

Oberflächenrauigkeit und Substanzabtragung bei sonoabrasiver Präparation in vitro

Zusammenfassung

Die Oberflächenrauigkeit in Schmelz und Dentin nach sonoabrasiver Präparation mit dem SONICSYS-System wurde mit Hilfe eines profilometrischen Messverfahrens mit rotierender Präparation verglichen. Hierzu wurden 100 standardisierte Kastenkaavitäten mit oszillierenden quaderförmigen Instrumenten bzw. rotierenden Schleifern mit ansteigender mittlerer Diamantkorngrösse in 15 µm, 25 µm, 46 µm, 64 µm und 91 µm nachpräpariert. Mit Ausnahme der 91-µm-Diamantierung, bei der die Mittelrauwerte nach rotierender Instrumentierung signifikant höher lagen, konnten zwischen rotierender und oszillierender Bearbeitung keine unterschiedlichen Oberflächenrauigkeiten ermittelt werden. Im Rasterelektronenmikroskop bei 100facher Vergrößerung zeigten die Proben für das jeweilige Präparationsverfahren typische Bearbeitungsspuren: Bei rotierenden Schleifern wurden Furchen längs der Rotationsrichtung, bei der Sonopräparation ovale Mulden festgestellt. Zur Standardisierung der Messungen für die Abtragsleistung bei sonoabrasiver Präparation wurden unter Verwendung eines Luftlagerschlittens Glasprobekörper verwendet. Glas hat einen mit humanem Zahnschmelz vergleichbaren Biegezeigefaktor (KI_d) und zeigt daher als sprödhartes Material ein ähnliches Abtragsverhalten. Während bei 15-µm-, 25-µm- und 46-µm-Diamantierung eine ansteigende Abtragsleistung erhoben wurde, führten gröbere Diamantbelegungen von 64 µm und 91 µm zu keiner weiteren Zunahme der mittleren Abtragswerte. Die bei diesem Versuchsaufbau dokumentierte und als ideal bewertete Vorschubkraft für manuelle sonoabrasive Präparation lag bei ca. 1,4 N. Für die klinische Anwendung eignen sich daher sowohl mittelfeine 46-µm- als auch feine 25-µm-Diamantbelegungen, die beide einen relativ effizienten Substanzabtrag ermöglichen und je nach Anwendungsbereich Bearbeitungsflächen mit gröberer und feinerer Oberfläche zurücklassen.

Acta Med Dent Helv 4: 117–124 (1999)

Schlüsselwörter: oszillierende Präparationstechnik, Oberflächenrauigkeit, Substanzabtrag

Zur Veröffentlichung angenommen: 29. April 1999

Korrespondenzadresse:

Dr. med. dent. B. Hugo, Universität Würzburg,
Klinik für Zahnerhaltung und Parodontologie, Pleicherwall 2,
D-97070 Würzburg, Tel. 0049/(0)931/201-7242,
Fax 201-7240, E-Mail: burkard.hugo@mail.uni-wuerzburg.de

BURKARD HUGO¹, ALEXANDROS STASSINAKIS²,
NORBERT HOFMANN¹, CHRISTOPH STARZ¹ und
BERND KLAIBER¹

¹ Klinik für Zahnerhaltung und Parodontologie der Universität Würzburg

² Klinik für Zahnerhaltung, Präventiv- und Kinderzahnmedizin der Universität Bern

Einleitung

Die Hauptziele der Präparationstechnik werden von KIMMEL (1997) mit schonender Arbeitstechnik (atraumatisch für Zahn und umgebendes Gewebe), einem optimalen Ergebnis (Präzision der Grundform, Randgeometrie und -oberfläche) und rationeller Arbeitsgestaltung (Systematik, Ergonomie, Anwender- und Patientenschutz) zusammengefasst. Mit oszillierenden Antriebssystemen und teildiamantierten Ansätzen (HUGO et al. 1992, 1998) ist unter Vermeidung der Nachbarzahnbeschädigung, insbesondere im Approximalebene, eine Optimierung rotierender Präparationsverfahren möglich. Untersuchungen hochfrequent oszillierender Präparationssysteme bezüglich Randgeometrie und -qualität, Präzision der Grundform sowie zum Aspekt der Nachbarzahnverletzung liegen bereits vor (KREJCI et al. 1995, HUGO et al. 1996a, 1996b). Die Art und Weise der Diamantbelegung von Instrumenten für verschiedene Anwendungsbereiche der sonoabrasiven Präparation ist noch zu überprüfen. Diamantierungen mit unterschiedlicher Korngrösse wirken sich zum einen auf die Oberflächenrauigkeit der bearbeiteten Zahnschmelz und zum anderen auf die Abtragungseffizienz der Präparationsansätze aus (KIMMEL 1997). Hauptgründe für den Restitutionsersatz sind sowohl Randdefekte als auch Sekundärkaries (MJÖR & QVIST 1997). Studien zur Kavitätenpräparation zeigen, dass verschiedene Finierverfahren eine Verbesserung der Füllungsrandqualität (REICH et al. 1987, SCHALLER et al. 1988) und damit auch der klinischen Bewertung von Restaurationen (BOYDE & KNIGHT 1970, BOYDE et al. 1972, BOYDE 1973, RODDA & GAVIN 1977, LESTER 1978) bewirken. Ziel der vorliegenden Untersuchung war es daher, den Zusammenhang zwischen mittlerer Korngrösse des Diamantbelags, der Oberflächenrauigkeit und dem Substanzabtrag zu ermitteln.

Material und Methoden

Oberflächenrauigkeit und -textur nach sonoabrasiver bzw. rotierender Zahnpräparation

Für die Untersuchung wurden 25 in einer 0,5%igen Chloramin-T-Lösung gelagerte, kariesfreie menschliche Molaren verwendet. An jedem Zahn wurden vier standardisierte Klasse-II-Kastenkavitäten (Höhe 3,5 mm, Breite 2,5 mm, Tiefe 1,2 mm) rotierend vorpräpariert (Schleifkörper ISO-Nr. 806 314 15 6524/ 010) und mit einem wasserfesten Stift angefärbt. Gegenüberliegende Kavitäten eines Zahnes wurden jeweils oszillierend bzw. rotierend nachpräpariert. Die Vollständigkeit der Nachbearbeitung der Kavitäten konnte durch die entfernte Farbschicht kontrolliert werden. Die sonoabrasive Nachpräparation erfolgte mit quaderförmigen Airscaleransätzen (Höhe 3,7 mm, Breite 2,7 mm, Tiefe 1,4 mm), die jeweils mit fünf verschiedenen Diamantbelägen (mittlere Korngrösse jeweils 15 µm, 25 µm, 46 µm, 64 µm und 91 µm nach DIN 848) beschichtet waren. Zur rotierenden Nachpräparation wurden zylinderförmige Schleifer (ISO Nr. 806 314 15 5614 010) mit entsprechenden Diamantbelägen aus der gleichen Herstellung (Komet/Brasseler, Lemgo, Deutschland) verwendet. Die oszillierenden Instrumente wurden durch einen im Schallbereich (< 6,5 kHz) schwingenden Airscaler Sonicflex 2000 N (KaVo, Biberach, Deutschland) bei konstantem Antriebsluftdruck von 3 bar und einer Spraywassermenge von 30 ml/min angetrieben. Für die rotierende Präparation wurde ein Schnellaufwinkelstück (24 CNW, KaVo, Biberach, Deutschland) mit einer mittleren Umdrehungszahl von ca. 40 000 U/min (WEBER 1993) und einer Spraywassermenge von 50 ml/min verwendet. Die Betriebsparameter wurden mittels einer speziell dafür geschaffenen Versorgungseinheit konstant gehalten.

Es wurden so mit jeder Diamantbelegung (mittlere Korngrösse 15 µm, 25 µm, 46 µm, 64 µm und 91 µm) sowohl sonoabrasiv als auch rotierend jeweils 10 Kavitäten nachbearbeitet. Zur Entfernung der Schmierschicht erfolgte die Kavitätenreinigung mit Tubulicid® (Dental Therapeutics, Nacka, Schweden) (HALLER & KLAIBER 1988).

Die Oberflächenrauigkeit im Bereich der pulpalen Wände wurde mit dem Perthometer C5D (Feinprüf, Göttingen, Deutschland) erhoben. Für jede Kavität wurden jeweils 3 Messprofile mit einer Taststrecke von einem Millimeter im Schmelz wie im Dentin der pulpanahen Wand erhoben und der Mittelrauwert Ra bestimmt (Abb. 1). Der Mittelrauwert als Kenngrösse nach DIN 4762 ist definiert als arithmetischer Mittelwert aller nach oben und unten gerichteten Abweichungen des Rauheitsprofils von dessen Mittellinie.

Zum Vergleich der Oberflächentextur nach unterschiedlicher Bearbeitung wurden jeweils 2 Proben randomisiert ausgewählt, repliziert und im Rasterelektronenmikroskop (DSM 940, Zeiss Oberkochen, Deutschland) bei 100facher Vergrößerung untersucht. Typische Oberflächenstrukturen wurden fotografisch dokumentiert.

Substanzabtragung bei sonoabrasiver Präparation in Abhängigkeit von der Diamantierung

Als Probenmaterial dienten Standardglasobjektträger (ISO Nr. 8037/1), die gummigelagert in einer Halterung befestigt waren. Zur Präparation wurden die vorgängig beschriebenen Formpräparationsansätze in den fünf Diamantbeschichtungen (mittlere Korngrösse 15 µm, 25 µm, 46 µm, 64 µm und 91 µm) verwendet. Die Betriebsparameter des Airscalers entsprachen dem oben beschriebenen Versuchsaufbau.

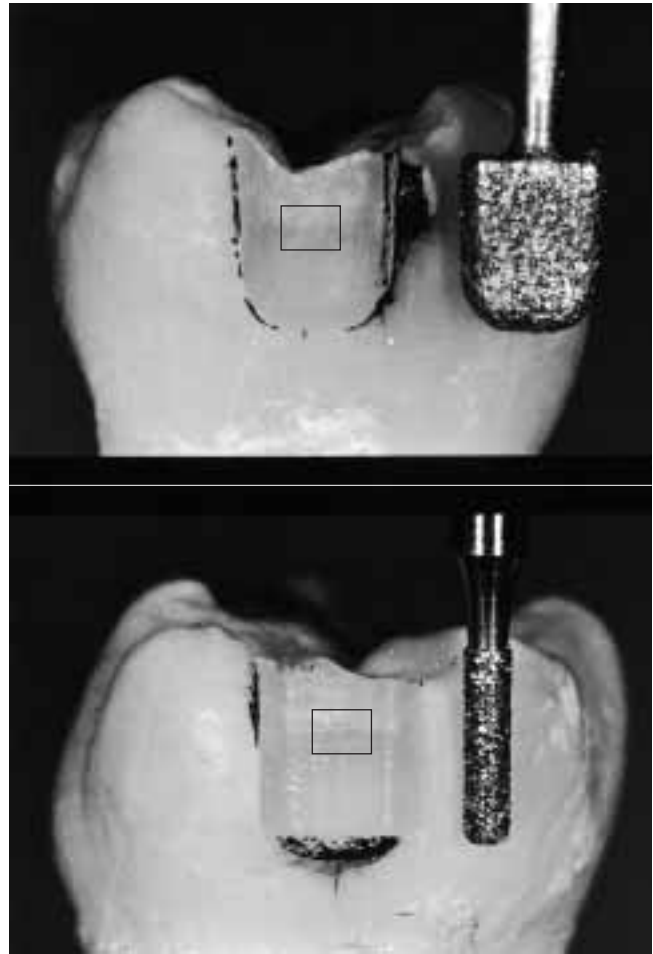


Abb. 1 Klasse-II-Kastenkavität an menschlichen Molaren nach sonoabrasiver bzw. rotierender Sekundärpräparation. Der rotierende Schleifer (ISO 010) und der Airscaleransatz sind mit der gleichen Korngrösse diamantiert. Die Untersuchungsareale im Schmelz bzw. Dentin für die profilometrischen und rasterelektronenmikroskopischen Untersuchungen sind eingezeichnet.

Die Glasprobekörper wurden auf der Arbeitsplattform eines Luftlagerschlittens (Eigenkonstruktion KaVo, Biberach, Deutschland) befestigt. Durch Zufuhr von Druckluft bildete sich unter der Arbeitsplattform ein Luftkissen aus und ermöglichte eine nahezu reibungsfreie Bewegung der Plattform in der Horizontalebene. Durch Koppelung mit einem Kraftaufnehmer und Anschluss an einen Messcomputer (CMS Mess Top, Fa. CMS Ettlingen, Deutschland) konnten horizontale Kräfte in 20 Einzelwerten pro Sekunde während der Präparation registriert werden (Abb. 2 und Abb. 3). Die Präparation erfolgte manuell durch zwei Probanden, die mit der sonoabrasiven Präparationstechnik vertraut waren. Diese versuchten bei jeder Probe in einem Zeitraum von 30 Sekunden bei individuell gewählter Anpresskraft einen maximalen Substanzabtrag zu erzielen. Hierbei wurde die Mitte des sonoabrasiven Instrumentes horizontal gegen den Glasträger geführt und eingesenkt. Die Glasträger wurden vor und nach der Präparation mittels einer Feinwaage (Typ H 15, Metteler, Deutschland) gewogen und die Abtragsleistung (mg/min) ermittelt.

Es wurden fünf Versuchsreihen entsprechend den fünf unterschiedlichen Diamantbelagungen durchgeführt. Beide Probanden präparierten 10mal je Versuchsreihe, sodass je Diamantie-

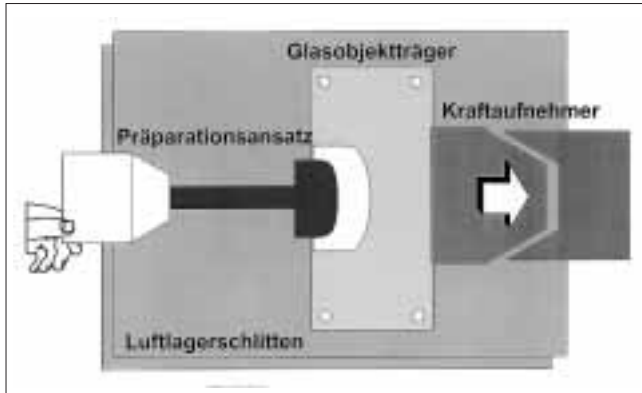


Abb. 2 Schema des Versuchsaufbaus zur Messung der Substanzabtragung bei sonoabrasiver Präparation. Der in einen Halter eingespannte Glasprobekörper wird durch einen manuell geführten Aircalceransatz bearbeitet. Die Anpresskraft gegen die Arbeitsplattform des Luftlagerschlittens wurde mit einem Kraftaufnehmer registriert.

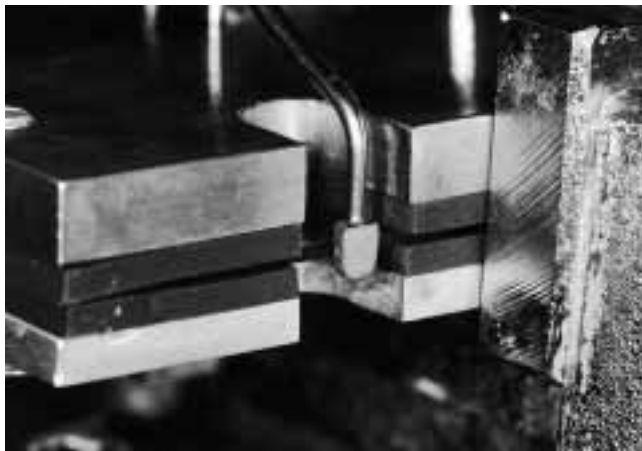


Abb. 3 Sonoabrasiver Präparationsansatz bei der manuellen Bearbeitung eines Glasobjektträgers (Bestimmung der Substanzabtragung)

20 Einzelmessungen für den Substanzabtrag ($n = 20$) und 20 Kraftverläufe dokumentiert wurden. Bei jeder Versuchsreihe wurde nach 5 Einzelmessungen das Sonoabrasivinstrument gegen ein neues ausgetauscht. Zur Analyse der Kraftverläufe wurde das letzte Drittel der Messkurve (Dauer: 10 Sekunden) als repräsentativ bewertet.

Die statistische Prüfung der erhaltenen Werte zur Oberflächenrauigkeit und Substanzabtragung sowie der Applikationskraft wurde anhand des Chi-Quadrat- und des Mann-Whitney-U-Tests durchgeführt. Bei multiplen Vergleichen wurde eine Bonferroni-Korrektur angewandt (WILKINSON 1989). Signifikante Unterschiede wurden bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von $p \leq 0,05$ festgelegt.

Resultate

Oberflächenrauigkeit nach sonoabrasiver bzw. rotierender Präparation

Bei rotierender Präparation im Schmelz korrelierten der Anstieg von Rautiefe (Ra) und Diamantbelegung. Bei sonoabrasiver Schmelzpräparation wurde bis zur 46- μm -Diamantierung ein

Anstieg der mittleren Rautiefe festgestellt. Diamantbelegungen mit 64- μm und 91- μm mittlerer Korngröße führten zu keiner weiteren Vergrößerung der Rautiefe. Sowohl im Schmelz wie auch im Dentin wurden mit einer Ausnahme bei 91- μm -Korngröße zwischen rotierender und oszillierender Instrumentierung keine signifikanten Unterschiede festgestellt. Die ermittelten Werte bei rotierender Bearbeitung mit 91- μm -Diamantierung waren signifikant höher als nach sonoabrasiver Präparation. Generell wurden im Dentin sowohl nach rotierender als auch nach sonoabrasiver Bearbeitung niedrigere Werte als im Schmelz erhoben (Abb. 4). Im REM bei 100facher Vergrößerung wiesen die Proben für das jeweilige Präparationsverfahren typische Bearbeitungsspuren auf. Bei den rotierenden Schleifern bildeten sich die Furchen längs der Rotationsrichtung in der Zahnschubstanz ab. Bei der Sonopräparation konnten gleichmäßig verteilte ovale Mulden, die einer Schwingungsabbildung der Abrasivpartikel des Instrumentes entsprachen, festgestellt werden (Abb. 5).

Abtragsleistung in Abhängigkeit von der Diamantierung

Der Vergleich der verschiedenen Diamantbelegungen der sonoabrasiven Instrumente zeigte eine signifikant ansteigende Abtragsleistung bis zur mittleren Korngröße von 46 μm . Die mittleren Abtragswerte bei 46- μm -, 64- μm - und 91- μm -Diamantierung hingegen unterschieden sich nicht mehr signifikant voneinander (Abb. 6). Die während der Präparation aufgezeichneten Vorschubkraftwerte wiesen zwischen den Versuchsreihen keine signifikanten Unterschiede auf und lagen im Mittel zwischen 1,23 N und 1,48 N (Abb. 7).

Diskussion

Materialbearbeitungen unter Anwendung von Ultraschallschwingungen und einer Schleifmittelsuspension wurden erstmals von den Amerikanern WOOD & LOOMIS (1927) beschrieben. Das Verfahren kam ursprünglich vorwiegend in der Glasbearbeitung und Schmuckindustrie zur Anwendung. Heute findet diese als Ultraschallschwinggläppen bezeichnete Technik bei der Produktion von Bauteilen aus Hochleistungskeramiken, wie z. B. für Gasturbinenräder im Fahrzeugbau seine industrielle Anwendung (HAAS 1991). In der Zahnmedizin wurden von OMAN & APPLEBAUM (1955) sowie von POSTLE (1958) entsprechende Verfahren zur Zahnpräparation mittels hochfrequent oszillierender Antriebssysteme und einer Schleifmittel-

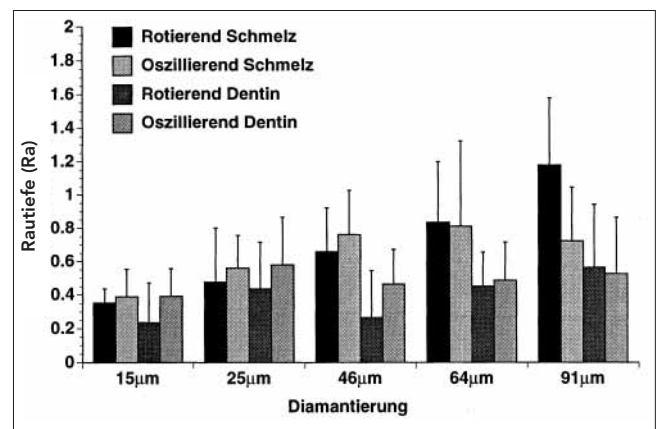


Abb. 4 Oberflächenrauigkeit nach oszillierender bzw. rotierender Präparation mit unterschiedlicher Diamantierung. Mittelwerte und Standardabweichungen der Mittelrauwerte

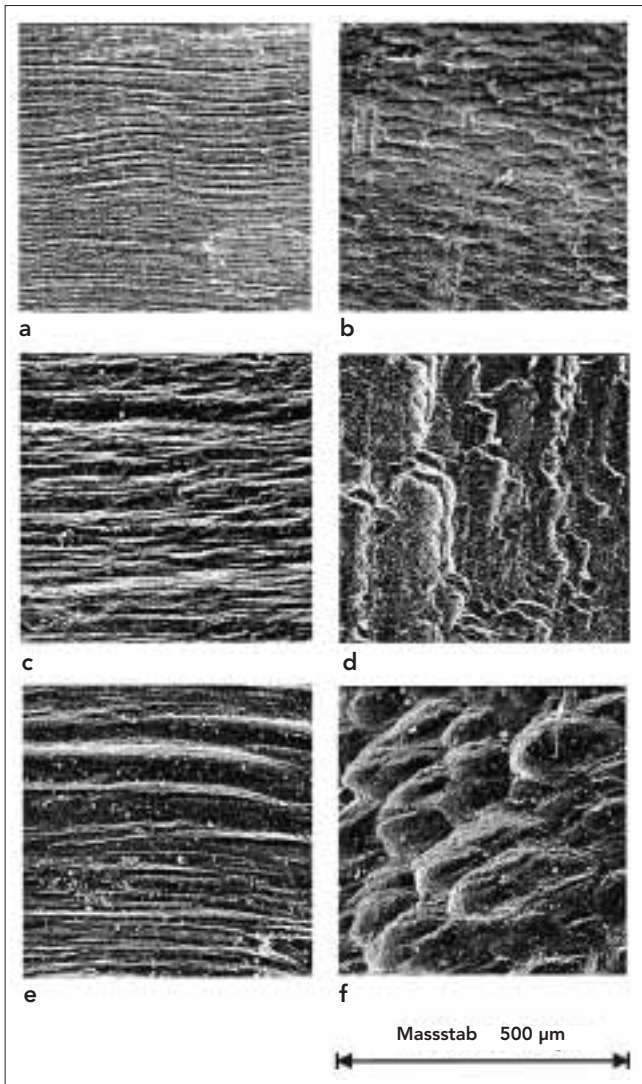


Abb. 5 Morphologie der Schmelzoberflächen nach sonoabrasiver (b, d, f) und rotierender (a, c, e) Präparation mit unterschiedlicher Diamantierung (a, b: 15 µm, c, d: 46 µm und e, f: 91 µm mittlere Korngrösse). Darstellung im REM bei 100facher Vergrößerung

suspension beschrieben sowie zu verschiedenen Aspekten Untersuchungen publiziert. Während zur Präparation mit rotierenden Antriebssystemen zahlreiche Untersuchungen zur Rautiefe oder Substanzabtragung (FUHR 1968, LUTTERBERG & STIEFEL 1979, RABE & PANTKE 1982, PANTKE et al. 1985, WEGMANN 1985, REICH et al. 1987, SÜDFELS 1987, PRICE & SUTOW 1988) vorliegen, beschäftigten sich bei oszillierenden Techniken nur wenige Studien mit dieser Thematik (SCHALLER et al. 1992, HUGO & STASSINAKIS 1995). Für Präparationssysteme, die aus hochfrequent schwingenden Antrieben und teildiamantierten Arbeitsansätzen bestehen, standen bislang keine Daten zum Abtragsverhalten zur Verfügung. Der im Schallbereich schwingende Airscaler erhält seine Schwingungsenergie durch die Entspannung der zugeleiteten Druckluft. Die Schwingungen der Arbeitsansätze werden durch eine Metallhülse erzeugt, die sich durch Druckluft angetrieben exzentrisch um eine an ihren Knotenpunkten elastisch gelagerte Metallstange (Resonanzkörper) bewegt. Das Schwingungsverhalten der Arbeitsansätze hängt neben der Bauart des Hand-

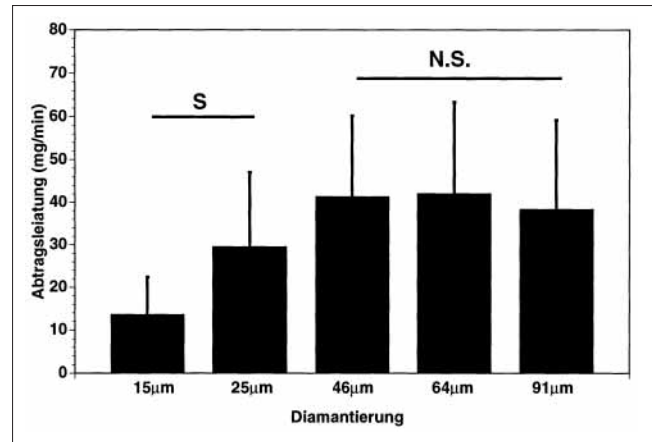


Abb. 6 Abtragsleistung (mg/min) bei sonoabrasiver Präparation mit unterschiedlicher Diamantierung: Mittelwerte und Standardabweichungen
S: Stat. signifikante Unterschiede ($p < 0,05$)
N.S.: Stat. nicht signifikante Unterschiede ($p > 0,05$)

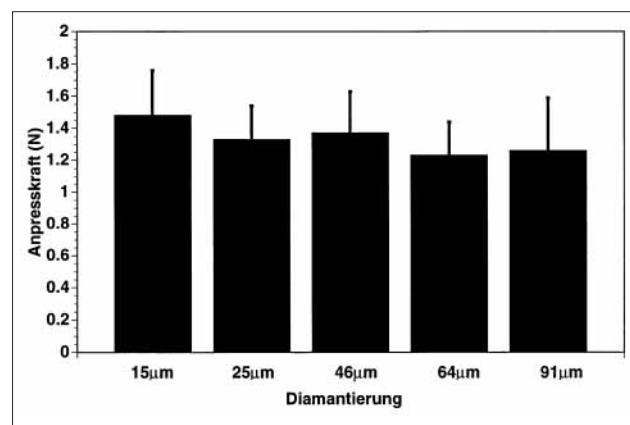


Abb. 7 Mittlere Anpresskraft bei manueller sonoabrasiver Präparation. Die Unterschiede zwischen den Versuchsreihen sind statistisch nicht signifikant ($p > 0,05$).

stückes von der Gestaltung der Ansätze (Material, Gewicht, Geometrie) und dem Fließdruck der zugeführten Luft ab (LEHFELDT 1973, GANKERSEER & WALMSLEY 1987). Schallantriebe erzeugen neben longitudinalen Schwingungen des Arbeitsendes (längs der Instrumentenachse) auch transversale Bewegungskomponenten (quer zur Achse), die ungedämpft zu fast kreisförmigen Bewegungen der Ansätze mit variablen Schwingweiten führen (KOCHER 1992). Bei Zahnkontakt verringert sich die freie Schwingungsamplitude des Instrumentes in Abhängigkeit von der Elastizität des Antriebs, der Anpresskraft, der Kontaktfläche und der Kavitätengeometrie durch Dämpfung des Gesamtsystems. Unter den Prozessgrößen für die Abtragung nehmen die Applikationskraft(-druck) und die Schwingungsamplitude einen herausragenden Stellenwert ein. Beide Faktoren wirken sich auf die Grösse des Arbeitsspalt aus, der den Kühlwasserzutritt, den Materialabtransport und die Kontaktzyklen des Ansatzes regelt. Während die Schwingungsamplitude die Geschwindigkeit des Ansatzes zum Abtragszeitpunkt bestimmt, kann

durch den Applikationsdruck die Belastung des Einzelkorns beeinflusst werden. Die Erhöhung der Applikationskraft geht prinzipiell mit der Erhöhung des Impulses für das einzelne abrasive Diamantkorn einher und führt damit zur Verbesserung der Abtragungsgeschwindigkeit (BÖNSCH 1992). Das verwendete sonoabrasive Airscalersystem gewährleistet jedoch keinen lastunabhängigen Betrieb. Durch Zunahme von Reibungskräften kann es bei schwingenden Systemen zu einer deutlichen Reduktion der Amplitude bis hin zum Stillstand des Instrumentes kommen (BLANK 1961).

Durch den Versuchsaufbau zur Messung der Substanzabtragung bei sonoabrasiver Präparation konnten die Anpresskräfte von zwei unabhängigen Probanden dokumentiert werden. Die Vorgabe an die Probanden, die Anpresskraft so zu wählen, dass ein maximaler Substanzabtrag erzielt wird, führte zu sehr konstanten Kraftwerten zwischen 1,2 N und 1,5 N. Beim Präparieren mit der «idealen» Führungskraft stellte sich ein typischer Geräuschpegel ein, der zusätzlich als akustische Kontrolle diente. Wurde mit zu hoher Kraft bzw. Vorschubgeschwindigkeit gearbeitet, reduzierte sich die Abtragsleistung.

Zum *Abtragungsverhalten beim Ultraschallschwingläppen* stehen Untersuchungen über Mechanismen und Technologien zur Prozessoptimierung zur Verfügung (HAAS 1991, BÖNSCH 1992). Auch wenn die hier vorgestellten technischen Prinzipien nicht direkt auf die sonoabrasive Bearbeitung von Zahnschmelz (und -dentin) zu übertragen sind, handelt es sich bei beiden um hochfrequent schwingende Systeme, die durch Schleifmittelkörner in der Lage sind, sprödharte Werkstoffe zu formen. In der Fertigungstechnik (HAAS 1991) wie in der Präparationstechnik (HUGO et al. 1996b) werden so komplexe dreidimensionale Bearbeitungen möglich, die durch Diamantschleiftechnik mit rotationssymmetrischen Instrumenten nicht erreicht werden können. Beim Ultraschallschwingläppen erfolgt der Materialabtrag überwiegend durch die mechanische Wechselwirkung von Formzeug («Werkzeug-Ansatz»), bearbeitetem Werkstoff und Schleifmittelsuspension. Der physikalische Vorgang ist im Wesentlichen ein Einhämmern «härterer» Schleifmittelkörner in eine «weichere» Werkstückoberfläche. In mikroskopisch kleinsten Bereichen werden Risse induziert und führen besonders bei spröden Materialien zum Mikrorisswachstum (CHENG 1960, GRATHWOHL et al. 1988). Nach dem Erreichen hinreichend grosser Risslängen und der kritischen Rissdichte kommt es zum Ausbrechen von Werkstoffpartikeln. Die typische Abtragungskinetik bei sprödharten Werkstoffen ist das Zertrümmern, während bei zähen, «weicheren» Materialien das Zerspanen für die Substanzabtragung verantwortlich ist (HAAS 1991).

Die *Präparation der Zahnhartsubstanz* erfolgt bei Kontakt mit der diamantierten Ansatzfläche, ähnlich dem Schleifvorgang bei rotierenden Instrumenten durch Mikrozerspanungsprozesse. Die geometrisch unbestimmten Schneiden bzw. Kanten der eingebetteten Diamantkörper setzen einen Teil der kinetischen Energie in einen mechanischen Zerspanungs- bzw. Zertrümmerungsprozess um. Der Abtragungsmechanismus bei der Kavitätenpräparation kann lokal unterschiedlich sein und hängt z. B. davon ab, ob die Stirn- oder Seitenfläche des Instrumentes betrachtet wird. Ein weiterer Einflussfaktor ist dessen aktuelle dreidimensionale Schwingungscharakteristik des Gesamtsystems.

Die bearbeiteten Werkstoffe in der technischen Anwendung reichen von Glas bis hin zu modernen Keramiken; in der Zahnmedizin können intakte bzw. kariöse Zahnhartgewebe abgetragen werden. Für die Kavitätenformung bei der approximalen Präparationstechnik ist insbesondere die Bearbeitung von

Zahnschmelz von Bedeutung. Ausgereifter Zahnschmelz ist das am stärksten mineralisierte und härteste Zellprodukt im menschlichen Körper. Der kristalline anorganische Anteil beträgt 95 Gewichtsprozent und besteht aus Hydroxylapatit ($\text{Ca}_{10}[\text{PO}_4]_6[\text{OH}]_2$) (SCHRÖDER 1987). Der für die Substanzabtragung bedeutsamste Materialkennwert ist die Bruch- bzw. Risszähigkeit (K_{Ic}). Bei einem vorhandenen Anriss in der Oberfläche eines sprödharten Materials erfolgt die Rissausbreitung, wenn die Spannung an der Risspitze den kritischen Wert der sogenannten Bruchzähigkeit überschreitet. Es kommt dann zum «katastrophalen» Bruch des Materials (ANSTIS et al. 1981). Untersuchungen von HAAS (1991) zeigen, dass die Bruchzähigkeit eines Werkstoffes den Abtrag beim Ultraschallschwingläppen wesentlich beeinflusst. Werkstoffe, wie z. B. Glas, die beim Härteindruck der Rissbildung und dem nachfolgenden Risswachstum nur wenig Widerstand entgegensetzen (Verfahren zur Bestimmung des K_{Ic} -Faktors) (ANSTIS et al. 1981), zeigen hohe Abtragungsraten. Auch humaner Zahnschmelz zeigt ein sprödes Bruchverhalten, d. h., der Bruch erfolgt aus einem elastischen Spannungszustand heraus, ohne vorhergehende plastische Verformung. Die Bruchzähigkeitsfaktoren, als Mass für die kohäsiven Kräfte im Substrat, liegen für menschlichen Zahnschmelz mit 0,7 bis 1,3 ($\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) (SAKAGOUCHI et al. 1992) und für amorphes Glas mit 0,7 bis 0,9 ($\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) (ANSTIS et al. 1981) in einem vergleichbaren Bereich. Bei elastoplastischen Werkstoffen, wie z. B. beim Zahndentin ($K_{Ic} = 3,8 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) (SAKAGOUCHI et al. 1992), liegen ungünstigere Bearbeitungsbedingungen und damit ein reduzierter Substanzabtrag vor.

Im Rahmen der klinischen Anwendung wird beim okklusozervikalen Einsenken der Ansätze oder bei der Randfinierung von Approximalkavitäten fast ausschliesslich Schmelz bearbeitet. Hierbei findet ein kontinuierlich fortschreitender Abtrag dieses «sprödharten» Zahnmaterials statt. In *Vorversuchen* zur Bestimmung der *Abtragsleistung* sonoabrasiver Instrumente im Zahnschmelz wurden zunächst intakte Zahnkronen mit kastenförmigen Ansätzen bearbeitet. Der Substanzabtrag war, relativ unabhängig von der Korngrösse des Diamantbelages, für eine quantitative Aussage generell zu gering. Die starke Dämpfung der Präparationsansätze wurde durch den grossflächigen Kontakt der diamantierten Arbeitsseite mit dem Zahnschmelz verursacht. Um eine effizientere «Arbeitsschwingung» des Systems zu ermöglichen, musste die Kontaktfläche verkleinert werden. Hierzu wurden weitere Versuche mit drei Millimeter dicken «Zahnscheiben», die aus dem Äquatorbereich der Krone mit horizontalen Sägeschliffen herausgetrennt wurden, durchgeführt. Die natürliche Schmelzschichtstärke der Proben war unregelmässig und beeinflusste mit der «Weglänge» bis zum Erreichen des Dentins das Abtragungsverhalten der Instrumente. Die Abtragsleistung der sonoabrasiven Instrumente war nach Erreichen der Dentinschicht durch die höhere Elastizität und Bruchzähigkeit geringer als im Schmelz. Wegen der zuvor beschriebenen Schwierigkeiten mit natürlicher Zahnschmelz, wurden *Objektglasträger*, die einen mit *Zahnschmelz vergleichbaren Bruchzähigkeitsfaktor* aufweisen, als Ersatzwerkstoff ausgewählt. Der nun verwendete Versuchsaufbau ermöglichte bei jeder Diamantierungsform einen kontinuierlichen Substanzabtrag und führte zu einer Rangliste mit ansteigendem Abtrag für Ansätze, die mit 15- μm -, 25- μm -, und 46- μm -Korngrösse diamantiert waren. Durch Verwendung gröberer Diamantbelegungen (64 μm und 91 μm mittlere Korngrösse) wurde keine weitere Steigerung der Abtragsleistung im Glas erreicht.

Die in den *REM-Aufnahmen* dargestellten *Zahnoberflächen nach sonoabrasiver Präparation* spiegeln in den verschiedenen grossen

Mulden mit ovaler Umrissform neben dem Schwingungsmuster auch die Korngrösse der aufgebrachtten Diamantpartikel wieder. Der «Muldendurchmesser», der durch die Abtragungsbewegung der Diamantkörner entsteht, reduziert sich bei Verwendung von kleineren Korngrössen analog dem Oberflächenmuster bei rotierenden Schleifern. Hierbei erzeugen feinere Diamantbeläge Furchen von geringerer Breite und Tiefe entlang der Vorschubrichtung (PANTKE 1985, WEGMANN 1985, SCHALLER et al. 1992). Gleichmässig von Mulden überzogene Präparationsflächen sind typisch für stationär gehaltene Sonoabrasivinstrumente und treten insbesondere bei kastenförmigen Ansatzgeometrien, wie z.B. bei der Formpräparation (SONICSYS approx, KaVo Biberach, Deutschland) auf. Findet die sonoabrasive Präparation bei einem bewegten Ansatz statt, z. B. bei Anlegen einer Abschrägung, sind im Rasterelektronenmikroskop auch bei diesem Verfahren Furchen auf der Zahnoberfläche entlang der Vorschubrichtung zu erkennen. Das Bewegungsmuster des Airscalers hat Schwingungskomponenten in Richtung der bearbeiteten Zahnschubstanz, was unter anderem zu einem effizienteren Substanzabtrag als bei einer niederfrequent oszillierenden Feilenpräparation führt (HUGO et al. 1998). Die schwingenden Diamantinstrumente erzeugen an der Zahnoberfläche Rautiefen, die sich bei Diamantierungen mit ansteigender Korngrösse vergrössern. Während dieser Effekt nach rotierender Bearbeitung bis zu «normalkörnigen» Diamantierungen (91 µm mittlere Korngrösse) zu beobachten war, wurden bei sonoabrasiver Instrumentierung nur bis zu «mittelfeinen» Diamantbelegungen (46 µm mittlere Korngrösse) ein Anstieg der Rautiefe und anschliessend bei größeren Diamantierungen keine weitere Steigerung mehr festgestellt.

Die klinische Bedeutung der Oberflächenrauigkeit nach Präparation hängt von der jeweils gewählten Restaurationstechnik ab. Bei plastischer Füllungstechnik muss das Material, insbesondere im Randbereich, in unmittelbarem Kontakt zur Oberfläche der Kavität gebracht werden. Zum Beispiel wird bei Amalgamfüllungen durch Nachbearbeiten der Grundpräparation mittels Hartmetall- oder diamantbelegter Finierer das Randverhalten der Restaurationen signifikant verbessert (REICH et al. 1987, SCHALLER et al. 1988, HALLER & KLAIBER 1988). Die Verbesserung der Randschlussqualität von Kompositfüllungen durch Präparation einer Schmelzabschrägung und Schmelzätzttechnik ist bekannt (BUONOCORE 1955, DIETSCHI & HERZFELD 1998). Üblich für diese Abschrägungspräparation sind rotierende, in der Regel flammenförmige Diamantschleifer. Untersuchungen über den Zusammenhang zwischen Randschlussqualität adhäsiver Restaurationen und Oberflächenrauigkeit der Abschrägung liegen derzeit nur vereinzelt vor (SHERIDAN & LEDOUX 1989, SCHÜNEMANN 1997). Bei indirekten Restaurationsverfahren verbessert die Finierung der Randbereiche die Abbildung im Abdruck bzw. auf dem Modellstumpf und somit schlussendlich die Passgenauigkeit der Restauration (ADA COUNCIL 1972, 1977, ZENA et al. 1989).

Die Abtragsleistung hochtourig rotierender Instrumente bei der Präparation von gesunder Zahnhartsubstanz ist zur Zeit mit oszillierenden Instrumenten nicht zu erreichen. Auch besteht keine grundsätzliche Veranlassung, die klinisch und wissenschaftlich bewährte rotierende Technik vollständig zu ersetzen. Zeitgemässe Präparationskonzepte verknüpfen eine effiziente rotierende Primärpräparation mit einer sekundären Feinbearbeitung (KIMMEL 1997). Mit der Sekundärpräparation erfolgt die definitive Formgebung der Kavitäten- und Kronengeometrie sowie die Finierung und Formung der Randbereiche. Die Abtragsleistung spielt hierbei eine eher untergeordnete Rolle. In

einer vergleichenden Untersuchung zur Präparationsmethodik bei Klasse-II-Kavitäten waren die mit dem beschriebenen Airscaler und SONICSYS micro-Ansätzen (Halbkugelform) an menschlichen Zähnen erstellten Kavitäten in einer signifikant kürzeren Zeit präpariert worden als rotierend finierte Kavitäten (HUGO et al. 1998). Beim sonoabrasiven Präparationsvorgang erfolgen Präparation und Finierung mit der gleichen Diamantbelegung. Doppelinstrumentierung mit grober und nachfolgend feiner Korngrösse bei formkongruenten Ansätzen und ein damit verbundener Instrumentenwechsel sind nicht notwendig (HUGO et al. 1996a).

Da die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung eine maximale sonoabrasive Abtragsleistung bei der mittleren Diamantkorngrösse von 46 µm aufzeigen, erscheint uns dieser Diamantbelag für die adhäsive Mikrofüllungstechnik geeignet. Ein weiterer Anwendungsbereich der «46-µm-Diamantierung» ist die standardisierte Präparation von Klasse-II-Kavitäten zur adhäsiven Befestigung von vorgefertigten Keramikeinlagen (SONICSYS approx, KaVo, Biberach, Deutschland). Diamantbeschichtungen mit gröberen Korngrössen (64 µm und 91 µm) erzeugten in dieser Untersuchung zwar keine höheren Rautiefen als die 46-µm-Belegung, sie würden jedoch im Vergleich zur feineren Diamantbelegung die Form und Konturübergänge der Präparationsansätze verändern sowie deren Dimension unnötig vergrössern.

Für die rotierende Kavitätenfinierung werden Schleifkörper in einer feinen Diamantierung mit 25 µm mittlerer Korngrösse empfohlen (RELLER et al. 1989). Diese 25-µm-Diamantierung der sonoabrasiven Instrumente ist etwas weniger effizient als die 46-µm-Korngrösse, jedoch deutlich effizienter als die 15-µm-Korngrösse. Daher bietet es sich an für Präparationen, bei denen mit einem indirekten Herstellungsverfahren gearbeitet wird, wie z.B. bei Goldguss- oder Keramikinlays, die spezifischen Sonoinstrumente mit einer 25-µm-Diamantierung zu versehen.

Bei technischen Anwendungen des beschriebenen Verfahrens, dem sogenannten Ultraschalllappen von keramischen Werkstoffen, wird ein Zusammenhang zwischen der Korngrösse des Abrasivmediums, der Schwingungsweite des Systems, der resultierenden Abtragungseffizienz und erzielbaren Oberflächengüte bzw. Herstellungstoleranz beschrieben (BÖNSCH 1992). Dieser Zusammenhang bestätigt die Wahl der 25-µm- und 46-µm-Diamantbelegung für die Airscaleransätze. In der Lapp suspension liegen die Schleifmittel, z.B. Borkarbid, als «freies Korn», die auf den Präparationsansätzen aufgebrachtten Diamantpartikel als «gebundenes Korn» vor. In der Technik werden für die meisten Anwendungen des Lappverfahrens Korngrössen mit einem initialen mittleren Durchmesser von 40–50 µm verwendet. Während des Bearbeitungsprozesses unterliegt hierbei die Korngrössenverteilung durch Verkleinerung der Partikel im Suspensionsgemisch einer ständigen Veränderung (HAAS 1991).

Eine mittlerweile vorliegende Untersuchung zum «Einfluss unterschiedlicher Präparationsmethoden auf die Randqualität kleiner Klasse-II-Kavitäten» bestätigt die Auswahl der 46-µm-Diamantierung für die beschriebene sonoabrasive Präparation bei direkter Kompositfüllungstechnik als geeignet (SCHÜNEMANN 1997). Füllungen nach Schmelzabschrägung mit sonoabrasiver Halbkugel oder rotierenden Finierern in 40-µm-Diamantbelegung erreichten signifikant bessere Randqualitäten als nach Randabschrägung mit 15-µm-Finierdiamanten. Der Zusammenhang einer optimal ausgewählten Oberflächenrauigkeit in Bezug auf die adhäsive Verbundtechnik und eine mögliche

che Steigerung der Haftwerte durch die gewählten Präparationsmodalitäten bedarf weiterer Abklärungen.

Summary

HUGO B, STASSINAKIS A, HOFMANN N, STARZ C, KLAIBER B: **Surface roughness and tooth substance removal after cavity preparation with sonoabrasive instruments** (in German). *Acta Med Dent Helv* 4: 117–124 (1999)

The roughness of enamel or dentin surfaces of proximal cavities was examined using a profilometric measuring technique. In this study 100 proximal cavities were treated with either sonoabrasive airscaler tips or rotating diamond burs. The medium particle size of the diamond coatings were 15 µm, 25 µm, 46 µm, 64 µm and 91 µm. The surface roughness (Ra) was then recorded and the preparations were examined under scanning electron microscope. The Ra of the preparations with the oscillating tips and with the rotating instruments was not significantly different ($p > 0.05$). Scanning electron micrographs showed a typical morphology after rotating treatment with scratches and after sonoabrasive treatment with grooves in the surface.

The effect of substance removal was measured using sonoabrasive tips with 15 µm, 25 µm, 46 µm, 64 µm and 91 µm diamond coatings. The data showed an increasing grinding efficiency up to the 46 µm diamond coatings and no quantitative differences between 46 µm, 64 µm and 91 µm diamond-tips.

The results demonstrated that the ideal pressure during preparation to remove a maximum of tooth substance was 1.4 N. Preparation and finishing procedures using only one sonoabrasive instrument should be done in most cases with the 46 µm-diamond coatings. For indirect restorations preparations with the 25 µm-diamond-tip were superior because of the smoother surfaces.

Résumé

Le but de la présente étude était de comparer la rugosité des surfaces d'émail et de dentine après une préparation sono abrasive effectuée avec le système SONICSYS. Une analyse profilométrique a été utilisée: Cent cavités standardisées de type «box» ont été successivement finies en utilisant une série croissante de grains diamantés de 15 µm, 25 µm, 46 µm, 64 µm et 91 µm.

A l'exception du grain de 91 µm, pour lequel la valeur de rugosité moyenne après instrumentation rotative était significativement plus élevée, aucune différence de rugosité a été trouvée entre le mode d'action rotatif ou oscillant. L'analyse des échantillons au microscope électronique à balayage, avec un agrandissement de 100 fois, a révélé des traces typiques du mode de préparation concerné: après utilisation d'instruments rotatifs, des rainures parallèles à la direction de rotation ont été constatées, tandis que la préparation sonore engendrait des concavités ovales. Afin de standardiser les mesures des performances sur la diminution des tissus dentaires minéralisés, des échantillons en verre ont été utilisés, en combinaison avec un dispositif sur coussin d'air. Le verre possède une ténacité (K_{Ic}) comparable à celle de l'émail humain et démontre ainsi en tant que matériau dur et cassant un comportement d'usure similaire.

Alors que la couche diamantée avec des grains de 15 µm, 25 µm et 46 µm a mené à une élimination croissante de tissu, les grains de diamants plus grands n'ont pas provoqué de perte de substance supplémentaire (valeur moyenne). La force de propulsion, appliquée dans cette expérience et considérée comme idéale pour une préparation sono abrasive se situait aux alentours de

1,4 N. Quant à l'application clinique, ce sont donc les grains de diamants fins à moyens (46 µm) et les grains fins (25 µm), qui permettent une diminution de substance relativement efficace. Dépendant de leurs champs d'application, ils produiront des surfaces de travail avec une surface plutôt rugueuse ou plutôt lisse.

Literaturverzeichnis

- ADA COUNCIL ON DENTAL MATERIALS AND DEVICES: New American Dental Association Specification No. 2 for dental gypsum products. *J Am Dent Assoc* 84: 640–644 (1972)
- ADA COUNCIL ON DENTAL MATERIALS AND DEVICES: Revised American dental impression materials. *J Am Dent Assoc* 94: 733–741 (1977)
- ANSTIS G R, CHANTIKUL P, LAWN B R, MARSHALL D B: A critical evaluation of indentation techniques for measuring fracture toughness: I, Direct Crack Measurements. *J Am Ceram Soc* 64: 533–543 (1981)
- BLANK D: Gesetzmässigkeiten beim Stossläppen mit Ultraschallfrequenz. *Maschinenwesen – Dissertation, Braunschweig* (1961)
- BÖNSCH CH: Wege zur Prozessoptimierung beim Ultraschall-schwingläppen keramischer Werkstoffe. *Maschinenwesen Dissertation, S. 10, S. 25, S. 29–31 Aachen* (1992)
- BOYDE A, KNIGHT P J, JONES S J: Further scanning electron microscope studies of the preparation of Class II cavities. *Brit Dent J* 132: 447–457 (1972)
- BOYDE A, KNIGHT P J: Scanning electron microscope studies of the preparation of the embrasure walls of class II cavities. *Brit Dent J* 129: 557–564 (1970)
- BOYDE A: Finishing techniques for the exit margin of the approximal portion of Class II cavities. *Brit Dent J* 134: 319–328 (1973)
- BUONOCORE M G: A simple method of increasing the adhesion of acrylic filling materials to enamel surface. *J Dent Res* 34: 849–853 (1955)
- CHENG J: Beitrag zur Mechanik der Materialabtragung beim Schwingläppen. *Diss TH Dresden* (1960)
- DIETSCHI D, HERZFELD D: In vitro evaluation of marginal and internal adaptation of class II resin composite restorations after thermal and occlusal stressing. *Eur J Oral Sci* 106, 1033 (1998)
- FUHR K: Messungen der Strukturvarianten an Zahnoberflächen. *Dtsch Zahnärztl Z* 23: 178–190 (1968)
- GANKERSEER E, WALMSLEY A D: Preliminary investigation into the performance of a sonic scaler. *J Periodontol* 58: 780–784 (1987)
- GRATHWOHL, IWANEK, THÜMLER: Machining of Ceramics with Particular Reference to Ultrasonic-Erosion. *Mat-Wiss u Werkstofftechnik* 19: 81–86 (1988)
- HAAS R: Technologie zur Leistungssteigerung beim Schwingläppen. *Maschinenwesen – Dissertation, S. 1–7, S. 22–29, Aachen* (1991)
- HALLER B, KLAIBER B: Mikromorphologie unfinierter und finierter Schmelz- und Dentinflächen nach unterschiedlicher Vorbehandlung. *Schweiz Monatsschr Zahnmed* 98: 1078–1084 (1988)
- HUGO B, LUSSI A, HOTZ P: Die Präparation der Schmelzrandabschrägung bei approximalen Kavitäten. *Schweiz Monatsschr Zahnmed* 102: 1181–1188 (1992)
- HUGO B, STASSINAKIS A: Removal of hard tooth structure by Rootshape root planing files used with a modified EVA contra-angle. *J Clin Periodontol* 22: 868–876 (1995)

- HUGO B, STASSINAKIS A, HOTZ P, KLAIBER B: Die Entwicklung einer neuen Präparationsmethode zur defektbezogenen Erstversorgung approximaler Karies. *Dtsch Zahnärztl Z* 51: 518–523 (1996a)
- HUGO B, STASSINAKIS A, HOTZ P, KLAIBER B: Reproduzierbare Präparation standardisierter Klasse-II-Kavitäten. *Dtsch Zahnärztl Z* 51: 746–750 (1996b)
- HUGO B, STASSINAKIS A, HOFFMANN N, HOFFMANN O, KLAIBER B: Vergleich verschiedener Präparationstechniken und Kavitätengestaltungen zur approximalen Erstversorgung. *Dtsch Zahnärztl Z* 53: 441–447 (1998)
- KIMMEL K: Zahnärztliche Präparationstechnik. *Deutscher Zahnärzte Kalender* 56: 189–211 (1997)
- KOCHER T: Entwicklung eines Arbeitskonzeptes zur maschinellen Wurzeloberflächenbearbeitung mit diamantierten Airscalerspitzen unter spezieller Berücksichtigung von Molaren mit Furkationsbefall. *Medizinische Habilitationsschrift*, Kiel (1992)
- KREJCI I, LUTZ F, KREJCI D: Schall-/ultraschallbetriebene diamantierte Instrumente zur Kavitätenpräparation, zum Konturieren und zum Finieren. *ZWR* 104: 781–786 (1995)
- LEHFELDT W: Ultraschall. *Physikalische Grundlagen und Anwendungen*. Vogelverlag, Würzburg (1973)
- LESTER K S: Burs, teeth and hand instruments. *Aust Dent J* 23: 231–236 (1978)
- LUTTERBERG B, STIEFEL A: Rauhtiefenmessung und Rasterelektronenmikroskopie an Kavitätenwänden. *Zahn-, Mund- und Kieferheilkd* 67: 137–144 (1979)
- MJÖR I A, QVIST V: Marginal failures of amalgam and composite restorations. *J Dent* 25: 25–30 (1997)
- OMAN C R, APPLEBAUM E: Ultrasonic cavity preparation II. Progress report. *J Am Dent Assoc* 50: 414–417 (1955)
- PANTKE A, SCHÜTTLER D, HÜTTEMANN W, PANTKE H: Vergleichende Untersuchungen verschiedener Methoden zur Beurteilung von Oberflächenstrukturen präparierter Zähne. *Dtsch Zahnärztl Z* 40: 386–391 (1985)
- POSTLE H H: Ultrasonic cavity preparation. *J Prosthet Dent* 3: 153–160 (1958)
- PRICE R B, SUTOW E J: Micrographic and profilometric evaluation of the finish produced by diamond and tungsten carbide finishing burs on enamel and dentin. *J Prosth Dent* 60: 311–316 (1988)
- RABE U, PANTKE H: Die Erfassung der Oberflächenverhältnisse biologischer Objekte mit charakteristischen Masszahlen. *Dtsch Zahnärztl Z* 37: 869–873 (1982)
- REICH E, STADLBAUER A, VÖLKL H: Auswirkung unterschiedlicher Präparationsinstrumente auf die Randqualität der approximalen Amalgamfüllung. *Dtsch Zahnärztl Z* 42: 560–565 (1987)
- RELLER U, GEIGER F, LUTZ F: Quantitative investigation of different finishing methods in conventional cavity preparations. *Quint Int* 20: 453–460 (1989)
- RODDA J C, GAVIN J B: A scanning electron microscope study of cavity margins finished by different methods. *NZ Dent J* 73: 64–70 (1977)
- SAKAGOUCHI R L, CROSS M, DOUGLAS W H: A simple model of crack propagation in dental restorations. *Dent Mater* 8: 131–136 (1992)
- SCHALLER H-G, HAHN P, GÖTZE W, HERZOG E: Der Einfluss der Randbearbeitung auf die Rauhtiefe approximaler Schmelzränder. *Dtsch Zahnärztl Z* 47: 436–438 (1992)
- SCHALLER H-G, KLAIBER B, TRUNK T: Untersuchungen zur Randschlussqualität von Amalgamfüllungen. *Dtsch Zahnärztl Z* 43: 854–859 (1988)
- SCHRÖDER H: *Orale Strukturbiologie. Entwicklungsgeschichte, Struktur und Funktion normaler Hart- und Weichgewebe der Mundhöhle und des Kiefergelenks* (Hrsg.) Schröder H S 73–79, Thieme, Stuttgart (1987)
- SCHÜNEMANN T H: Der Einfluss unterschiedlicher Präparationsmethoden auf die Randqualität verschiedener adhäsiver Restaurationen zur substanzschonenden Versorgung kleiner Klasse-II-Kavitäten. *Med Diss*, Berlin (1997)
- SHERIDAN J J, LEDOUX P M: Air-rotor stripping and proximal sealants. An SEM evaluation. *J Clin Orthod* 12: 790–794 (1989)
- SÜDFELS H: Kavitätenrand und Schmelzoberfläche nach der Präparation okklusaler Kavitäten mit Schleifern und Finieren. *Dtsch Zahnärztl Z* 42: 552–556 (1987)
- WEBER H: Präparation und temporäre Versorgung. In: Ketter W (Hrsg.) *Praxis der Zahnheilkunde*, Bd. 5, Festsitzender Zahnersatz. Urban und Schwarzenberg, München (1993)
- WEGMANN U: Zur Qualität beschliffener Schmelzflächen und der Präparationsgrenze. *Dtsch Zahnärztl Z* 40: 472–478 (1985)
- WILKINSON L: *Systat. The system for statistics*. Systat, Evanston IL, pp 444 (1989)
- WOOD R W, LOOMIS A L: The Physical and Biological Effects of High-frequency sound-waves of great intensity. *Phil Mag* 7: 417–436 (1927)
- ZENA R B, KHAN Z, VON FRAUNHOFER J A: Shoulder preparations for collarless ceramic crowns: hand-planing as opposed to rotary instrumentation. *J Prosthet Dent* 62: 273–277 (1989)