 20 μm)

AV3 = Ausarbeitung mit einem Diamant- (30 μm) und einem Hartmetallfinierer (12 Schneiden)

RG = Referenzgruppe, d.h. Bearbeitung mit dreifach abgestuften *Sof-Lex* Scheiben (mittlere, feine, sehr feine Körnung)

R_a = arithmetischer Mittenrauhwert

LR = Profillängenverhältnis

8.1 Tabellarische Darstellung der profilometrischen Messergebnisse

Tab. 3: Ergebnisse der profilometrischen Untersuchung

Verfahren	Material				
	Herculite XRV	Premise	Filtek Supreme	Ceram X Duo	Tetric EvoCeram
	Ra (μm) / LR				
1. AV1	2 / 1,793	2,03 / 1,458	1,74 / 1,587	1,85 / 1,522	1,84 / 1,587
2.	2,15 / 1,807	1,96 / 1,572	2,02 / 1,615	1,95 / 1,514	1,89 / 1,657
3.	2,14 / 1,781	2,08 / 1,454	2,1 / 1,586	1,77 / 1,539	1,74 / 1,577
4.	2,43 / 1,785	1,85 / 1,461	2,16 / 1,540	1,96 / 1,714	1,79 / 1,593
5.	2,37 / 1,759	1,91 / 1,477	2,15 / 1,495	2,07 / 1,693	2,16 / 1,591
6.	2,25 / 1,629	2,22 / 1,447	2,16 / 1,547	1,76 / 1,714	2,47 / 1,524
7.	1,76 / 1,735	1,85 / 1,427	2,05 / 1,542	1,8 / 1,702	2,16 / 1,602
8.	2,33 / 1,554	2,1 / 1,479	2,11 / 1,552	2,19 / 1,775	1,7 / 1,546
9.	2,1 / 1,547	2,24 / 1,435	2,04 / 1,546	1,91 / 1,666	1,84 / 1,572
10.	2,21 / 1,627	1,91 / 1,452	2,33 / 1,570	1,94 / 1,749	2,13 / 1,595
11.	2,17 / 1,518	1,71 / 1,450	2,38 / 1,542	1,94 / 1,626	1,77 / 1,581
12.	1,89 / 1,539	1,96 / 1,460	1,92 / 1,470	1,95 / 1,709	2,23 / 1,563

13.	2,49 / 1,565	1,96 / 1,498	1,84 / 1,549	2,01 / 1,651	1,77 / 1,559
14.	1,79 / 1,513	1,8 / 1,522	2,1 / 1,514	1,84 / 1,584	2,14 / 1,620
15.	2,05 / 1,558	1,72 / 1,519	1,91 / 1,492	1,9 / 1,699	1,96 / 1,604
Mittelwert	2,142 / 1,647	1,953 / 1,474	2,067 / 1,543	1,923 / 1,657	1,973 / 1,585
1. AV2	1,08 / 1,501	1,09 / 1,569	0,79 / 1,450	1,12 / 1,604	0,78 / 1,466
2.	1,04 / 1,550	0,89 / 1,483	1,02 / 1,516	1,05 / 1,628	0,97 / 1,529
3.	1 / 1,566	0,85 / 1,474	0,85 / 1,412	0,95 / 1,616	0,79 / 1,419
4.	0,99 / 1,541	1,05 / 1,586	0,79 / 1,415	0,77 / 1,411	0,97 / 1,580
5.	0,9 / 1,575	1,21 / 1,526	0,91 / 1,517	1,17 / 1,593	1,05 / 1,619
6.	1,03 / 1,539	0,99 / 1,566	0,89 / 1,502	1 / 1,604	0,83 / 1,535
7.	0,99 / 1,552	1,03 / 1,571	0,94 / 1,552	0,93 / 1,561	0,77 / 1,465
8.	1,03 / 1,572	0,91 / 1,449	0,95 / 1,573	1,04 / 1,610	0,76 / 1,440
9.	0,96 / 1,555	0,85 / 1,497	0,97 / 1,494	1,06 / 1,641	0,82 / 1,446
10.	1,08 / 1,584	0,89 / 1,495	0,94 / 1,544	0,99 / 1,605	0,8 / 1,455
11.	1,13 / 1,587	0,95 / 1,445	0,87 / 1,521	1,14 / 1,540	0,88 / 1,441
12.	0,88 / 1,513	0,84 / 1,468	0,9 / 1,513	1,06 / 1,528	0,84 / 1,470
13.	1,02 / 1,546	0,93 / 1,477	1,03 / 1,592	0,93 / 1,595	0,96 / 1,455
14.	1,04 / 1,593	0,81 / 1,459	0,84 / 1,367	1,11 / 1,612	0,82 / 1,449
15.	0,98 / 1,598	0,8 / 1,457	0,9 / 1,525	1,05 / 1,381	0,9 / 1,515
Mittelwert	1,01 / 1,558	0,939 / 1,501	0,906 / 1,500	1,025 / 1,569	0,863 / 1,486
1. AV3	0,58 / 1,370	0,42 / 1,216	0,59 / 1,300	0,6 / 1,400	0,51 / 1,279
2.	0,58 / 1,379	0,52 / 1,223	0,43 / 1,190	0,73 / 1,446	0,42 / 1,232
3.	0,66 / 1,484	0,38 / 1,149	0,49 / 1,163	0,64 / 1,439	0,59 / 1,313
4.	0,62 / 1,398	0,34 / 1,108	0,44 / 1,157	0,71 / 1,486	0,62 / 1,346
5.	0,53 / 1,322	0,33 / 1,098	0,51 / 1,291	0,61 / 1,412	0,39 / 1,181
6.	0,59 / 1,384	0,49 / 1,165	0,53 / 1,268	0,69 / 1,483	0,47 / 1,244
7.	0,44 / 1,203	0,46 / 1,238	0,45 / 1,133	0,64 / 1,441	0,68 / 1,372
8.	0,63 / 1,372	0,47 / 1,208	0,45 / 1,193	0,68 / 1,454	0,5 / 1,253
9.	0,66 / 1,418	0,39 / 1,112	0,58 / 1,303	0,6 / 1,407	0,43 / 1,237
10.	0,61 / 1,408	0,49 / 1,214	0,41 / 1,166	0,64 / 1,434	0,54 / 1,308
11.	0,57 / 1,357	0,44 / 1,197	0,56 / 1,294	0,6 / 1,420	0,42 / 1,239
12.	0,56 / 1,359	0,47 / 1,211	0,48 / 1,236	0,6 / 1,416	0,54 / 1,308
13.	0,58 / 1,381	0,36 / 1,132	0,53 / 1,268	0,7 / 1,491	0,41 / 1,225
14.	0,66 / 1,449	0,39 / 1,157	0,58 / 1,269	0,63 / 1,441	0,62 / 1,361
15.	0,65 / 1,414	0,48 / 1,234	0,63 / 1,358	0,55 / 1,366	0,55 / 1,298
Mittelwert	0,595 / 1,380	0,429 / 1,177	0,511 / 1,239	0,641 / 1,436	0,513 / 1,280
1. RG	0,64 / 1,386	0,52 / 1,277	0,5 / 1,214	0,65 / 1,389	0,44 / 1,177
2.	0,53 / 1,329	0,41 / 1,215	0,52 / 1,231	0,81 / 1,501	0,56 / 1,265
3.	0,69 / 1,454	0,42 / 1,213	0,36 / 1,149	0,9 / 1,526	0,45 / 1,211
4.	0,67 / 1,327	0,42 / 1,164	0,41 / 1,185	0,72 / 1,436	0,61 / 1,272
5.	0,76 / 1,426	0,36 / 1,168	0,51 / 1,204	0,75 / 1,414	0,45 / 1,182
6.	0,78 / 1,481	0,47 / 1,209	0,42 / 1,170	0,76 / 1,485	0,63 / 1,284
7.	0,74 / 1,501	0,44 / 1,261	0,6 / 1,281	0,88 / 1,532	0,65 / 1,355
8.	0,61 / 1,401	0,3 / 1,149	0,46 / 1,139	0,72 / 1,431	0,42 / 1,172
9.	0,69 / 1,440	0,61 / 1,351	0,46 / 1,216	0,76 / 1,464	0,58 / 1,334
10.	0,67 / 1,443	0,41 / 1,227	0,55 / 1,282	0,64 / 1,341	0,48 / 1,251
11.	0,64 / 1,420	0,51 / 1,271	0,57 / 1,263	0,84 / 1,458	0,44 / 1,172
12.	0,67 / 1,472	0,42 / 1,242	0,44 / 1,194	0,81 / 1,481	0,39 / 1,106
13.	0,63 / 1,429	0,32 / 1,108	0,76 / 1,394	0,75 / 1,397	0,46 / 1,175
14.	0,59 / 1,275	0,27 / 1,126	0,52 / 1,251	0,7 / 1,473	0,53 / 1,239
15.	0,57 / 1,378	0,3 / 1,135	0,44 / 1,164	0,72 / 1,448	0,56 / 1,274
Mittelwert	0,659 / 1,411	0,412 / 1,208	0,501 / 1,222	0,761 / 1,452	0,51 / 1,231

8.2 Tabellarische Zusammenstellung der prüfstatistischen Auswertung

Dieses Kapitel liefert eine Zusammenfassung der mittels einfacher Varianzanalyse und Anschlussstest nach Scheffé beurteilten Unterschiede zwischen den Kompositen und den Bearbeitungsverfahren.

Signifikante Unterschiede mit $p < 0,001$ werden hierbei mit ** gekennzeichnet, solche mit $p < 0,05$ mit *.

Tab. 4: Statistischer Vergleich der Bearbeitungsverfahren

	Material	Herculite XRV			Premise			Filtek Supreme			Ceram X Duo			Tetric EvoCeram		
	Verfahren	AV1	AV2	AV3	AV1	AV2	AV3	AV1	AV2	AV3	AV1	AV2	AV3	AV1	AV2	AV3
Ra	AV1															
	AV2	**						**			**			**		
	AV3	**	**			**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
	RG	**	**			**	**	**	**	**	**	**	*	**	**	
LR	AV1															
	AV2	*								*			**			
	AV3	**	**			**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
	RG	**	**			**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**

Tab. 5: Statistischer Vergleich der Komposite

	Verfahren	AV1				AV2				AV3				RG			
	Material	He	Pr	FS	CX	He	Pr	FS	CX	He	Pr	FS	CX	He	Pr	FS	CX
Ra	He																
	Pr									**				**			
	FS									*	*			**	**	**	**
	CX	*						*		**	**	**	**	**	*	**	**
	TE					*			**	*	*		**	**	*		**
LR	He																
	Pr	**								**				**			
	FS	*								**				**			
	CX		**	*			*	*		**	**	**	**	**	**	**	**
	TE		*			*		*		**	**	**	**	**	*		**

8.3 Tabellarische Zusammenstellung der rasterelektronenmikroskopischen Auswertung

Tab. 6 gibt eine Übersicht über die Anzahl der 96 Rasterfelder pro Bild, welche anhand der rasterelektronenmikroskopischen Auswertung einem bestimmten Merkmal zugeordnet wurde.

Tab. 6: Ergebnisse der Untersuchung im REM:

Material	Verfahren		Merkmale			
			glatt/homogen (1)	gering rauh (2)	sehr rauh (3)	Destruktionen (4)
Herculite XRV	AV 1	Bild 1	0,5	64,5	31	0
		Bild 2	0	0	78	18
		Mittelwert	0,25	32,25	54,5	9
	AV 2	Bild 1	0	37	59	0
		Bild 2	0	66	30	0
		Mittelwert	0	51,5	44,5	0
	AV 3	Bild 1	1	79	16	0
		Bild 2	1	81,5	13,5	0
		Mittelwert	1	80,25	14,75	0
	AV 4	Bild 1	7	88	1	0
		Bild 2	3,5	91,5	1	0
		Mittelwert	5,25	89,75	1	0
Premise	AV 1	Bild 1	0	1,5	82,5	12
		Bild 2	0	3,5	68,5	24
		Mittelwert	0	2,5	75,5	18
	AV 2	Bild 1	0	42,5	53,5	0
		Bild 2	0	56,5	34,5	5
		Mittelwert	0	49,5	44	2,5
	AV 3	Bild 1	0	60	27	9
		Bild 2	0	51	45	0
		Mittelwert	0	55,5	36	4,5
	AV 4	Bild 1	2	90	4	0
		Bild 2	1	95	0	0
		Mittelwert	1,5	92,5	2	0
Filtek Supreme	AV 1	Bild 1	0	13,5	60,5	22
		Bild 2	0	4,5	70,5	21
		Mittelwert	0	9	65,5	21,5
	AV 2	Bild 1	0	26,5	60,5	9
		Bild 2	0	11	85	0
		Mittelwert	0	18,75	72,75	4,5
	AV 3	Bild 1	3,5	65	15,5	12
		Bild 2	1	76	18	1
		Mittelwert	2,25	70,5	16,75	6,5
	AV 4	Bild 1	0	96	0	0
		Bild 2	0	91	5	0
		Mittelwert	0	93,5	2,5	0
Ceram X Duo	AV 1	Bild 1	0	8,5	79,5	8
		Bild 2	0	2	75	19
		Mittelwert	0	5,25	77,25	13,5
	AV 2	Bild 1	0	30	58	8
		Bild 2	0	55	33	8
		Mittelwert	0	42,5	45,5	8

	AV 3	Bild 1	1,5	78,5	16	0
		Bild 2	0	59	37	0
		Mittelwert	0,75	68,75	26,5	0
	AV 4	Bild 1	3,5	92,5	0	0
		Bild 2	4	92	0	0
		Mittelwert	3,75	92,25	0	0
Tetric EvoCeram	AV 1	Bild 1	0	2	77	17
		Bild 2	0	1,5	77,5	17
		Mittelwert	0	1,75	77,25	17
	AV 2	Bild 1	0	11,5	76,5	8
		Bild 2	0	17	77	2
		Mittelwert	0	14,25	76,75	5
	AV 3	Bild 1	4,5	77	7,5	7
		Bild 2	0	80,5	15,5	0
		Mittelwert	2,25	78,75	11,5	3,5
	AV 4	Bild 1	3,5	92,5	0	0
		Bild 2	2	91	3	0
		Mittelwert	2,75	91,75	1,5	0

9 Danksagung

Herrn Prof. Dr. M. Jung möchte ich an dieser Stelle für die Überlassung des Themas, die vorzügliche und nette Betreuung sowie die Unterstützung bei der Durchführung der Arbeit herzlich danken.

Mein Dank gilt weiter Herrn Magdowsky für die Unterstützung bei der Durchführung der REM-Aufnahmen sowie Herrn Bethge bei der Entwicklung der REM-Bilder.

Ferner danke ich Frau Meier für ihre labortechnischen Ratschläge.

Ein ganz besonderes Dankeschön möchte ich meiner Kommilitonin Katja Eichelberger aussprechen, die mir bei den praktischen Ausführungen der vorliegenden Studie sehr hilfreich zur Seite stand.

Nicht zuletzt danke ich meinem Bruder Daniel, der mir bei der Korrektur der Arbeit eine wertvolle Hilfe war.

10 Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Kathrin Sehr
Geburtsdatum: 21.10.1977
Geburtsort: Mainz
Staatsangehörigkeit: deutsch
Eltern: Bernhard Sehr, Industriekaufmann
(verstorben im Mai 2000)
Christel Sehr, geb. Hering, Krankenschwester

Schulbildung

1984 - 1988 Besuch der Martinus-Grundschule in Mainz
1988 - 1997 Besuch des Gymnasiums der Fürst-Johann-Ludwig Schule
in Hadamar
05/1997 Erwerb der allgemeinen Hochschulreife

Hochschulstudium

10/1997 – 09/2000 Studium der Mathematik, Englisch und Biologie auf
Lehramt für Gymnasium an der Johannes-Gutenberg
Universität Mainz
09/1999 Zwischenprüfung in Mathematik und Englisch
10/2000 – 03/2001 Studium der Mathematik und Englisch an der Universität
Glasgow, Schottland
04/2001 – 06/2006 Studium der Zahnheilkunde an der Justus-Liebig-
Universität Gießen
04/2002 naturwissenschaftliche Vorprüfung
10/2003 zahnärztliche Vorprüfung
06/2006 zahnärztliche Prüfung

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.



édition scientifique
VVB LAUFERSWEILER VERLAG

VVB LAUFERSWEILER VERLAG
STAUFENBERGRING 15
D - 3 5 3 9 6 G I E S S E N

Tel: 0641-5599888 Fax: -5599890
redaktion@doktorverlag.de
www.doktorverlag.de

ISBN 3-8359-5137-8



9 783835 195137 2

