

Aus der

Poliklinik für Zahnerhaltung und Präventive Zahnheilkunde
des Zentrums für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde
des Universitätsklinikums Hamburg-Eppendorf

Direktorin: Prof. Dr. Ursula Platzer

Verschleiß von Diamantschleifkörpern auf Zirkondioxidkeramik

Dissertation

zur Erlangung des Grades eines Doktors der Zahnmedizin
der Medizinischen Fakultät der Universität Hamburg

vorgelegt von

Josip Klasnic
aus Hamburg

Hamburg 2010

Angenommen von dem Fachbereich Medizin
der Universität Hamburg am: 07.02.2011

Veröffentlicht mit Genehmigung des Fachbereichs Medizin
der Universität Hamburg:

Prüfungsausschuss, die/der Vorsitzender/in: Prof. Dr. Ibrahim Nergiz

Prüfungsausschuss, 2. Gutachter/in: Prof. Dr. Hans-Dieter Jüde

Prüfungsausschuss, 3. Gutachter/in: PD Dr. Petra Schmäge

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
2 Literatur	3
2.1 Allgemeiner Überblick über keramische Dentalwerkstoffe	3
2.2 Zirkondioxidkeramik	5
2.2.1 Werkstoffkundliche Aspekte	7
2.2.2 Mechanische Eigenschaften	8
2.2.3 Klinische Eigenschaften	9
2.3 Bearbeitung von Zirkondioxidkeramik	10
3 Fragestellung	12
4 Material und Methode	12
4.1 Versuchsdesign	12
4.1.1 Versuchsaapparatur	16
4.2 Materialien	17
4.3 Versuchsdurchführung	18
4.3.1 Messung der Rautiefen	18
4.3.2 Rasterelektronenmikroskopische Oberflächenanalyse	19
4.4 Statistische Auswertung	19
5 Ergebnisse	19
5.1 Vergleich der Beschleifzeiten zwischen normalen Diamantschleifern und Diamantschleifern für Zirkondioxidkeramik mit einem Durchmesser von 1,4 mm	20
5.2 Vergleich der Rauigkeiten R_A und R_Z von konventionellen Diamantschleifern und der speziell für Zirkondioxidkeramik verwendeten Diamanten	26
5.3 Vergleich der Zirkondioxidkeramik- Diamantschleifer mit unterschiedlichen Durchmessern und verschiedenen Körnungen	38
5.4 Vergleich verschiedener Körnungen der speziellen Zirkondioxidkeramik- Schleifkörper mit einem Durchmesser von 1,6 mm	44

6 Diskussion	57
6.1 Methodendiskussion	57
6.2 Ergebnisdiskussion	59
7 Schlussfolgerung	62
8 Zusammenfassung	63
9 Literaturverzeichnis	65
10 Danksagung	72
11 Curriculum vitae	73
12 Eidesstattliche Versicherung	74

1 Einleitung

In der heutigen Zeit werden zunehmend Dentalkeramiken zur Herstellung von Zahnersatz genutzt. Der Wunsch nach Ästhetik sowie das steigende Gesundheitsbewusstsein der Bevölkerung lassen die Nachfrage nach den Dentalkeramiken als zahnfarbendes, metallfreies Material anwachsen (STRUB 1992). Kronen und Brücken aus seit langem bewährten Metallkeramiken werden immer mehr von metallfreien Keramikrestorationen ersetzt, wobei zu fordern ist, dass sie bei entsprechender Indikation gleiche Erfolgsraten erzielen wie die bewährten Metallkeramiken (DGZMK- Stellungnahmen 2007). Nur bestimmte Keramiken kommen als Vollkeramikmaterial in Frage. Diese Anforderungen erfüllt vor allem die neue yttriumverstärkte Zirkondioxidkeramik (Janda 2009, Kern 2008, Rosentritt 2008). Verblendkeramiken würden ohne Metallunterstützung keine ausreichende Stabilität besitzen.

Seit ca. 30 Jahren werden Zirkondioxidkeramiken in anderen medizinischen Bereichen, beispielsweise als Biokeramiken für Implantate und Wurzelstifte (FISCHER et al. 1998, MEYENBERG et al. 1995, WOHLWEND et al. 1996, TINSCHERT et al. 2006), für künstliche Gelenke, wie zum Beispiel Finger-, Zehen- und Hüftgelenke und als Knochenersatzmaterial verwendet (WILLMANN 1997, AKAGAWA et al. 1993, CALES et al. 1994, CHRISTEL et al. 1989). Im Gegensatz zu Presskeramik und gefrästen Cereclöcken (z.B. Aluminiumdioxid, Magnesiumdioxid, Feldspat) wird Zirkondioxidkeramik für die zahnärztliche Prothetik erst seit wenigen Jahren genutzt, sodass klinische Langzeiterfahrungen noch ausstehen. Dies gilt besonders für yttriumverstärkte tetragonale Zirkondioxidkeramik.

Die Vorteile dieses Materials sind im zahnfarbenen, opaken Aussehen, den physikalischen Eigenschaften und der guten Biokompatibilität der Zirkondioxidkeramik (CHRISTEL et al. 1989, PICONI et al. 1999, DION et al. 1994, LI et al. 1993, UO et al. 2003, COVACCI et al. 1999, ICHIKAWA et al. 1992, ALDINI et al. 2002, HAYASHI et al. 1993, HAYASHI et al. 1992, YOICHIRO et al. 1992) zu sehen. Nachteile liegen jedoch in der mit der hohen Festigkeit verbundenen Sprödigkeit. Die Festigkeit wird gefordert, um eine gute Bruchstabilität zu gewährleisten. Ein Material, dessen Härte höher als die der natürlichen Zahnhartsubstanzen ist, kann auch zu Schäden des Parodonts oder der Zähne bei Dysfunktionen wie Frühkontakten oder Bruxismus führen. Die

yttriumverstärkte tetragonale Zirkondioxidkeramik (z.B. Digizon A HIP, Amann Girrbach, Pforzheim Deutschland) zeichnet sich durch derartig hohe Festigkeitswerte (TINSCHERT 2002, TINSCHERT et al. 2005, TINSCHERT et al. 2007, TINSCHERT et al. 2000) und große Härte aus. Daher müssen solche hochfesten Keramiken sehr präzise eingeschliffen und individuell angepasst werden.

Keramikgerüste werden üblicherweise aus einem Block gefräst oder im zahntechnischen Labor gepresst. Wenn beim Einpassen der Rekonstruktion am Patienten Korrekturen notwendig sind, stellen die Werkstoffeigenschaften des Materials den Zahnarzt vor Probleme, da Aufgrund ihrer Festigkeit und Härte die Dentalkeramiken mit diamantierten Schleifkörpern schwer zu bearbeiten sind. Zum einen sollen die Schleifkörper präzises Entfernen von Fehlkontakten und Passungengenauigkeiten ermöglichen, ohne dabei die Keramikoberfläche zu beschädigen, zum anderen müssen sie der Härte des Werkstoffes widerstehen und dürfen nicht zu schnell abnutzen. Es ist bekannt, dass die diamantierten Schleifkörper bei den unterschiedlichen an sie gestellten Aufgaben wie Präparation von Zähnen, Beschleifen von Metallrestorationen, Kunststoffen und Keramiken eine unterschiedliche Schleifleistung erbringen (Marxkors & Danger 1998). Die Schleifleistung dieser Diamantschleifkörper wird über ihren Substanzabtrag pro Zeiteinheit definiert.

Bislang wurde die Frage nicht untersucht, ob die handelsüblichen diamantierten Schleifkörper ausreichend oder ob speziell angebotene Keramiksleifkörper für die Bearbeitung von Zirkondioxidkeramiken zu bevorzugen sind.

In der vorliegenden Arbeit sollen anhand von unterschiedlichen Beschleifversuchen mit herkömmlichen Diamantschleifern im Vergleich zu speziellen Keramiksleifern beim Einsatz auf Zirkondioxidkeramik die Schleifleistung und die Standzeiten untersucht werden. Dadurch sollen für Zahnärzte relevante Aussagen über die Beschleifeigenschaften und die Abnutzung der Diamantschleifkörper getroffen werden können.

2 Literatur

2.1 Allgemeiner Überblick über keramische Dentalwerkstoffe

Als Keramik werden alle nichtmetallischen anorganischen Werkstoffe, kristalline Werkstoffe bzw. Stoffgemische, die durch Sintern hergestellt werden, bezeichnet (TIETZ 1994). Der Sinterprozess ist ein Fertigungsverfahren, in dem ein poröser Körper in einen dichten Festkörper mit Steigerung der Festigkeit überführt wird.

Keramische Dentalwerkstoffe lassen sich nach verschiedenen Kriterien einteilen: zum Einen nach der Herstellungsart (Gießen, Pressen, Fräsen) oder dem Anwendungsbereich (Gebrauchskeramik, technische Keramik, Baukeramik) (MUNZ & FETT 1989), zum anderen nach ihrem chemischen Aufbau: Oxid-, Nichtoxid- und Silikatkeramiken (WILLMANN 1986), die letztere ist die für Dentalkeramiken sinnvollere. Vollkeramikrestorationen können aus Keramiken folgender Obergruppen angefertigt werden: Siliciumdioxid- oder Glaskeramik, Aluminiumtrioxid- und Zirkondioxidkeramik.

Als herkömmliche Dentalkeramiken sind Feldspatkeramiken zu nennen, die zu den Siliciumdioxidkeramiken gehören. Sie bestehen zu mehr als 50% aus einer amorphen Glasphase aus Siliciumdioxid und sind mit oxidischen Zusätzen wie z.B. Aluminiumdioxid, Natriumoxid und Leuzitkristallen versehen. Weiterhin werden Glaskeramiken im Dentalbereich eingesetzt, die eine ähnliche Zusammensetzung wie die Feldspatkeramiken aufweisen. Der Unterschied besteht darin, dass die amorphe Glasstruktur erst in einem sekundären Kristallisationsprozess auskristallisiert wird (HAHN & LÖST 1992). Zu diesen Glaskeramiken gehören alle presskeramischen Systeme. Die Glaskeramik besteht hauptsächlich aus SiO_2 , K_2O und MgO . Durch die Verunreinigung mit MgF_2 wird die Keramisierung von der Glas- in eine kristalline Phase erst ermöglicht.

Aus dem Bereich der technischen Keramik stammt der Begriff Hochleistungskeramik (HAHN & LÖST 1992, HAHN 1994). Hierzu gehören die oxidischen und nichtoxidischen Werkstoffe. Für ihre Herstellung werden synthetische Rohstoffe genutzt. Das sind Ausgangsstoffe, die durch chemische Reaktionen in Spezialverfahren in ihrem atomaren Aufbau verändert werden (HENNIKE). Dadurch können diese Werkstoffe in ihren Eigenschaften optimiert werden, z.B. kann der Reinheitsgrad gesteigert werden. Durch den hohen Anteil der Glasphase, verbunden mit einer niedrigen mechanischen Festigkeit und einer großen Anfälligkeit durch korrosive Einflüsse im Mund ist der silikatkeramische

Zahnersatz für höher belastete Restaurationen wie z.B. Brückenversorgungen nicht geeignet (SCHWICKERATH 1986, SCHWICKERATH 1994, WHITE 1993). Im Gegensatz zu den Silikatkeramiken sind Oxidkeramiken polykristalline Werkstoffe. Sie bestehen in der Regel zu mindestens 90 GEW. % aus einphasigen Einkomponenten- Metalloxiden mit Dominanz der kristallinen Phase. Oxidkeramiken können aus einfachen Oxiden bestehen (Aluminiumdioxid und Zirkondioxid) und durch weitere Zusätze in ihren Eigenschaften verändert werden wie z.B. Dispersionskeramiken (Zirkondioxidkeramik mit verteilten Zusätzen von Aluminiumdioxid) (MAIER 1995). Oxidkeramiken auf der Basis von Zirkonoxid weisen eine höhere Festigkeit auf als auf Aluminiumoxidbasis. Diesbezüglich ist die Verwendung von Zirkondioxidkeramiken für die Herstellung hochbelasteter Restaurationen vorteilhaft (FILSER et al. 2002, LÜTHY et al. 2005, SCHNEEMANN et al. 2005, STAMOULI et al. 2006, TINSCHERT et al. 1999, TINSCHERT et al. 2000, TINSCHERT et al. 2006, TINSCHERT et al. 2001). Oxidkeramiken (oxidische Hochleistungskeramiken) auf der Basis von Aluminiumoxid (Al_2O_3 und Zirkondioxid (ZrO_2)) haben eine gelblich- weiße Farbe (TINSCHERT et al. 1999). Die hohe Opazität macht die Farbanpassung an die Nachbarzähne schwer, jedoch wird durch die Verblendung mit keramischen Massen die gewünschte Individualität erzielt.

2.2 Zirkondioxidkeramik

Das Element Zirkon ist ein Mineral mit silikatischer Zusammensetzung und kristallinem Aufbau. Es ist ein Zirkoniumsilikat ($ZrSiO_4$). Das Zirkonium findet sich in vulkanischem Gestein als anorganischer Bestandteil der Erdkruste, als Primärlagerstätte wie Syenit, Granit, Gneis und Schiefer.

Zirkonium ist ein weiches, biegsames, silberfarbendes Metall und gehört zur Titangruppe. Durch die Passivierungsschicht (d.h. Oxidschicht) ist es korrosionsresistent. Die bedeutendste Verbindung dieses Metalls ist Zirkoniumdioxid (ZrO_2). Es wird in der Literatur häufig nur als Zirkonoxid bezeichnet. Das Zirkonoxid wird aus mineralischen Rohstoffen wie Baddeleyit (=96-99% ZrO_2 Gehalt) oder Zirkonsand ($ZrSiO_4$) synthetisch hergestellt. Es kann auch aus Sand von Stränden als Sekundärlagerstätte gewonnen werden (BURGER 1996, STEVENS 1986). Bei seinem Vorkommen unterscheidet man drei verschiedene Modifikationen (monoklin, tetragonal, kubisch), die von der Temperatur und den zugesetzten Oxiden abhängen. Diese drei Phasen können nebeneinander oder separat auftreten. Die monokline Gitterstruktur ist bei Temperaturen bis $1170^\circ C$ bei einer Dichte von $5,830 \text{ kg/m}^3$ stabil. Danach wandelt sie sich zur tetragonalen Phase um, die bis $2370^\circ C$ bei einer Dichte von $6,100 \text{ kg/m}^3$ ihre Stabilität beibehält. Bei Überschreiten der Temperatur von $2370^\circ C$ entsteht die kubische Kristallstruktur bis zum Schmelzpunkt, der bei $2680^\circ C$ mit einer Dichte von $6,090 \text{ kg/m}^3$ liegt (MAIER 1991). Bei hohem Druck bildet sich zusätzlich eine orthorhombische Form (SANDKUHL 1996). Die größte Bedeutung hat die Umwandlung von der tetragonalen zur monoklinen Phase, der so genannten t/m- Umwandlung. Bei Abkühlung auf Zimmertemperatur kommt es zu einer Volumenzunahme von 3-5% (EVANS & HEUER 1986). Dies führt zu Rissbildungen im Keramikgefüge (STEVENS 1986), kann sich aber auch positiv durch Erhöhung der Festigkeitseigenschaften der Keramik auswirken. Daher wird dieser Vorgang das Konzept der Phasentransformationsfestigung genannt. Dies wurde erstmalig von GARVIE et al. (1975) für eine Zirkonoxidverbindung beschrieben und kann auf verschiedene Keramiksysteeme übertragen werden (EVANS 1990). Bei diesem Konzept spielt die in weiten Bereichen gegebene Löslichkeit einiger oxidischer Verbindungen im Zirkonoxid die entscheidende Rolle, die zur Festigkeit der tetragonalen Phase führt und die kritische t/m- Phase unterdrückt. Dabei werden bestimmte Oxide in das Zirkonoxidkristallgitter

eingebaut. Solche Oxide sind MgO, CaO, CeO₂, Y₂O₃ (MAIER 1991, STEVENS 1986). Durch ihre Zugabe können die Volumenzunahme umgangen und gleichzeitig verbesserte Festigkeitseigenschaften erzielt werden (STEVENS 1986). Indem definierte Mengen der stabilisierenden Oxide zugegeben werden, ist es möglich, mehr intensiv vermischte Phasen zu bilden. Das Ergebnis ist eine Teilstabilisierung des Zirkonoxids (STEVENS 1986). Diese bietet bessere mechanische Kennwerte als eine Vollstabilisierung (MAIER 1991). Je nach Art und Gehalt der Oxide unterscheidet man zwischen vollstabilisiertem Zirkonoxid (FSZ: Fully stabiliezed circonia), teilstabilisiertem Zirkonoxid (PSZ: partially stabiliezed circonia) und tetragonalem Zirkonoxid (TZP: tetragonal circonia polycrystals). Am günstigsten hat sich die Dotierung mit Y₂O₃ erwiesen, da diese stark belastbare Zirkondioxidkeramik erzeugt. Die mechanischen Eigenschaften von Zirkondioxidkeramiken können mit steigendem Gehalt an tetragonaler Phase gesteigert werden (MAIER 1991, TIETZ 1994). Es wurde eine Zirkondioxidkeramik mit weniger als 5 Gewichtsprozent Y₂O₃, die vollständig aus der tetragonalen Phase besteht, entwickelt (GUPTA 1987, GUPTA et al. 1977, RIETH et al. 1976). Diese Art von Keramik wird auch als tetragonales Zirkonoxidpolykristall (TZP) bezeichnet. Wenn Yttriumoxid zugegeben wird, ist die Bezeichnung Y-TZP-Keramik. In der Zahnmedizin wird Zirkonoxidkeramik nahezu ausschließlich in Form von Y-TZP mit sehr kleinen Korngrößen >0,6 µm eingesetzt. Die kleineren Korngrößen hemmen die t/m- Umwandlung (MAIER 1991). Wiederum erhöht der Zusatz von Aluminiumoxid in geringer Konzentration >1Gewichtsprozent die Korrosionsbeständigkeit (TINSCHERT et al. 2007).

2.2.1 Werkstoffkundliche Aspekte

Der größte Nachteil keramischer Werkstoffe ist die hohe Sprödigkeit. Sie sagt aus, in welchem Maß sich ein Werkstoff bei Kraftereinwirkung plastisch verformen lässt, bis Risse entstehen und er schließlich bricht. Beim Erreichen der Elastizitätsgrenze kommt es zum Bruch (KAPPERT 1996). Demzufolge sind die keramischen Werkstoffe sehr sensibel gegenüber Zug- und Scherspannungen sowie thermischer Schockbelastung. Druckspannungen jedoch können sehr gut vertragen werden (MARX 1993). Dies liegt am Kristallaufbau der Keramiken (ZIEGLER 1987), deren Atomgruppen durch kovalente Bindungen an ihren Gitterplätzen fest fixiert sind. Ein Verschieben der Gitterebene ist nicht möglich; die hervorragende Formbeständigkeit resultiert daraus. Eine plastische Verformung ist unmöglich. Hieran liegt der Grund für die Empfindlichkeit gegenüber Fehlern im Gefüge, die als Poren oder Spalten Ausgangspunkte für Mikrorisse sein können. Hier können sich von außen aufgebrachte Spannungen konzentrieren (MARX 1993). Die größten Fehler des Materials sind Oberflächenfehler z.B. Risse und Kratzer, die bei der Herstellung oder Bearbeitung der Rohlinge entstehen (SPUR & TIO 1987). Diese Risse (Mikrorisse) können durch Druckspannungen geschlossen werden. Zug- und Scherspannungen fördern die langsame Rissausbreitung, (subkritische Rissausbreitung). Durch diese langsame Rissausbreitung nimmt die Belastbarkeit bei gegebener Risszähigkeit mit zunehmender Risstiefe ab (MARX 1993). Die subkritische Rissausbreitung wird durch Feuchtigkeit (Speichel, Wasser) gefördert und als Spannungskorrosion bezeichnet. Durch konstante Belastung kann es zu einer Schwellenbeanspruchung kommen und zum Versagen der chemischen Verbindung. Gründe dafür sind plötzlich schnelle Rissausbreitungen. Daraus folgt der Sprödbbruch (MARX 1993, MUNZ 1987, RICHTER 1977), unter dem Sprödbbruch wird ein schlagartig auftretendes Materialversagen verstanden. Eine Festigkeitssteigerung dieser Werkstoffe wird durch Erhöhung der Bruchzähigkeit erreicht, wozu Umwandlungsverstärkung, Oberflächenbehandlung und Kompositssysteme genutzt werden (BIENIEK & MARX 1996, KAPPERT 1996, LUTHARDT & MUSIL 1996, MARX 1993). Eine andere Möglichkeit, Festigkeitssteigerung zu erzielen, ist die Minimierung der Fehlerstellen durch defektkontrollierende Herstellerverfahren (HIP) (MARX 1993, ZIEGLER 1987).

2.2.2 Mechanische Eigenschaften

Die mechanischen Eigenschaften werden durch die Festigkeitseigenschaften, wie Bruchfestigkeit, Bruchzähigkeit, Biegefestigkeit, Zugfestigkeit, Druckfestigkeit, Dauerfestigkeit und Bruchdehnung definiert.

Die **Bruchfestigkeit** von Keramiken ist wegen der großen Streuung in der Regel nicht normal verteilt. Der Grund dafür ist eine statische Streuung der bruchauslösenden Defekte. Bei der Streuung der Festigkeit wird der Weibullmodul m als Maß herangezogen. Dieser verhält sich reziprok zur Streuung. Der Weibullmodul m ist ein Indikator für verarbeitungs- und herstellungsbedingte Fehler im Werkstoff. Er ist ein reiner Werkstoffparameter, der nur über die Werkstoffart und den Werkstoffzustand eine Aussage macht. Eine andere mechanische Eigenschaft, die eine große Rolle spielt, ist die **Bruchzähigkeit**. Diese ist ein Maß für die Fähigkeit spröder Materialien, Verformungsenergien zu absorbieren (GEIS-GERSTORFER et al. 1993). Sie beschreibt den Widerstand gegen Sprödbrüche bei maximal vom Material aufnehmbarer Spannung (MARX 1993). Durch die Bruchzähigkeit werden verschiedene keramische Werkstoffe nach ihren Festigkeitseigenschaften klassifiziert (MARX 1993). Es ist noch kein genormtes Prüfverfahren dafür beschrieben worden (BLUMENAUER & PUSCH 1993), um die experimentelle Bestimmung der Bruchzähigkeit darzustellen. Es wurden lediglich mit Hilfe von Härteeindrücken (Vickerspyramide) erzeugte scharfe Anrisse zur Ermittlung der Bruchzähigkeit herangezogen, welche dazu führen, dass sich halbelliptische Oberflächenrisse ausbilden (sog. Vickers- Härte) (BLUMENAUER & PUSCH 1993, GEIS- GERSTORFER et al. 1993, KERN & KNODE 1991, SCHERRER et al. 1998, SEGHI & ROSENSTIEL 1995, WAGNER & CHU 1996) Zahnärztliche Restaurationen unterliegen einer komplexen Spannungsverteilung. Diese setzt sich aus Druck-, Zug- Schub- und Torsionsbelastung zusammen. Keramiken sind auf Druck gut belastbar, bei Zug- und Scherspannungen weisen sie jedoch Empfindlichkeit auf. Druckspannungen schließen beginnende Risse und erschweren ihre Ausbreitung. Zug- und Scheerbelastung öffnen die Rissflanken und führen so zur Rissvertiefung. Vollkeramischer Zahnersatz sollte auf Druck belastet werden. Die **Biegefestigkeit** jedoch wird bei Zugbelastung ermittelt (MUNZ & FETT 1989). Die mittlere Biegefestigkeit herkömmlicher Glas- und feldspatkeramischer Systeme liegt kaum höher als die einer konventionellen Verblendmetallkeramik (LUDWIG 1975). Für

Aluminium- oder Zirkondioxidkeramiken wurden fünf bis zehnfach höhere Festigkeitswerte ermittelt. Sie erreichen etwa 1300 MPA (TINSCHERT 2002, TINSCHERT et al. 2005, TINSCHERT et al. 2007, TINSCHERT et al. 2000).

Werden die Festigkeitseigenschaften keramischer Werkstoffe betrachtet, so wird sichtbar, dass Keramiken im Gegensatz zu Metallen eine asymmetrische Verteilung der Festigkeitswerte aufweisen, die zum Teil durch eine Gaußfunktion beschrieben werden können (MAIER 1991).

Die Biegefestigkeit oder Risszähigkeit charakterisieren nur die Kurzzeitbelastbarkeit eines Werkstoffes. Um das Langzeitverhalten zu charakterisieren, wird die Langzeit- oder Dauerfestigkeit geprüft. Sie gibt die maximale Belastung an, die ein Werkstoff in einem gegebenen Umfeld auf Dauer toleriert.

2.2.3 Klinische Eigenschaften

Aufgrund ihrer hohen Festigkeit ist Zirkondioxidkeramik – TZP, die 1994 in den Dentalbereich eingeführt wurde, für vollkeramischen Zahnersatz prädestiniert. Der Nachteil früher verwendeter Keramiken war die fehlende Festigkeit, die beispielsweise zu Frakturen der Keramik führte, wenn sie keine ausreichende Schichtstärke oder Unterstützung vom Metallgerüst besaßen. Der Vorteil dieser Keramik ist die große Härte und Bruchzähigkeit. Daraus erwuchs aber auch der Nachteil, dass das Material hauptsächlich industriell hergestellt wurde, aber schlecht in der Behandlung nachgearbeitet werden konnte (GRABER et al. 1994). Anfangs wurden Wurzelstifte und Implantatabutments aus Zirkondioxid angeboten (KERN et al. 1998, WOHLWEND et al. 1996). Bei diesen stellte sich die schwierige Konditionierbarkeit der Oberfläche als ein Problem beim Einkleben der Restauration in den Zahn bzw. bei der zellulären Anheftung an der Implantatoberfläche dar. Mit der Entwicklung neuer CAD/CAM - Techniken und geeigneter Verblendkeramiken unter Berücksichtigung der niedrigen Wärmeausdehnungskoeffizienten (WAK) der Zirkondioxidkeramik wurde die Anfertigung von individuellem Zahnersatz möglich (LUTHARDT et al. 1998, STEPHAN 1996). Die Anwendungsgebiete wurden zudem auf Teleskoparbeiten und kleine Adhäsivbrücken ausgeweitet (EDELHOFF & WEBER 2003, KERN 2005, WEIGEL & LAUER 2000). Bislang zeigen die Ergebnisse heutiger Studien mit drei- bis fünfjährigen klinischen Beobachtungszeiten eine positive Tendenz,

dass sich zirkonoxidbasierter Zahnersatz in der Praxis bewährt (TINSCHERT et al. 2006 und 2007).

Zirkondioxidkeramik wird seit einigen Jahren als Implantatmaterial angeboten, da die Nachteile früherer Keramikimplantate wie Resorption und Fraktur nicht bestehen. Jedoch fehlen klinische Erfahrungen z.B. zur Osseointegrationsfähigkeit und zur Langzeitstabilität, weshalb noch keine gesicherten Aussagen getroffen werden können (VOLZ 2006).

2.3 Bearbeitung von Zirkondioxidkeramik

Die Bearbeitung keramischer Werkstoffe erfolgt in der Regel durch Schleifen. Dies ist mit niedrigen Werkzeugstandzeiten, niedrigen Zeitspannvolumina und schlechten Oberflächenqualitäten verbunden, bedingt durch die große Härte und die fehlende Duktilität (HAHN & LÖST 1992, HAHN & WOLF 1994).

Der Schleifprozess der Zirkondioxidkeramik gliedert sich in folgende Hauptschritte: Formschleifen, Feinschleifen und Polieren. Dieser Prozess schließt sich der Formgebung, Sinterung und den HiP- Verfahren an. Als Bearbeitungswerkzeuge werden diamantbestückte Werkzeuge verwendet, wobei Körnung, Bindung und Brüchigkeit der Diamantkörner wichtig sind. Die Textur und Struktur der Keramikoberfläche wird durch die Auswahl der Diamantwerkzeuge und der Körnung bestimmt. Die zu bearbeitenden Oberflächen werden unter starker Kühlung mit Wasser beschliffen. Die Schleifwerkzeuge und die Bearbeitungsparameter werden dabei so gewählt, dass die Keramikoberflächen nicht beschädigt werden.

Das Bearbeiten von Zirkondioxidkeramik ist durch verschiedene Verfahren möglich. Die Präzisionsschleifverfahren werden für Wurzelstifte, Abutments und Zahnimplantate angewendet. Es handelt sich um Hochgeschwindigkeitsschleifer.

CAD/CAM- Systeme spielen bei der Bearbeitung von Zirkondioxidkeramik eine zunehmend große Rolle. Grundlagen dieser Systeme sind die Datenerfassung und die computergestützte Fertigung der Restaurationen. Das Funktionsprinzip ist die mechanische Digitalisierung.

Auch die Bearbeitung der Zirkondioxidkeramik direkt am Patienten ist eine häufige Herausforderung für den Zahnarzt. Das Beschleifen von Keramik- Abutments, das Einpassen von Keramikrestaurationen, das Entfernen von Störstellen sowie das Trepanieren der Keramik sind tägliche Aufgaben. Für diese Anforderungen

werden dem Zahnarzt ZR- Schleifer mit einer Spezialbeschichtung, die das Diamantkorn dauerhaft in die Bindschicht einbindet, angeboten. Dadurch sollen sich die Abtragsleistung und die Standzeit der Schleifinstrumente verbessern. Es stehen je nach Indikation verschiedene Körnungen zur Verfügung: z.B. 40, 70 und 100 μm . Beim Anpassen von Zirkondioxidkeramik-Restaurationen werden Schleifer mit normaler Körnung (ca.100 μm , blau- weißer Ring) verwendet. Diese sind weniger abtragsstark. Beim Trepanieren der Restaurationen oder bei der Entfernung von Störstellen werden Schleifer mit grober Körnung (ca.100 μm , grün- weißer Ring) mit stärkerem Abtrag (Abb. 1) benutzt.

Bei der Bearbeitung von Zirkondioxidkeramik ist es besonders notwendig, die optimale Drehzahl von 160000 min^{-1} mit einem roten Winkelstück, eine Anpresskraft von $< 2\text{N}$ und eine maximale Spraykühlung von 50 ml/min einzustellen und zu beachten.

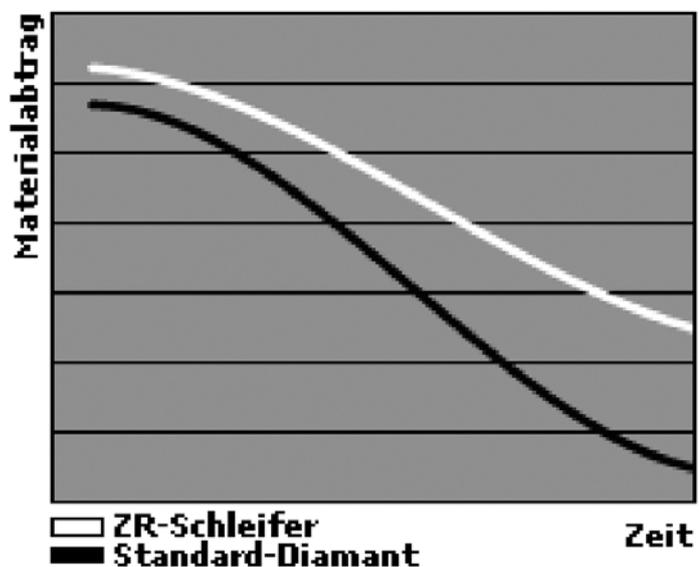


Abb. 1: Vergleich des Materialabtrags zwischen ZR- Schleifer und Standard-Diamanten in Abhängigkeit von der Standzeit.

3 Fragestellung

In dieser Untersuchung sollten zylindrische Diamantschleifkörper von verschiedenen Herstellern hinsichtlich der Parameter Abtragsleistung, Abnutzung und Oberflächengüte geprüft und miteinander verglichen werden. Die Einflussgrößen Diamantkörnung, Durchmesser, Diamant- und Beschleifungstiefe sollten berücksichtigt werden.

Die Arbeitshypothesen lauteten:

1. Spezielle Keramik-Diamantschleifkörper sind besser zum Beschleifen von Zirkondioxidkeramik geeignet als normale Diamantschleifer und nutzten weniger ab.
2. Keramik- Diamantschleifkörper mit feiner Körnung und größerem Durchmesser liefern eine bessere Güte der Keramikoberfläche.

4 Material und Methode

4.1 Versuchdesign

Die Abbildung 2 zeigt das Versuchsdesign des ersten Teils der Studie. Vier zylinderförmige Schleifkörper der Firmen Komet (Gebrüder Brasseler GmbH & Co. KG, Lemgo), Meisinger Hager & Meisinger GmbH (Neuss), Syndia Kentzler-Kaschner Dental (Ellwagen/Jagst), NTI Kahla GmbH (Kahla) wurden gegeneinander und mit der Kontrollgruppe NTI Kahla Diamantschleifer für Zirkondioxidkeramik GmbH (Kahla) verglichen. Es sollte der Verschleiß der Schleifkörper auf einer Yttrium- stabilisierten tetragonalen Zirkondioxidkeramik Digizon A-Hip (Amann Girrbach GmbH, Pforzheim) geprüft werden. Die Schleifkörper hatten einen Durchmesser von 1,4 mm und eine normale Körnung von 100 µm. Das Beschleifen der Zirkondioxidkeramik gliederte sich in drei Versuchsreihen. In den Versuchsreihen wurde ein oberflächlicher Abtrag von 0,2 mm, ein Abtrag um eine 1,4 mm Bohrertiefe und ein Abtrag von 2,0 mm Eindringtiefe eingestellt. Das Durchschleifen bei 2,0 mm Abtragstiefe erwies sich als unmöglich, da vorher der Diamantschleifkörper verschliss, weshalb nur 2 mm tief geschliffen wurde. Es wurden jeweils 10 Schleifer von jeder Firma getestet. Pro Schleifer wurden zwei Testläufe durchlaufen, hierbei wurde die zum

Durchschleifen benötigte Zeit gemessen. Die Beschleifeigenschaften wurden unter standardisierten Bedingungen hinsichtlich Anpressdruck, Rotationsgeschwindigkeit und Wasserkühlung getestet. Es wurden die Parameter Abtragungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Abtragstiefe, Verschleiß bzw. Abnutzung der Schleifkörper nach dem 1. bzw. 2. Testlauf ermittelt. Danach wurden die resultierenden Oberflächenrauigkeiten der Keramik sowie die Oberflächenstrukturen der Schleifkörper und der Zirkondioxidkeramik untersucht. Die Auswertung der Ergebnisse erfolgte anhand der profilometrischen Bestimmung der Oberflächenrauigkeit. Die Rauigkeit der beschliffenen Zirkondioxidkeramik wurde nach zwei DIN-Kenngrößen beschrieben:

- mittlerer Rautiefe R_A nach DIN 4768, ISO/DIS 4287/1 ist definiert durch den arithmetischen Mittelwert aller Abweichungen des Rauheitsprofils von der Mittellinie innerhalb der Gesamtmessstrecke,
- gemittelte Rautiefe R_Z nach DIN 4768 ist definiert als der Mittelwert aus den Einzelrautiefen der aufeinander folgenden Einzelmessstrecken innerhalb der Gesamtmessstrecke. Dabei wird als Einzelrautiefe der senkrechte Abstand zwischen dem höchsten und tiefsten Profilverlauf innerhalb der Einzelmessstrecke betrachtet ermittelt.

Exemplarische rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen wurden angefertigt.

Die statische Auswertung erfolgte mit Hilfe des ANOVA- Verfahrens und der Scheffé-Korrektur.

Das Design des zweiten Teils der Untersuchung ist in Abbildung 3 dargestellt. Darin wurden vier speziell für Zirkondioxidkeramik hergestellte zylinderförmige Schleifkörper der Firma Komet (Gebrüder Brasseler GmbH & Co. KG, Lemgo) und der Firma NTI-Kahla GmbH (Kahla) dem gleichen Testverfahren wie im Versuchsteil 1 unterzogen. Diese speziellen Schleifkörper besaßen einen Durchmesser von 1,4 mm bzw. 1,6 mm und eine Körnung von 100 μm , 70 μm bzw. 40 μm . Die Versuche wurden nur mit einem oberflächlichen Abtrag von 0,2 mm durchgeführt. Es wurden Vergleichsgruppen hinsichtlich der Durchmesser und Diamantkörnungen gebildet, wobei jeweils Abtragungsgeschwindigkeit, Oberflächenrauigkeit und- Güte der Keramik sowie Abnutzung der Schleifer beurteilt wurde.

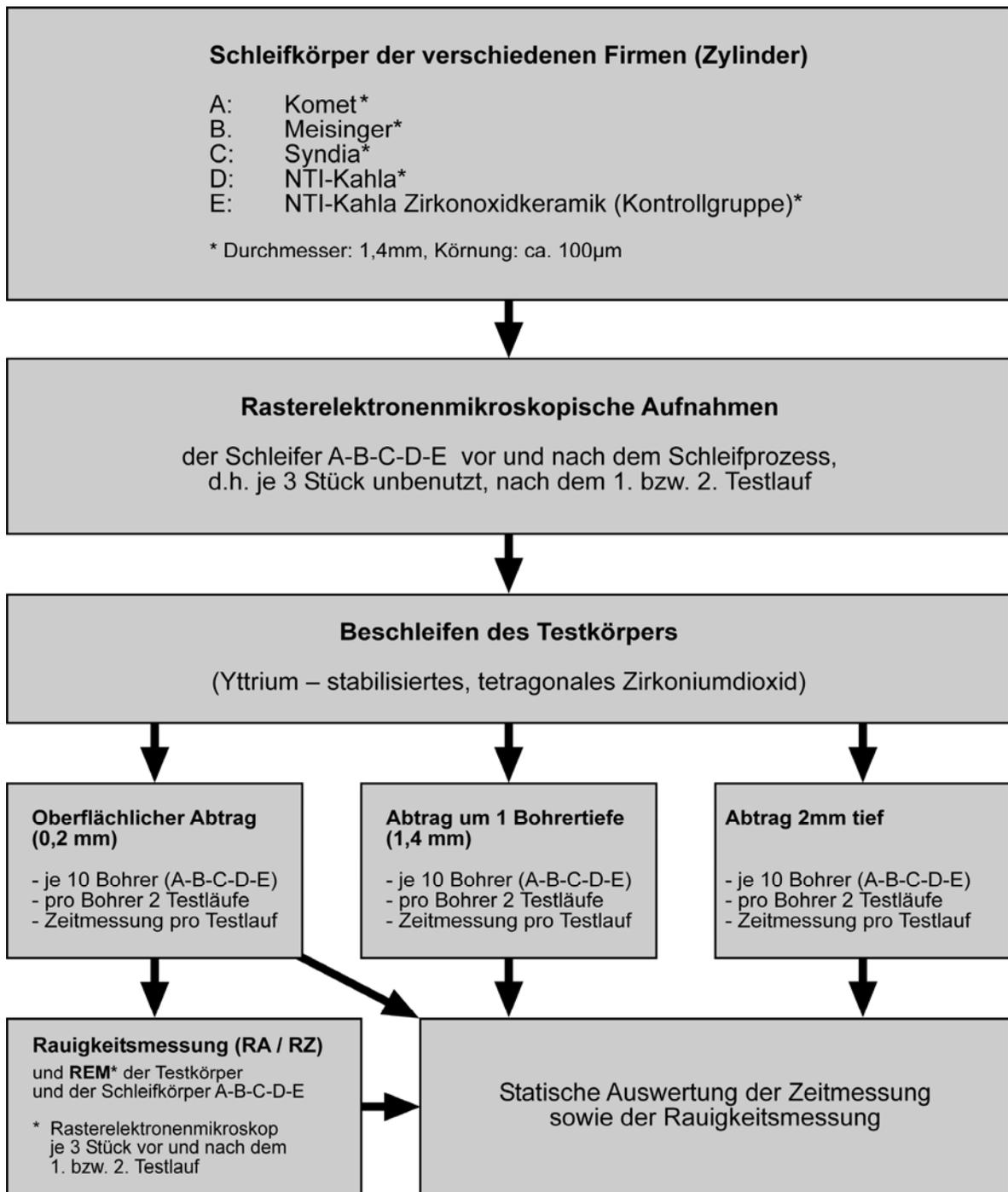


Abb. 2: Versuchsdesign Teil 1

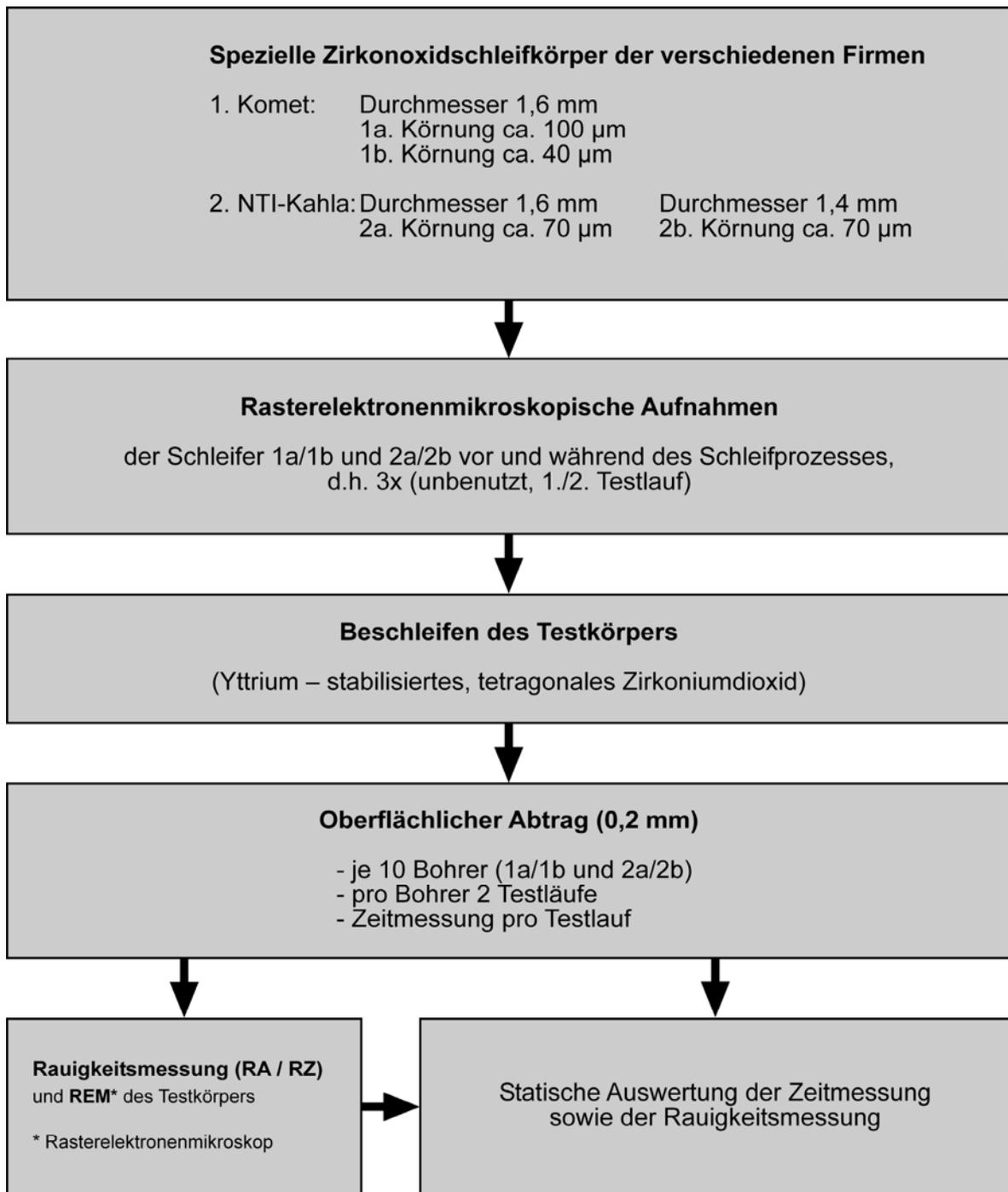


Abb. 3: Versuchsdesign Teil 2

4.1.1 Versuchsaapparatur

Die Untersuchung dieser Studie wurde mittels eines Luftlagerschlittens (Abb. 4), der Firma Komet, Gebrüder- Brasseler & CO. KG durchgeführt. Dieser Schlitten war über einen Seilzug mit Umlenkrolle mit einem Gewicht von 200 Gramm, umgerechnet 0,2 Newton verbunden. Dadurch wurde eine definierte Vorschubkraft gewährleistet. Die Bewegungsrichtung des Schlittens, in dem die Zirkondioxidkeramikstangen in einer speziell aus Aluminium gefertigten Testkörperbefestigung (Abb. 5) verankert wurden, verlief senkrecht zur Achse der rotierenden Schleifkörper. Die Schleifkörper waren immer in dem gleichen roten Winkelstück eingespannt, welches in einer Aluminiumhalterung befestigt war (Abb. 5). Das Winkelstück wurde mit Gummipuffern schwingungs- gedämpft. Das Winkelstück (Übersetzung 1:5) wurde mit einer konstanten Rotationsgeschwindigkeit von 150.000 U/min unter Wasserkühlung von 50 ml/min betrieben. Am unteren Teil der Testkörperbefestigung war eine Mikrometerschraube installiert (Abb. 6). Über diese Schraube ließ sich der Abstand des Winkelstücks bzw. des rotierenden Schleifkörpers zum Testkörper variieren. Der Schichtabtrag konnte dadurch stufenlos eingestellt werden. Der minimale einzustellende Schichtabtrag betrug 1,0 μm .



Abb. 4

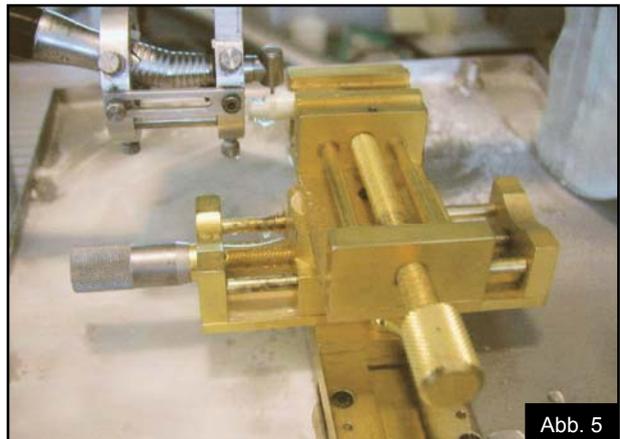


Abb. 5

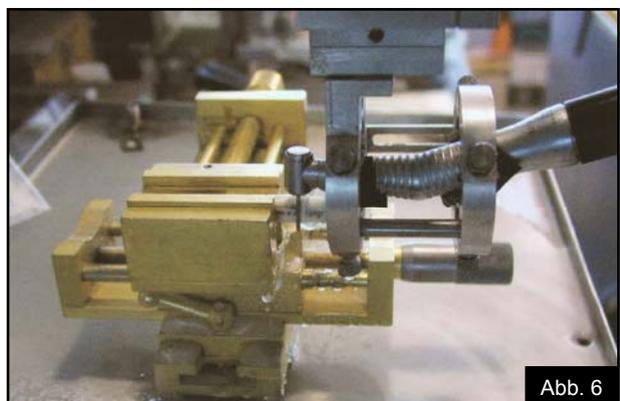


Abb. 6

4.2 Materialien:

Die neun zu untersuchenden Schleifkörper und der Testkörper sind in Tabelle 1 und Tabelle 2 aufgelistet. Die Schleifkörper unterscheiden sich in Durchmesser und Körnung.

Die Schleifkörper gliedern sich in zwei Gruppen.

1. normale Diamantschleifkörper (grün): Durchmesser 1,4 mm, Körnung 100 µm.
2. spezielle Schleifkörper für Zirkondioxidkeramik (orange):
Durchmesser 1,4mm / 1,6mm, Körnung 40 µm / 70 µm / 100 µm.

	Art der Bohrer (Kennzeichnung)	Farbring / Körnung (in µm)	Firma / Ort
1	842 KR 314 014	kein Farbring ca. 100µm	Komet Gebr. Brasseler GmbH & Co. KG (Lemgo, Deutschland)
2	842 014	rot ca. 100µm	Meisinger Hager & Meisinger GmbH (Neuss, Deutschland)
3	842 014 M/3	kein Farbring ca. 100µm	Syndia Kentzler-Kaschner Dental (Ellwagen/Jagst, Deutschland)
4	842 014 M	kein Farbring ca. 100µm	NTI-Kahla GmbH (Kahla, Deutschland)
5	Z 881 014 F/FG	rot ca. 70µm	NTI-Kahla GmbH
6	Z 881 016 F/FG	rot ca. 70µm	NTI-Kahla GmbH
7	Z 881 014 M/FG	blau ca. 100µm	NTI-Kahla GmbH
8	ZR 6881 314 016	grün/weiß ca.100µm	Komet Gebr. Brasseler GmbH & Co. KG
9	ZR 8881 315 016	rot/weiß ca. 40µm	Komet Gebr. Brasseler GmbH & Co. KG

	normale Diamantschleifkörper
	spezielle Schleifkörper für Zirkonoxidkeramik

Tabelle 1: getestete Schleifkörper

Material	Materialtyp	Kennzeichnung	Eigenschaften	physik. Eigenschaften	Firma / Ort
Digizon A-HIP	ZrO ₂ Y-TZP HIP-A	CE 0124	CAD / LAM-Rohling Zirkondioxidkeramik	Vickershärte 1200 HV E-Modul 200 GPa Dichte 6,0 g/cm ³	Amann-Girbach GmbH (Pforzheim, Deutschland)

Tabelle 2: Zirkondioxidkeramik

4.3 Versuchsdurchführung

4.3.1 Messung der Rautiefen

Zur Rautiefenmessung wurden die Prüfkörperoberflächen mittels Perthometer (Fa. Feinprüf GmbH, Göttingen) auf einer Strecke von 5 mm abgetastet (Abb.7). Es handelte sich um ein lineares, elektromechanisches Abtastverfahren. Die Rauigkeitskenngrößen nach DIN wurden



Abb. 7

automatisch berechnet. Die Testkörperoberflächen wurden nach dem Beschleifen senkrecht zur Präparationsrichtung abgetastet.

Die ausgewerteten Rauigkeitskenngrößen waren:

- Mittenrauigkeit R_A (average) nach DIN 4768, ISO/DIS 4287/1: Der arithmetische Mittelwert aller Abweichungen des Rauheitsprofils von der Mittellinie innerhalb der Gesamtmessstrecke.
- Gemittelte Rautiefe R_Z nach DIN 4768: Der Mittelwert aus den Einzelrautiefen der aufeinanderfolgenden Einzelmessstrecken innerhalb der Gesamtmessstrecke. Dabei wird als Einzelrautiefe der senkrechte Abstand zwischen dem höchsten und tiefsten Profilpunkt der Einzelmessstrecke betrachtet.

4.3.2 Rasterelektronenmikroskopische Oberflächenanalyse

Die Rasterelektronenmikroskopische Oberflächenanalyse wurde mit dem Rasterelektronenmikroskop Ultra 55 mit Schleuse (Zeiss), Schottky- Emitter und GEMINI- Optik durchgeführt. Als Detektor kam „SE- 2“ zum Einsatz. Die Beschleunigungsspannung betrug 15 KeV. Um die Oberfläche abbilden zu können, wurden die Proben (Keramikscheiben) mit einer sehr dünnen Schicht Gold „besputtert“ (Baltec-Sputter- Coater). Die Goldschicht war ca. 0,5- 1 μm dick. Das EDX Spektrum wurde mit dem „Apollo- Detektor“ und der Analyse- Software von EDAX ermittelt. Die Bilder wurden in 50-, 100-, 200-, 500facher Vergrößerung aufgenommen.

4.4 Statische Auswertungen

Die statische Auswertung der Ergebnisse erfolgte mit dem multifaktoriellen ANOVA-Test und der Scheffé-Korrektur. Das Signifikanzniveau betrug $\alpha=0,05$.

5 Ergebnisse

5.1 Vergleich der Beschleifzeiten zwischen normalen Diamantschleifern und Diamantschleifern für Zirkondioxidkeramik mit einem Durchmesser von 1,4 mm.

Die Beschleifzeiten zwischen normalen und Zirkondioxidkeramikschleifer wurden bei zwei Beschleifdurchgängen verglichen.

Abbildung 8 und Tabelle 2 zeigen dass Zirkondioxidkeramik hochsignifikant schneller mit speziellen Keramikdiamanten beschliffen wurden als mit allen getesteten Normaldiamanten. Zwischen den vier Normaldiamanten bestanden bei 0,2 mm Abtrag keine signifikanten Unterschiede in beiden Durchgängen. Beim zweiten Schleifgang mit denselben Diamanten erhöhten sich die Zeiten in allen Gruppen signifikant. Die gemessenen Ergebnisse lagen für die Normaldiamanten durchschnittlich bei ca. 190 Sek. im ersten und 210 Sek. im zweiten Durchgang.

Der Keramikschleifkörper, welcher als Kontrollgruppe fungierte, benötigte im ersten Durchgang 80 Sek. und im zweiten Durchgang durchschnittlich ca. 100 Sek.

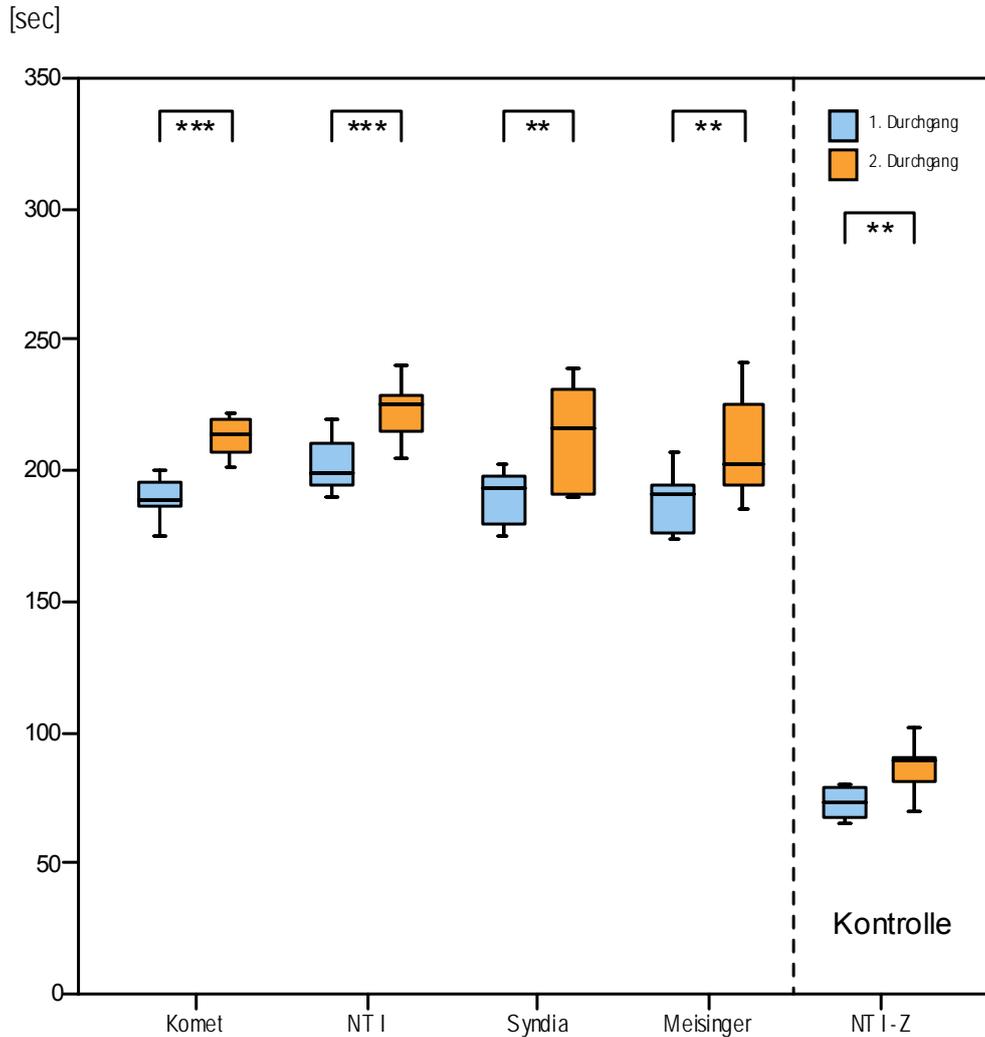


Abb. 8: Darstellung der verschiedenen Schleifkörper mit 1,4 mm Durchmesser, in Abhängigkeit von der Zeit, welche sie benötigen, um einen oberflächlichen Abtrag von 0,2 mm über die gesamte Probenoberfläche zu erzielen (**p< 0,01; ***p< 0,001).

	Komet	NTI	Syndia	Meisinger	NTI-Z
Komet	/	n.s.	n.s.	n.s.	***
NTI	n.s.	/	n.s.	n.s.	***
Syndia	n.s.	n.s.	/	n.s.	***
Meisinger	n.s.	n.s.	n.s.	/	***
NTI-Z	***	***	***	***	/

2.Durchgang					
	Komet	NTI	Syndia	Meisinger	NTI-Z
Komet	/	n.s.	n.s.	n.s.	***
NTI	n.s.	/	n.s.	n.s.	***
Syndia	n.s.	n.s.	/	n.s.	***
Meisinger	n.s.	n.s.	n.s.	/	***
NTI-Z	***	***	***	***	/

Tab. 2: Vergleich der Beschleifzeiten zwischen Diamantschleifern mit 1,4 mm Schleifkörperdurchmesser bei 0,2 mm Abtrag im 1. Durchgang/ 2. Durchgang (***p< 0,001; n.s.= nicht signifikant, p>0,05)

Beim Vergleich der Beschleifzeiten konventioneller und Keramik- Schleifkörper bei einer Abtragtiefe von 1,4 mm bestanden niedrig signifikante Unterschiede für Komet und Meisinger und signifikante Unterschiede für NTI und Syndia Diamanten gegenüber den NTI-Z- Diamanten (Abb. 9, Tab. 3). Die gemessenen Ergebnisse lagen zwischen 80 und 130 Sek. Auffällig war, dass die gemessenen Zeiten im zweiten Durchgang bei den verschiedenen Schleifkörpern ungleichmäßig höher waren. Die gemessenen Zeiten lagen beim ersten Durchgang bei ca. 80 Sek. bei den Normaldiamanten und bei ca. 90 Sek. bei den Keramikdiamanten. Beim zweiten Durchgang wurden für Diamanten von Syndia und Meisinger gegenüber dem ersten Durchgang signifikant höhere Werte von unter 100 Sek. gemessen. Für Komet, NTI und NTI-Z Diamanten erhöhten sich die Werte im zweiten Durchgang hoch signifikant auf über 100 bis 130 Sek.

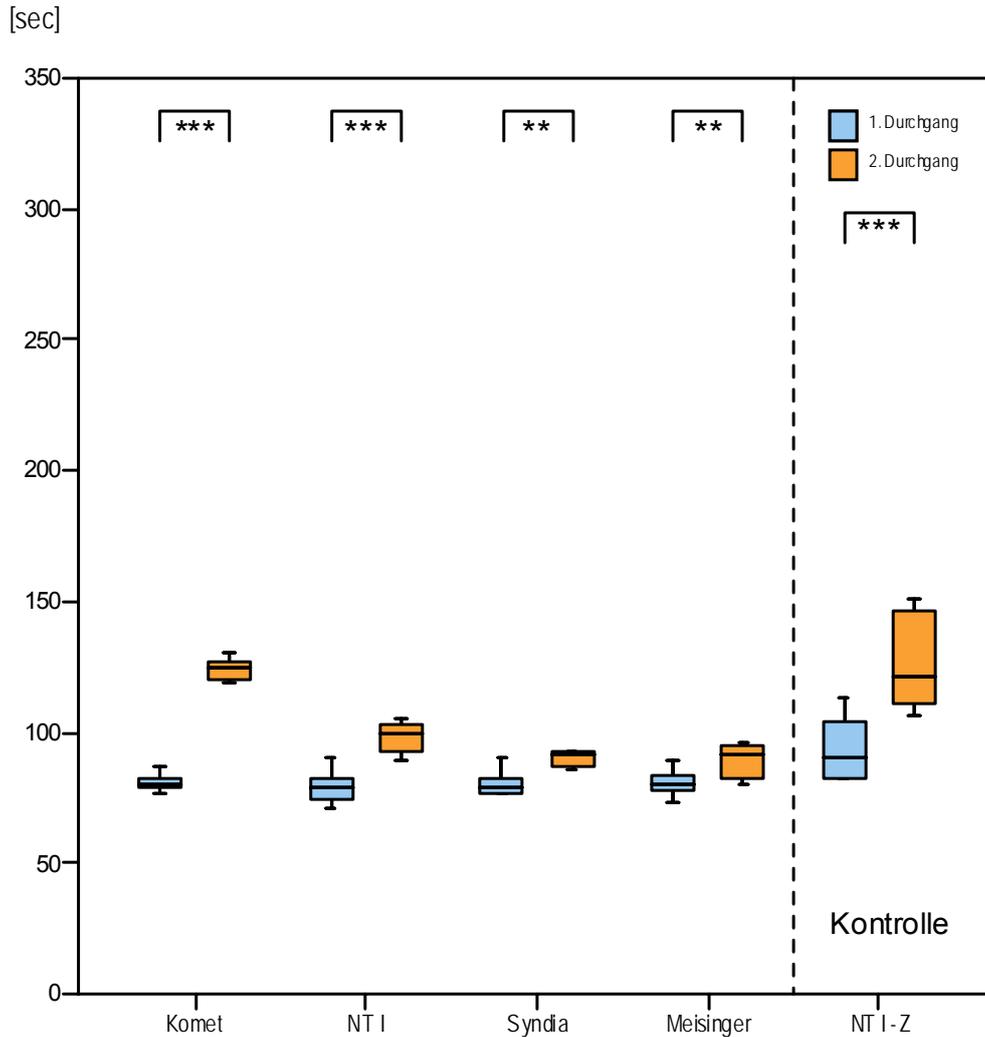


Abb. 9: Darstellung der verschiedenen Schleifkörper mit 1,4 mm Durchmesser in Abhängigkeit von der Zeit, welche sie benötigten, um einen Abtrag von 1,4 mm Eindringtiefe zu erzielen (**p< 0,01; ***p< 0,001)

	Komet	NTI	Syndia	Meisinger	NTI-Z
Komet	/	n.s.	n.s.	n.s.	*
NTI	n.s.	/	n.s.	n.s.	**
Syndia	n.s.	n.s.	/	n.s.	**
Meisinger	n.s.	n.s.	n.s.	/	*
NTI-Z	*	**	**	*	/

2. Durchgang

Komet	/	n.s.	n.s.	n.s.	***
NTI	n.s.	/	n.s.	n.s.	***
Syndia	n.s.	n.s.	/	n.s.	***
Meisinger	n.s.	n.s.	n.s.	/	n.s.
NTI-Z	***	***	***	n.s.	/

Tab. 3: Vergleich der Beschleifzeiten zwischen Diamantschleifern mit 1,4 mm Schleifkörperdurchmesser bei 1,4 mm Abtrag im 1. Durchgang/ 2. Durchgang (*p< 0,05; **p< 0,01; n.s.= nicht signifikant, p>0,05)

Bei einer Anstelltiefe von 2 mm lagen die durchschnittlichen Beschleifzeiten für die Schleifkörper von NTI, Syndia und Meisinger bei ca. 120 Sek. im ersten Durchgang (Abb. 10). Im zweiten Durchgang erhöhten sich diese Werte signifikant (Syndia, Meisinger) bzw. hochsignifikant (NTI) im Durchschnitt auf ca. 140 Sek. (Tab.4). Die längste Zeit benötigte der Schleifkörper von Komet mit 200 Sek. im ersten Durchgang. Im zweiten Durchgang lagen die für den Schleifkörper von Komet ermittelten mit durchschnittlich ca. 310 Sek. hochsignifikant über denen des ersten Durchgangs. Sowohl im ersten als auch im zweiten Durchgang lagen die Werte hochsignifikant über denen der übrigen drei Gruppen konventioneller Diamantschleifkörper. Die Kontrollgruppe NTI-Z benötigte im zweiten Durchgang (ca. 280 Sek.) signifikant länger als im ersten Durchgang (ca. 70 Sek.). Im ersten Durchgang lagen die Werte für die Kontrollgruppe signifikant höher als die Zeiten von NTI, Syndia und Meisinger, aber hochsignifikant unter denen von den Schleifkörpern von Komet.

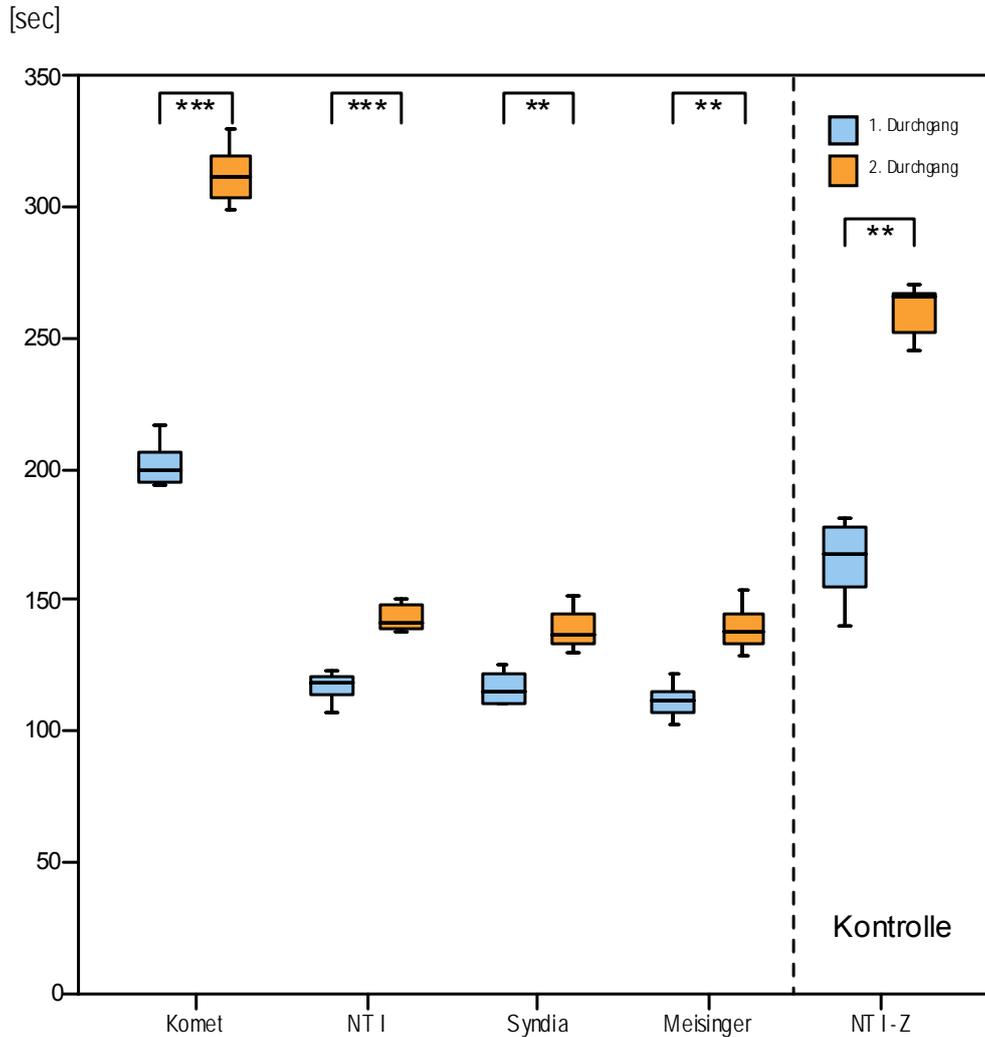


Abb. 10: Darstellung der verschiedenen Schleifkörper mit 1,4 mm Durchmesser in Abhängigkeit von der Zeit, welche sie benötigten, um einen Abtrag von 2 mm Eindringtiefe in 2 mm Anstelltiefe zu erzielen. (**p< 0,01; ***p< 0,001)

	Komet	NTI	Syndia	Meisinger	NTI-Z
Komet	/	***	***	***	***
NTI	***	/	n.s.	n.s.	***
Syndia	***	n.s.	/	n.s.	***
Meisinger	***	n.s.	n.s.	/	***
NTI-Z	***	***	***	***	/

2.Durchgang

Komet	/	n.s.	n.s.	n.s.	***
NTI	n.s.	/	n.s.	n.s.	***
Syndia	n.s.	n.s.	/	n.s.	***
Meisinger	n.s.	n.s.	n.s.	/	***
NTI-Z	***	***	***	***	/

Tab. 4: Vergleich der Beschleifzeiten zwischen Diamantschleifern mit 1,4 mm Schleifkörperdurchmesser bei 2 mm Abtrag im 1. Durchgang/ 2. Durchgang (***p< 0,001; n.s.= nicht signifikant, p>0,05)

5.2 Vergleich der Rauigkeiten R_A und R_Z von konventionellen Diamantschleifern und der speziell für Zirkondioxidkeramik verwendeten Diamanten

Die gemessenen Mittenrauigkeiten R_A nach Beschleifen der Keramikoberfläche lagen zwischen 4,5 und 6 μm für alle Diamantschleifer mit 100 μm Körnung (Abb.11). Die Ergebnisse der Kontrollgruppe lagen auf dem gleichen Niveau, wie die der konventionellen Diamantschleifer.

Auffällig war, dass die gemessenen Mittenrauigkeiten im zweiten Durchgang immer geringer waren. Sie unterscheiden sich für alle Versuchsgruppen niedrig signifikant (Komet, Syndia, NTI-Z) bzw. signifikant (NTI, Meisinger) vom ersten Durchgang (Tab.5). Die Rauigkeit R_A mit dem Komet- Diamantschleifer lag im ersten Durchgang signifikant unter denen von NTI, Syndia und NTI-Z, sowie im zweiten Durchgang niedrig signifikant unter denen für NTI und Syndia sowie signifikant für NTI-Z.

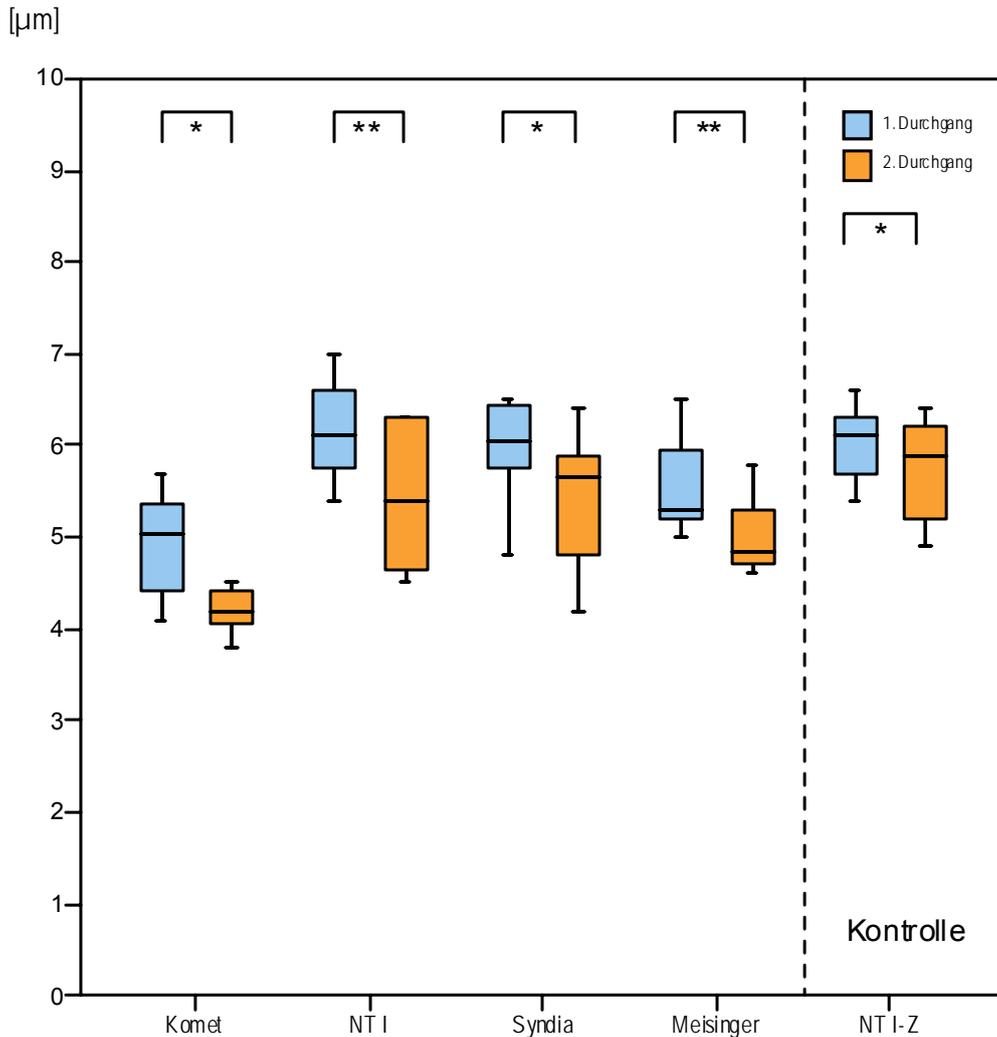


Abb. 11: Vergleich der Mittenrauigkeit R_A der Keramikoberfläche nach Beschleifen mit den normalen Diamanten und speziellen Schleifkörpern für Zirkondioxidkeramik als Kontrollgruppe mit einem Durchmesser von 1,4 mm. (* $p < 0,05$; ** $p < 0,01$)

	Komet	NTI	Syndia	Meisinger	NTI-Z
Komet	/	**	**	n.s.	**
NTI	**	/	n.s.	n.s.	n.s.
Syndia	**	n.s.	/	n.s.	n.s.
Meisinger	n.s.	n.s.	n.s.	/	n.s.
NTI-Z	**	n.s.	n.s.	n.s.	/

2. Durchgang					
	Komet	NTI	Syndia	Meisinger	NTI-Z
Komet	/	*	*	n.s.	**
NTI	*	/	n.s.	n.s.	n.s.
Syndia	*	n.s.	/	n.s.	n.s.
Meisinger	n.s.	n.s.	n.s.	/	n.s.
NTI-Z	**	n.s.	n.s.	n.s.	/

Tab. 5: Vergleich der Mittenrauigkeit R_A zwischen Diamantschleifern mit 1,4 mm Schleifkörperdurchmesser im 1. Durchgang/ 2. Durchgang (* $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; n.s.= nicht signifikant, $p > 0,05$)

Die gemessenen Zehnpunktehöhen R_z nach Beschleifen der Keramikoberfläche lagen für alle Diamantarten und die Kontrollgruppe zwischen ca. 25 und 35 μm (Abb.12). Es bestanden keine signifikanten Unterschiede zwischen den Schleifkörpern im ersten Durchgang (Tab. 6). Allerdings unterschied sich R_z zwischen Komet- Diamanten und NTI-Z im zweiten Durchgang signifikant. Die Ergebnisse der Kontrollgruppe entsprachen ansonsten denen der Normaldiamanten. Auffällig war, dass die gemessenen Rautiefen R_z im zweiten Durchgang immer geringer waren. Sie unterschieden sich für Syndia und Meisinger niedrig signifikant, für Komet und NTI-Z signifikant sowie hochsignifikant für NTI gegenüber dem ersten Durchgang.

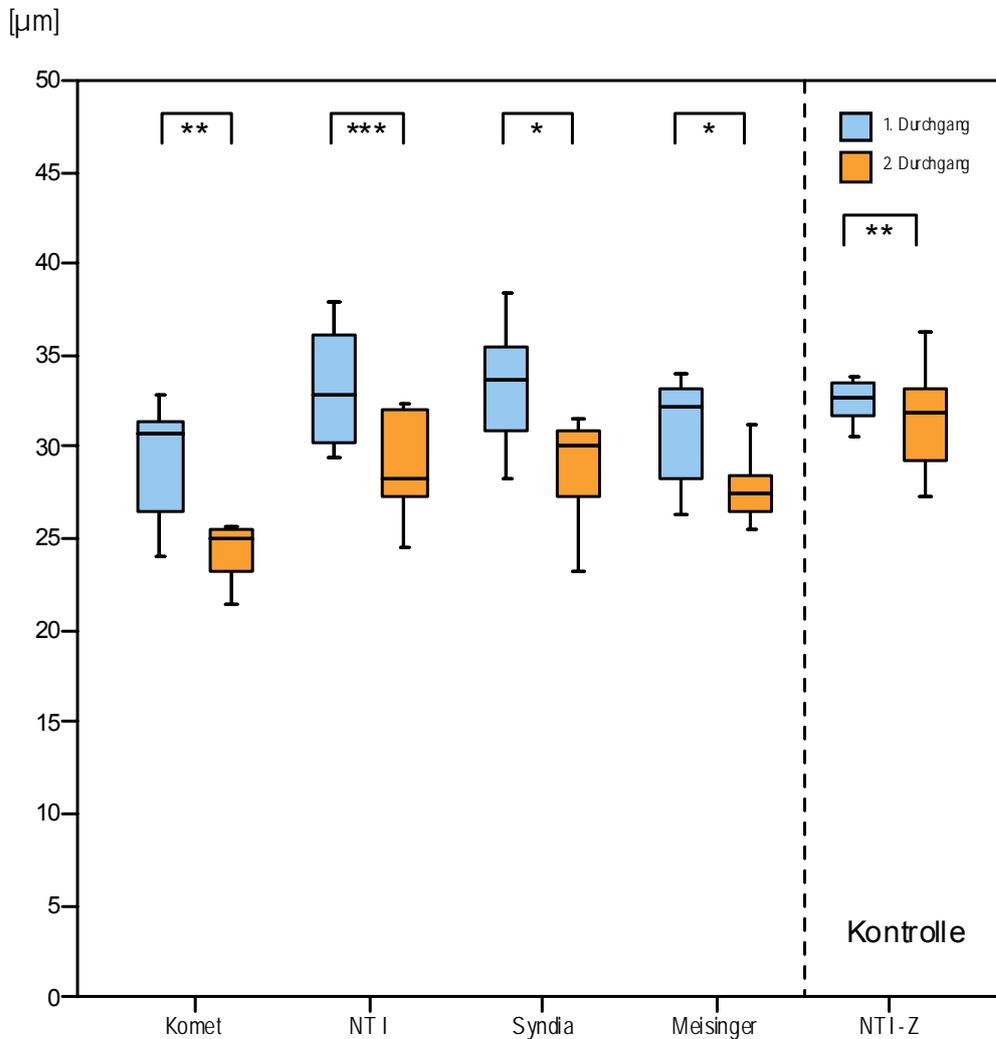


Abb. 12: Vergleich der gemittelten Rautiefe R_z der Keramikoberflächen nach Beschleifen mit den konventionellen Diamantschleifern und den Zirkondioxidkeramik- Diamanten als Kontrollgruppe mit 1,4 mm Durchmesser. (* $p < 0,05$; ** $p < 0,01$, *** $p < 0,001$)

	Komet	NTI	Syndia	Meisinger	NTI-Z
Komet	/	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
NTI	n.s.	/	n.s.	n.s.	n.s.
Syndia	n.s.	n.s.	/	n.s.	n.s.
Meisinger	n.s.	n.s.	n.s.	/	n.s.
NTI-Z	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	/
2.Durchgang					
Komet	/	n.s.	n.s.	n.s.	**
NTI	n.s.	/	n.s.	n.s.	n.s.
Syndia	n.s.	n.s.	/	n.s.	n.s.
Meisinger	n.s.	n.s.	n.s.	/	n.s.
NTI-Z	**	n.s.	n.s.	n.s.	/

Tab. 6: Vergleich der gemittelten Rautiefe R_z zwischen Diamantschleifern mit 1,4 mm Schleifkörperdurchmesser im 1.Durchgang/ 2. Durchgang (** $p < 0,01$; n.s.= nicht signifikant, $p > 0,05$)

In den folgenden REM- Aufnahmen sind die Oberflächen der verschiedenen Diamantschleifer mit 100 µm Körnung und die bearbeiteten Oberflächen der Zirkondioxidkeramik dargestellt. Die REM-Bilder gliedern sich in:

1. unbenutzte Diamantschleifer
2. einmal benutzte Diamantschleifer
3. zweimal benutzte Diamantschleifer
4. Zirkondioxidkeramikoberfläche nach einem Schleifdurchgang
5. Zirkondioxidkeramikoberfläche nach zwei Schleifdurchgängen

Bei den REM- Aufnahmen der Oberflächen der **unbenutzten Diamantschleifer** in der Abb. 13-17 sind die großen scharfkantigen Diamantkörner, die von Bindemittel umgeben sind, zu erkennen. Bei den *NTI-Kahla* Diamantschleifer in Abb. 14a/b ist die Dichte der Körner höher und die Diamantkörner ragen höher aus dem Bindemittel heraus als bei den anderen Diamantschleifern. Bei den *Syndia* Diamantschleifer in Abb. 16a/b sind wenige Diamantkörner zu erkennen, die von sehr viel Bindemittel umgeben sind. Einige Stellen deuten auf bereits heraus gebrochene Diamantkörner hin. Bei der *Kontrollgruppe* von *NTI-Kahla* Diamantschleifer in Abb. 17a/b sind sehr große scharfkantige und grobe Diamantkörner zu erkennen, die sehr stark aus dem Bindemittel heraus ragen.

Die REM- Bilder der **einmal benutzten Diamantschleifer** deuten auf deutliche Veränderungen im Vergleich zu den unbenutzten hin. Bei der Darstellung der *Komet* Diamantschleifer in Abb.18a/b sind die Diamantkörner tief im Bindemittel eingebettet. Sie sind leicht abgerundet und haben an Höhe verloren. Bei den *NTI-Kahla* und *Meisinger* Diamantschleifer in Abb. 19a/b und 21a/b ist ein großer Verschleiß zu erkennen. Heraus gebrochene Stellen und mehr Bindemittel sind zu sehen. Die Diamantkörner haben an Höhe und an Scharfkantigkeit verloren. Bei der *Kontrollgruppe* von *NTI-Kahla* in Abb. 22a/b sind große scharfkantige Diamantkörner zu erkennen, deren die Abnutzung gering ist. Es sind keine heraus gebrochenen Stellen zu sehen.

In den Abbildungen 23-27 werden die REM- Aufnahmen der **zweimal benutzten Diamantschleifer** dargestellt. Die Abnutzung der Diamantschleifer hat zugenommen, was dadurch zum Ausdruck kommt, dass die Diamantkörner an Größe verloren haben und flacher und abgerundeter geworden sind. Dabei sind mehr heraus gebrochene Stellen zu erkennen und mehr Bindemittel umgibt die

Diamantkörner. Bei den *Komet* Diamantschleifer in Abb. 23a/b ist die Dichte der Diamantkörner relativ hoch im Vergleich zu den übrigen Gruppen. Bei der *NTI-Kahla Kontrollgruppe* in Abb. 27a/b haben die Diamantkörner auch an Größe und Höhe verloren, sind stärker abgerundet, aber es sind keine heraus gebrochenen Stellen zu erkennen. Diese Gruppe zeigte insgesamt den geringsten Verschleiß.

Bei den REM- Aufnahmen der **Oberflächen der Zirkondioxidkeramik nach einem Schleifdurchgang** in Abb. 28-32 sind deutliche Abnutzungsspuren in Form von tiefen Rillen, Krypten und Furchen zu sehen.

Nach Bearbeitung durch *Komet* und *NTI-Kahla* Diamantschleifer in Abb. 28a/b und 29a/b sind gleichmäßige Furchen mit Keramikabsprengungen (Splitter) und scharfkantige Erhebungen zu erkennen. Nach Bearbeitung durch *Syndia* Diamantschleifer in Abb. 30a/b sind feine parallele Riefen zu sehen. Seitlich im Bild sind vereinzelt scharfkantige Erhebungen, wie auch Krypten erkennbar. Keramikabsprengungen (Splitter) sind auf der Oberfläche der Keramik zu finden. Nach Bearbeitung durch *Meisinger* Diamantschleifer in Abb. 31a/b sind feine Riefen im linken Teil der Aufnahme und große scharfkantige Erhebungen umgeben von Krypten im rechten Teil der Aufnahme zu sehen. Nach Bearbeitung durch die *NTI-Kahla Kontrollgruppe* sind parallel angeordnete Riefen mit starken Furchen und großen scharfkantigen Erhebungen sowie Krypten zu erkennen. Es ist eine stärkere Zerklüftung als bei den übrigen Gruppen zu sehen.

Die REM-Aufnahmen der **Oberflächen der Zirkondioxidkeramik nach zwei Schleifdurchgängen** sind in Abb. 33-37 dargestellt.

Nach Bearbeitung durch *Komet* Diamantschleifer in Abb. 33a/b sind gleichmäßige, parallele Rillen und leichte Erhebungen mit Keramikabsprengungen (Splitter) zu erkennen. Die Rillen sind feiner als nach einmaligem Schleifen. Nach Bearbeitung durch *NTI-Kahla* Diamantschleifer in Abb. 34a/b sind große Furchen und Krypten zu erkennen. Die Oberfläche ist sehr uneben. Sehr große scharfkantige Längsrillen und Risse überwiegen im Bild. Die Oberfläche ist gröber als nach einmaligem Schleifen. Nach Bearbeitung durch *Syndia* und *Meisinger* Diamantschleifer in Abb. 35a/b und 36a/b sind feinere Längsrillen mit geringer Unregelmäßigkeit zu erkennen. Keramikabsprengungen (Splitter) sind im Bild zu sehen, ähnlich wie bei einmaligem Schleifen in Abb. 30a/b. Nach Bearbeitung durch *NTI-Kahla Kontrollgruppe* sind parallel angeordnete feine Längsrillen zu

sehen. Leichte Erhebungen durchziehen das Bild. Die Oberfläche hat eine feinere Struktur als nach einmaligem Schleifen.

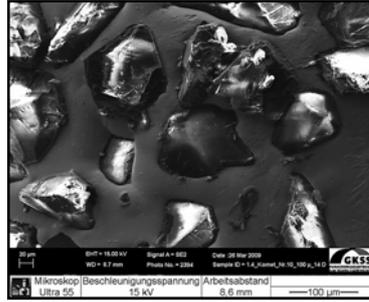
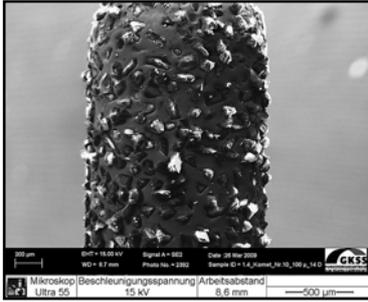


Abb. 13 a/b:
Komet- Diamantschleifer

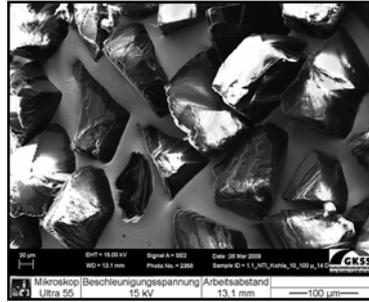
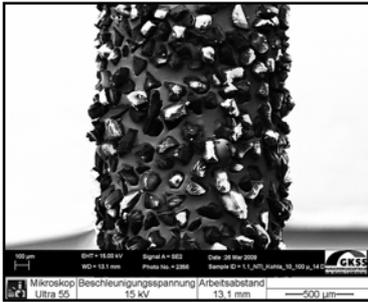


Abb. 14 a/b:
NTI-Kahla-Diamantschleifer

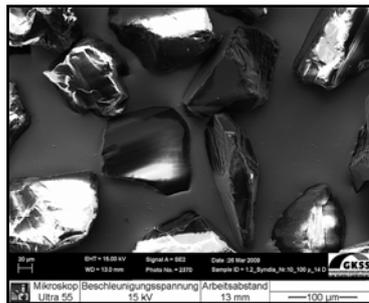
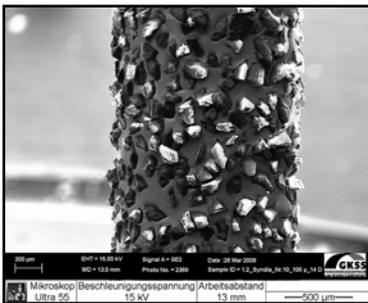


Abb. 15 a/b:
Syndia-Diamantschleifer

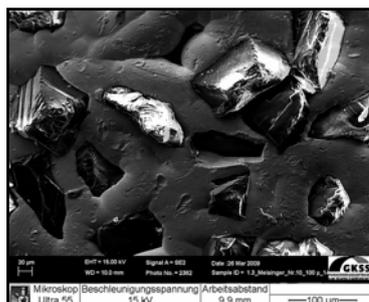
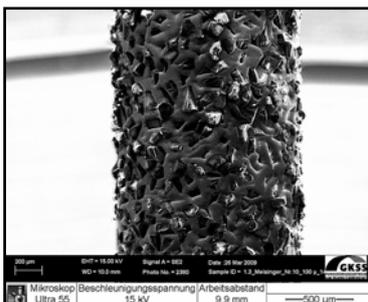


Abb. 16 a/b:
Meisinger-Diamantschleifer

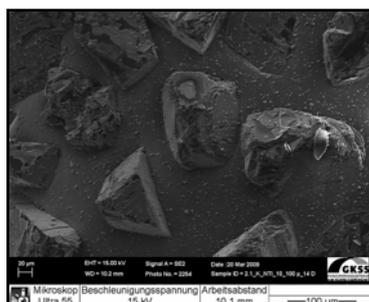
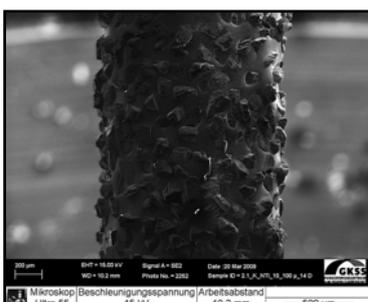


Abb. 17 a/b:
NTI-Kahla-Keramikschleifer
(Kontrollgruppe)

Abb. 13-17: Darstellung der Oberflächen der unbenutzten Diamantschleifer mit jeweils 1,4 mm Durchmesser und 100 μm Körnung. (Maßstab a= 500μm/ b= 100μm)

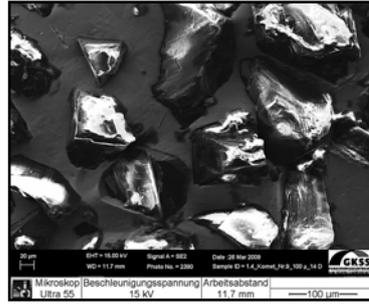
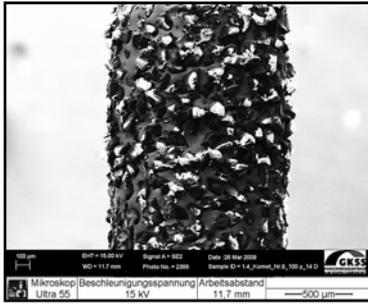


Abb. 18 a/b:
Komet-Diamantschleifer

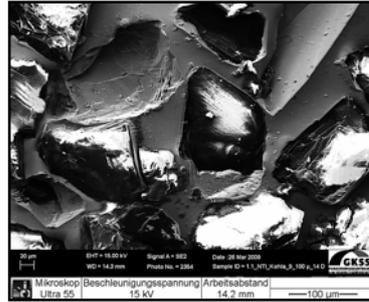
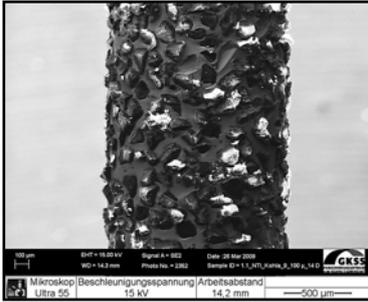


Abb. 19 a/b:
NTI-Kahla-Diamantschleifer

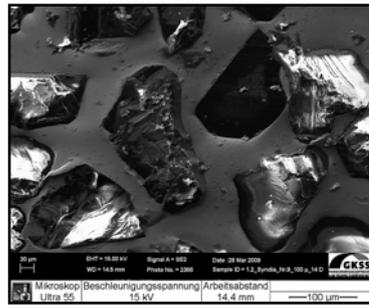
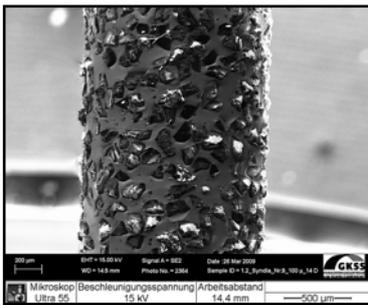


Abb. 20 a/b:
Syndia-Diamantschleifer

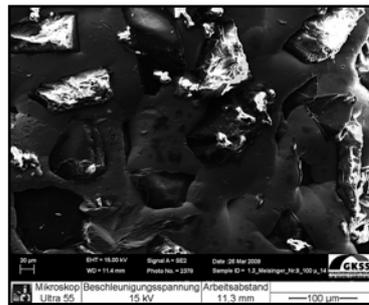
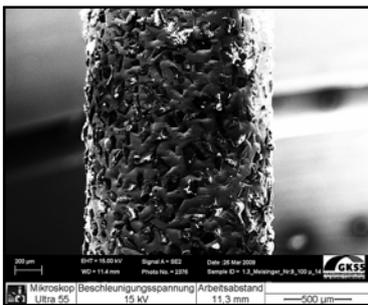


Abb. 21 a/b:
Meisinger-Diamantschleifer

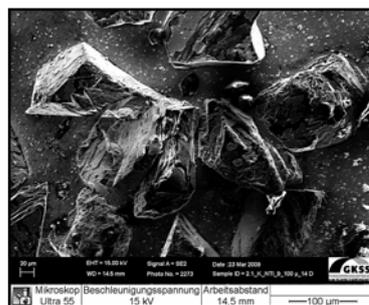
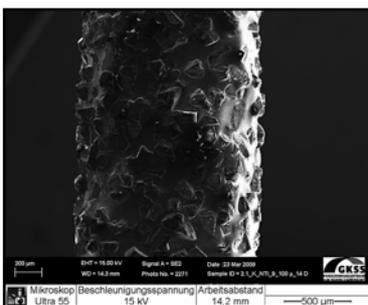


Abb. 22 a/b:
NTI-Kahla-Keramikschleifer
(Kontrollgruppe)

Abb. 18-22: Darstellung der Oberflächen der einmal benutzten Diamantschleifer mit 1,4 mm Durchmesser und 100 μm Körnung. (Maßstab a= 500 μm/ b= 100 μm)

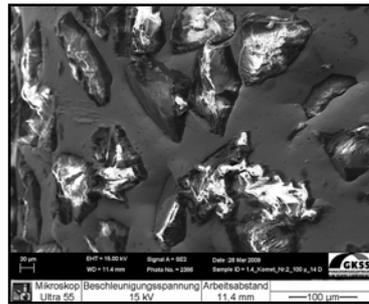
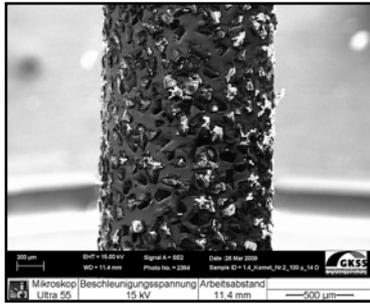


Abb. 23 a/b:
Komet-Diamantschleifer

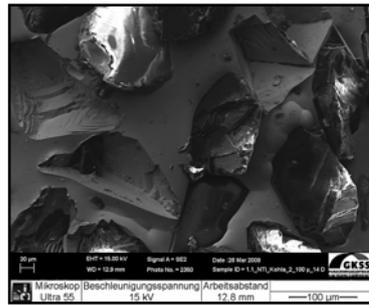
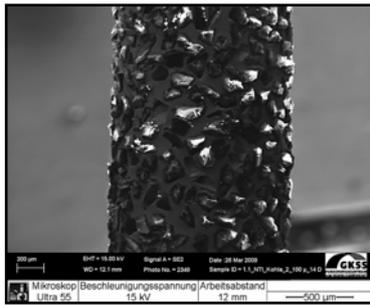


Abb. 24 a/b:
NTI-Kahla-Diamantschleifer

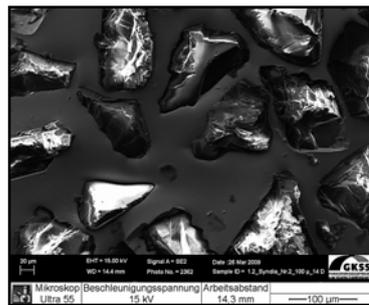
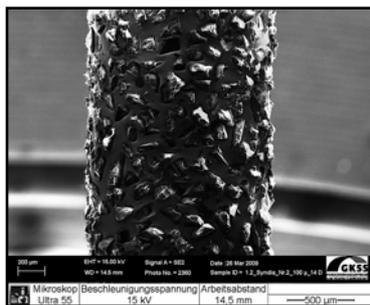


Abb. 25 a/b:
Syndia-Diamantschleifer

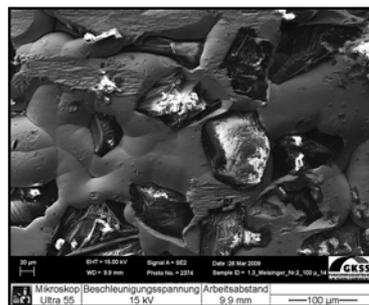
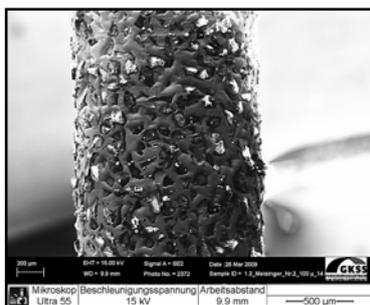


Abb. 26 a/b:
Meisinger-Diamantschleifer

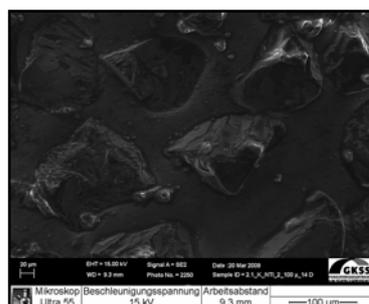
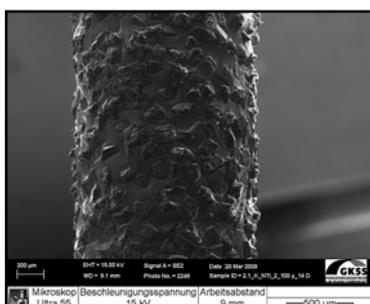


Abb. 27 a/b:
NTI-Kahla-Keramikschleifer
(Kontrollgruppe)

Abb. 23-27: Darstellung der Oberflächen der zweimal benutzten Diamantschleifer mit 1.4 mm Durchmesser und 100 μm Körnung. (Maßstab a= 500 μm/ b= 100 μm)

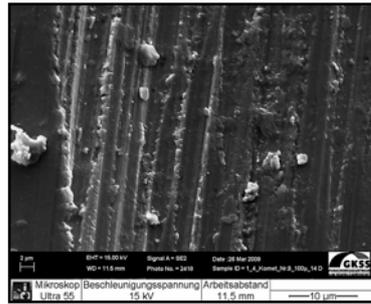
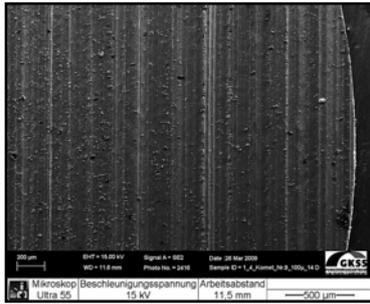


Abb. 28 a/b:
Zirkondioxidkeramik-
Oberfläche nach Schleifgang
mit Komet- Diamantschleifer

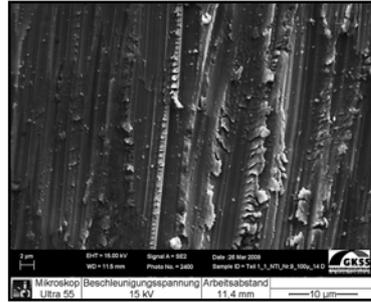
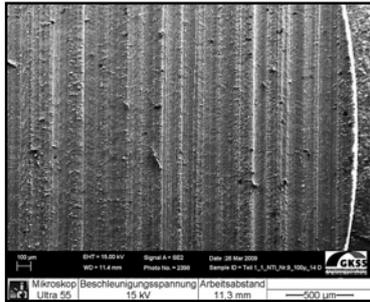


Abb. 29 a/b:
Zirkondioxidkeramik-
Oberfläche nach Schleifgang
mit NTI-Kahla-
Diamantschleifer

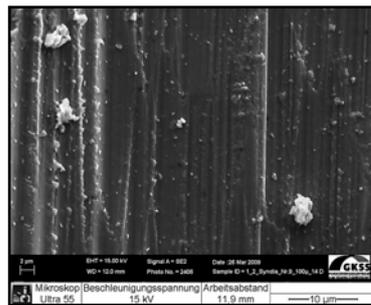
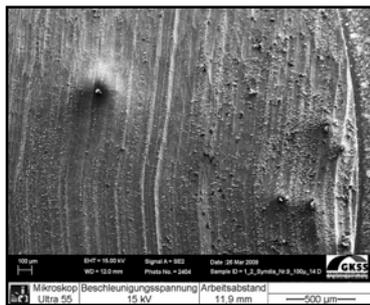


Abb.30 a/b:
Zirkondioxidkeramik-
Oberfläche nach Schleifgang
mit Syndia-Diamantschleifer

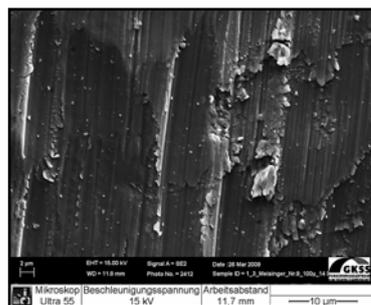
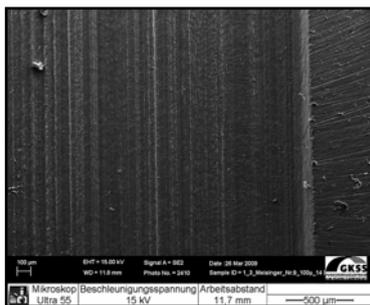


Abb.31 a/b:
Zirkondioxidkeramik-
Oberfläche nach Schleifgang
mit Meisinger-
Diamantschleifer

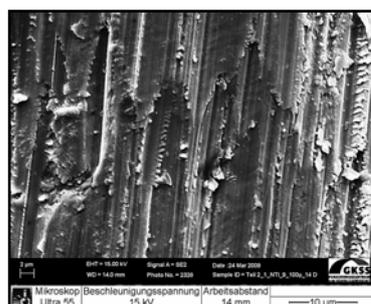
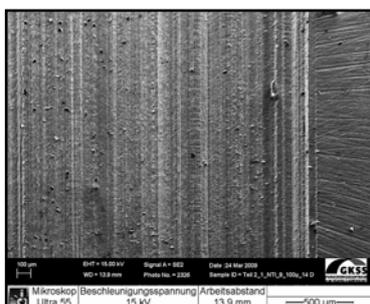


Abb.32 a/b:
Zirkondioxidkeramik-
Oberfläche nach Schleifgang
mit NTI-Kahla-
Keramikschleifer
(Kontrollgruppe)

Abb. 28-32: Darstellung der Oberflächen der Zirkondioxidkeramik nach einem Schleifdurchgang mit den verschiedenen Diamantschleifern mit jeweils 1,4 mm Durchmesser und 100 µm Körnung. (Maßstab a= 500 µm/ b= 10 µm)

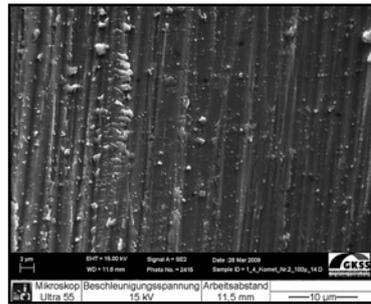
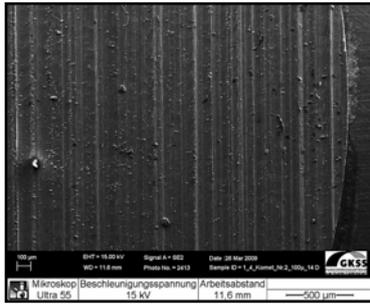


Abb. 33 a/b:
Zirkondioxidkeramik-
Oberfläche nach Schleifgang
mit Komet-Diamantschleifer

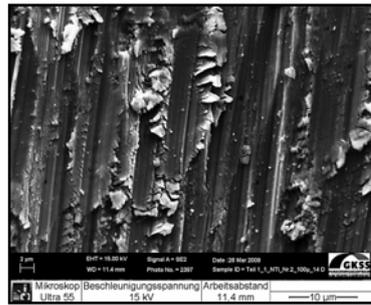
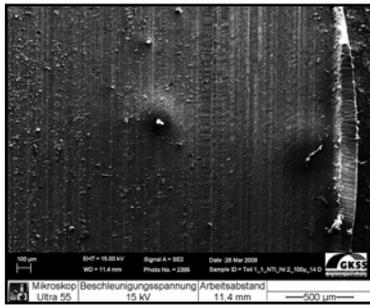


Abb. 34 a/b:
Zirkondioxidkeramik-
Oberfläche nach Schleifgang
mit NTI-Kahla-
Diamantschleifer

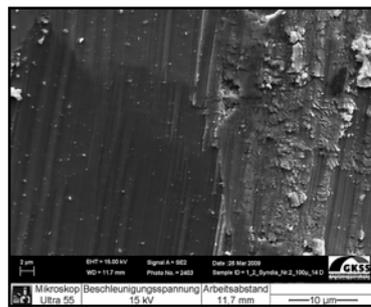
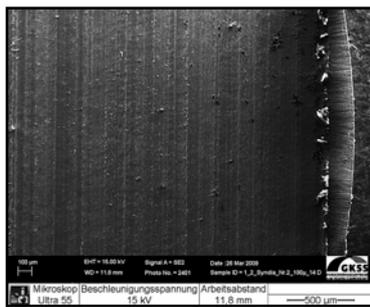


Abb. 35 a/b:
Zirkondioxidkeramik-
Oberfläche nach Schleifgang
mit Syndia-Diamantschleifer

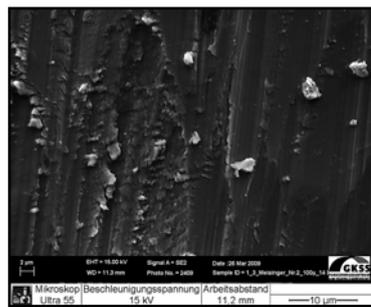
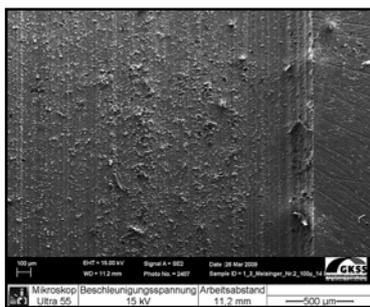


Abb. 36 a/b:
Zirkondioxidkeramik-
Oberfläche nach Schleifgang
mit Meisinger-
Diamantschleifer

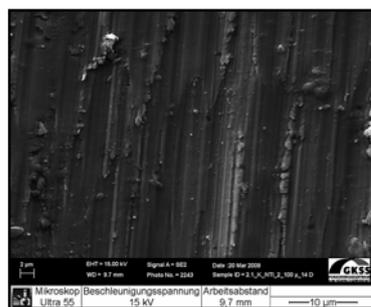
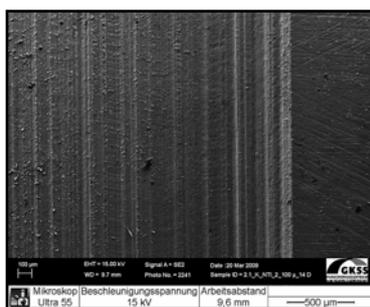


Abb. 37 a/b:
Zirkondioxidkeramik-
Oberfläche nach Schleifgang
mit NTI-Kahla-
Keramikschleifer
(Kontrollgruppe)

Abb. 33-37: Darstellung der Oberflächen der Zirkondioxidkeramik nach zwei Schleifdurchgängen mit Diamantschleifern verschiedener Hersteller mit jeweils 1,4 mm 100 µm Körnung. (Maßstab a= 500 µm/ b= 10 µm).

5.3 Vergleich der Zirkondioxidkeramik-Diamantschleifer mit unterschiedlichen Durchmessern und verschiedenen Körnungen.

Die Keramikscheifkörper mit einem Durchmesser von 1,6 mm benötigten im Vergleich zu den Schleifkörpern mit einem Durchmesser von 1,4 mm weniger Zeit zum oberflächlichen Substanzabtrag unabhängig von der Größe der Körnung (Abb. 38). Die gemessenen Zeiten für die Schleifkörper mit der geringeren Körnung von 70 μm lagen hierbei jedoch in beiden Durchgängen signifikant über den ermittelten Zeiten für die Schleifkörper mit 100 μm Körnung. Im Vergleich der verschiedenen Durchmesser zeigte sich, dass sich Diamantschleifer mit 100 μm im 1. Durchgang niedrig signifikant, im 2. Durchgang nicht signifikant, sowie bei 70 μm Körnung sowohl im 1. als auch 2. Durchgang hochsignifikant unterschieden (Tab.7).

Im Vergleich der verschiedenen Körnungen waren Diamantschleifer mit 70 μm gegenüber 100 μm Körnung bei beiden Durchmessern und beiden Durchgängen hochsignifikant langsamer.

Im Vergleich der Durchgänge bestanden bei 100 μm gekörnten Diamantschleifern bei beiden Durchmessern signifikante Unterschiede, sowie bei 70 μm gekörnten Diamantschleifern bei beiden Durchmessern hochsignifikante Unterschiede.

[sec]

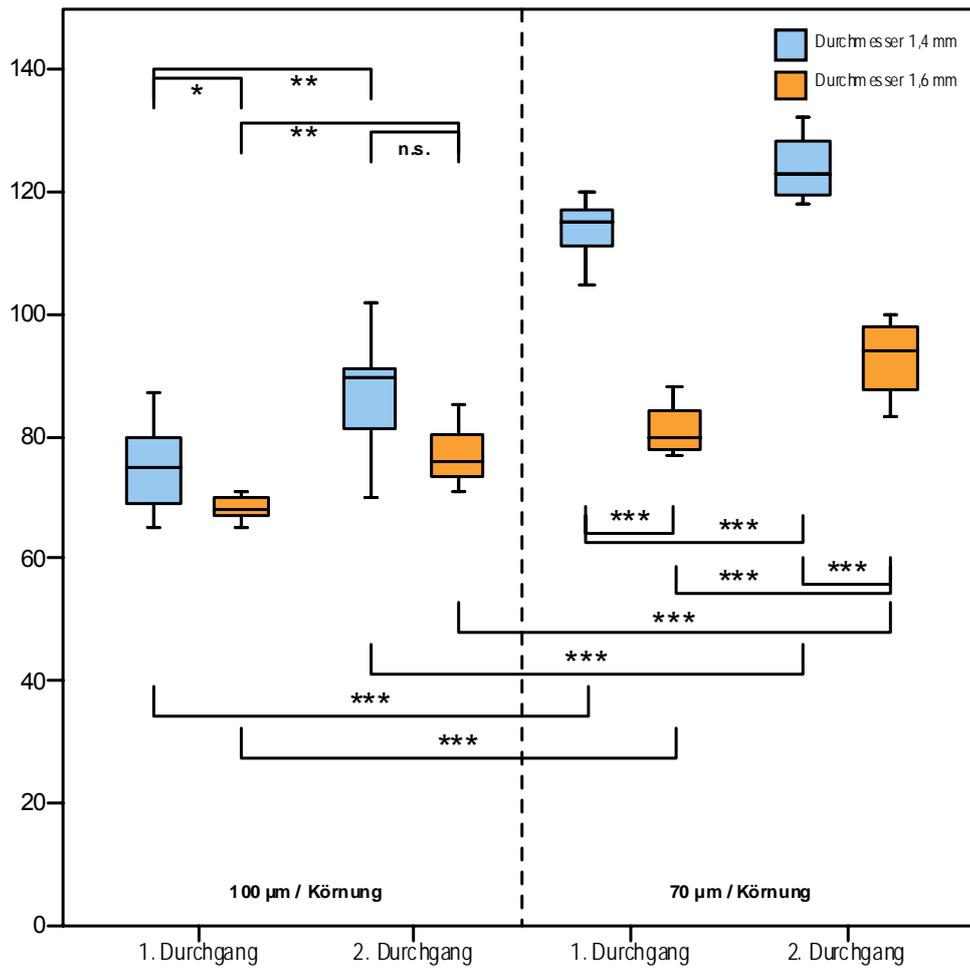


Abb. 38: Darstellung der verschiedenen speziell für Zirkondioxidkeramik hergestellten Schleifkörper mit einem Durchmesser von 1,4 mm und 1,6 mm, sowie einer Körnung von 70 µm und 100 µm in Abhängigkeit von der Zeit, welche sie benötigten, um einen oberflächlichen Abtrag von 0,2 mm zu erzielen. (*p< 0,05; **p< 0,01; ***p< 0,001; n.s.= nicht signifikant, p>0,05)

Zeit (Sek.)

		1,4mm	1,6mm
100µm, 1. Durchgang	100µm,2.Durchgang	**	**
70µm, 1.Durchgang	70µm,2.Durchgang	***	***
100µm, 1. Durchgang	70µm, 1.Durchgang	***	***
100µm,2.Durchgang	70µm,2.Durchgang	***	***

Tab. 7: Vergleich der Beschleifzeiten der Keramikscheifer in Abhängigkeit von Durchgang, Körnung und Durchmesser (**p< 0,01; ***p< 0,001)

Die Mittenrauigkeit R_A der Zirkondioxidkeramik betrug nach Bearbeitung mit Keramikscheifern mit 100 μm Körnung durchschnittlich 6 μm und bei 70 μm Körnung durchschnittlich 2 μm unabhängig vom Diamantdurchmesser (Abb.39). Die Schleifkörper mit 100 μm Körnung hatten unabhängig vom Durchmesser des Schleifkörpers und dem Durchgang eine hochsignifikant höhere Mittenrauigkeit, als die Schleifkörper mit der 70 μm Körnung (Tab.8). Innerhalb der Körnung bestanden zwischen den Durchmessern keine signifikanten Unterschiede in der Mittenrauigkeit. Allerdings fielen niedrig signifikante Unterschiede zwischen dem 1. und 2. Durchgang bei Schleifen mit 1,4 mm Durchmesser und signifikante Unterschiede bei Schleifern mit 1,6 mm Durchmesser unabhängig von der Körnung auf.

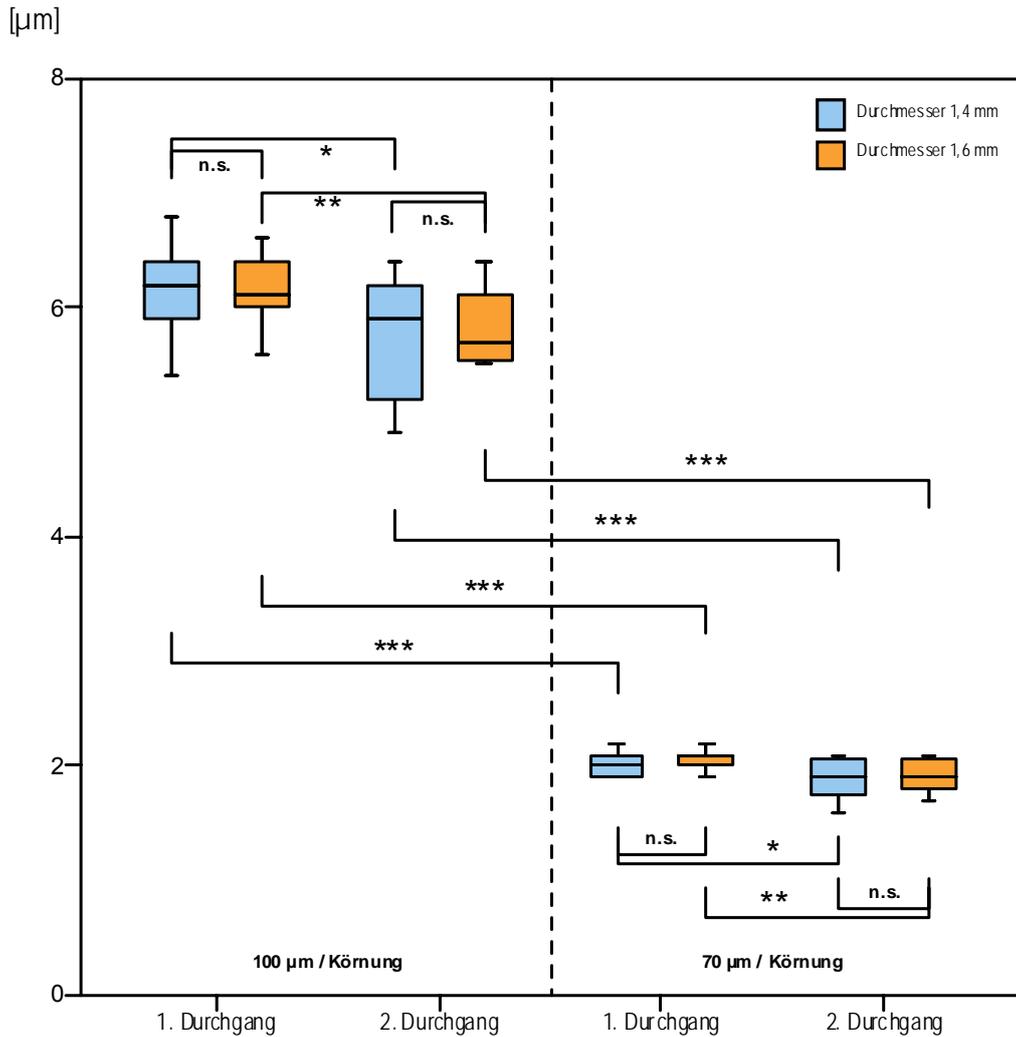


Abb. 39: Darstellung der Mittenrauigkeit R_A , die die Schleifkörper für Zirkondioxidkeramik mit einem Durchmesser von 1,4 mm und einer Körnung von 100 μm und 70 μm auf der Keramik hinterließen. (* $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$; n.s.= nicht signifikant, $p > 0,05$).

RA

		1,4mm	1,6mm
100 μm , 1. Durchgang	100 μm ,2.Durchgang	*	**
70 μm , 1.Durchgang	70 μm ,2.Durchgang	*	**
100 μm , 1. Durchgang	70 μm , 1.Durchgang	***	***
100 μm ,2.Durchgang	70 μm ,2.Durchgang	***	***

Tab.8: Vergleich der Mittenrauigkeit R_A der Keramikscheifer in Abhängigkeit von Durchgang, Körnung und Durchmesser (* $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$)

Die Rauigkeitskenngröße Zehnpunktehöhe R_z der Zirkondioxidkeramikoberfläche betrug nach Beschleifen mit dem Keramik- Diamantschleifkörper mit 100 μm Körnung durchschnittlich 33 μm und mit 70 μm Körnung durchschnittlich 12 μm (Abb.40). Die Schleifkörper mit 100 μm Körnung hatten unabhängig vom Durchmesser des Schleifkörpers und dem Durchgang eine hochsignifikant höhere gemittelte Rautiefe, als die Schleifkörper mit 70 μm Körnung (Tab.9). Innerhalb der Körnungen bestanden zwischen den Durchmessern keine signifikanten Unterschiede in der gemittelten Rautiefe. Allerdings unterschieden sich die Durchgänge bei Diamantschleifern mit 1,6 mm Durchmesser und 100 μm Körnung, sowie 1,4 mm Durchmesser und 70 μm Körnung niedrig signifikant.

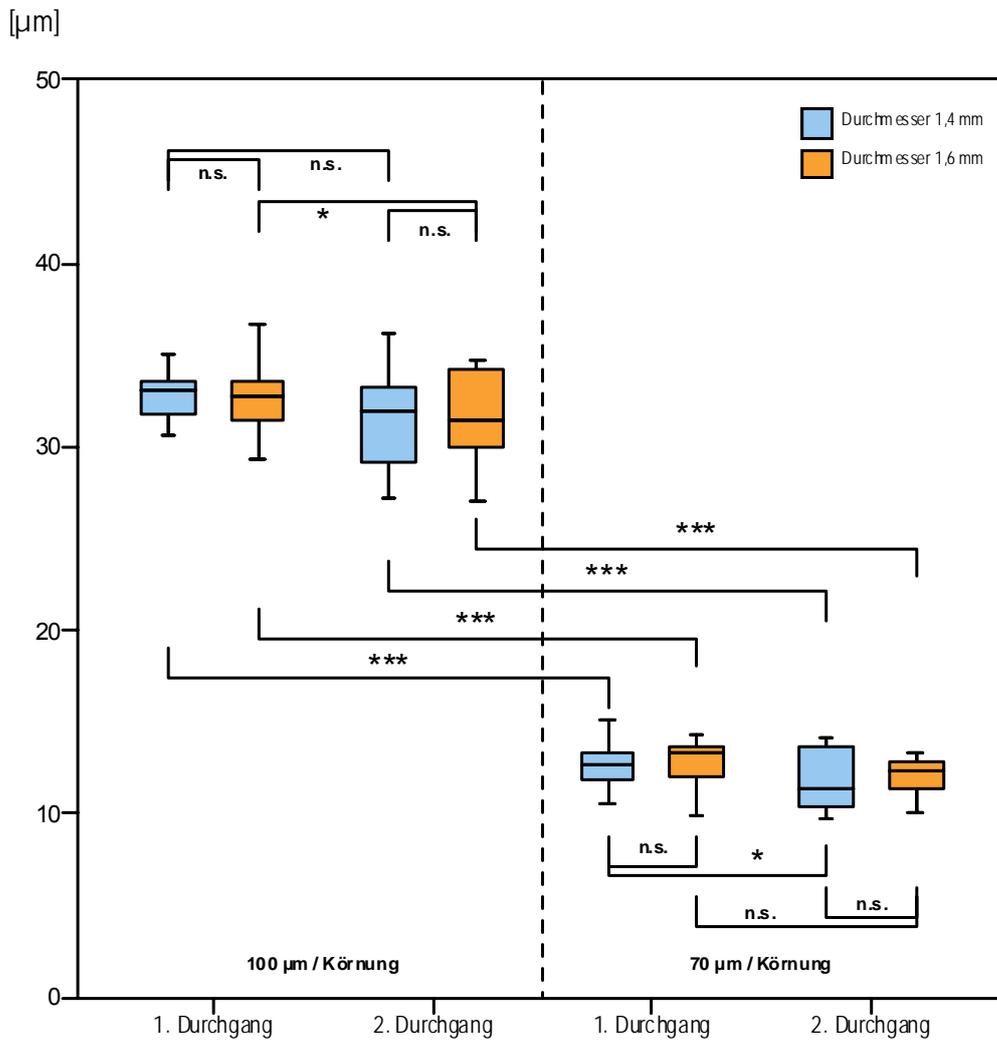


Abb. 40: Darstellung der gemittelten Rautiefe R_z , die die Schleifkörper für Zirkondioxidkeramik mit einem Durchmesser von 1,4 mm und 1,6 mm und einer Körnung von 100 μm und 70 μm auf der Keramik hinterließen. (* $p < 0,05$; *** $p < 0,001$; n.s.= nicht signifikant, $p > 0,05$).

RZ

		1,4mm	1,6mm
100 μm , 1. Durchgang	100 μm ,2.Durchgang	n.s.	*
70 μm , 1.Durchgang	70 μm ,2.Durchgang	*	n.s.
100 μm , 1. Durchgang	70 μm , 1.Durchgang	***	***
100 μm ,2.Durchgang	70 μm ,2.Durchgang	***	***

Tab. 9: Vergleich der gemittelten Rautiefe R_z der Keramikschleifer in Abhängigkeit von Durchgang, Körnung und Durchmesser (* $p < 0,05$; *** $p < 0,001$; n.s.= nicht signifikant, $p > 0,05$)

5.4 Vergleich verschiedener Körnungen der speziellen Zirkondioxid-keramik- Schleifkörper mit einem Durchmesser von 1,6 mm.

Die Beschleifzeiten mit Keramikdiamanten lagen für solche mit 100 µm Körnung bei 70 Sek., mit 70 µm Körnung bei 80 Sek. und mit 40 µm Körnung bei 90 Sek. (Abb. 41). Die Schleifkörper von Komet mit einem Durchmesser von 1,6 mm und 100 µm Körnung benötigten die geringste Zeit im ersten sowie zweiten Durchgang. Sie lagen hochsignifikant unter den Zeiten mit 70 µm und 40 µm Körnung in beiden Durchgängen (Tab.10). Auffällig war, dass die gemessenen Zeiten im zweiten Durchgang bei den Schleifkörpern mit 100 µm und 70 µm signifikant, sowie bei 40 µm niedrig signifikant höher waren. Die Beschleifzeiten vom ersten, sowie vom zweiten Durchgang mit 70 µm Körnung unterschieden sich nicht signifikant von denen mit 40 µm Körnung.

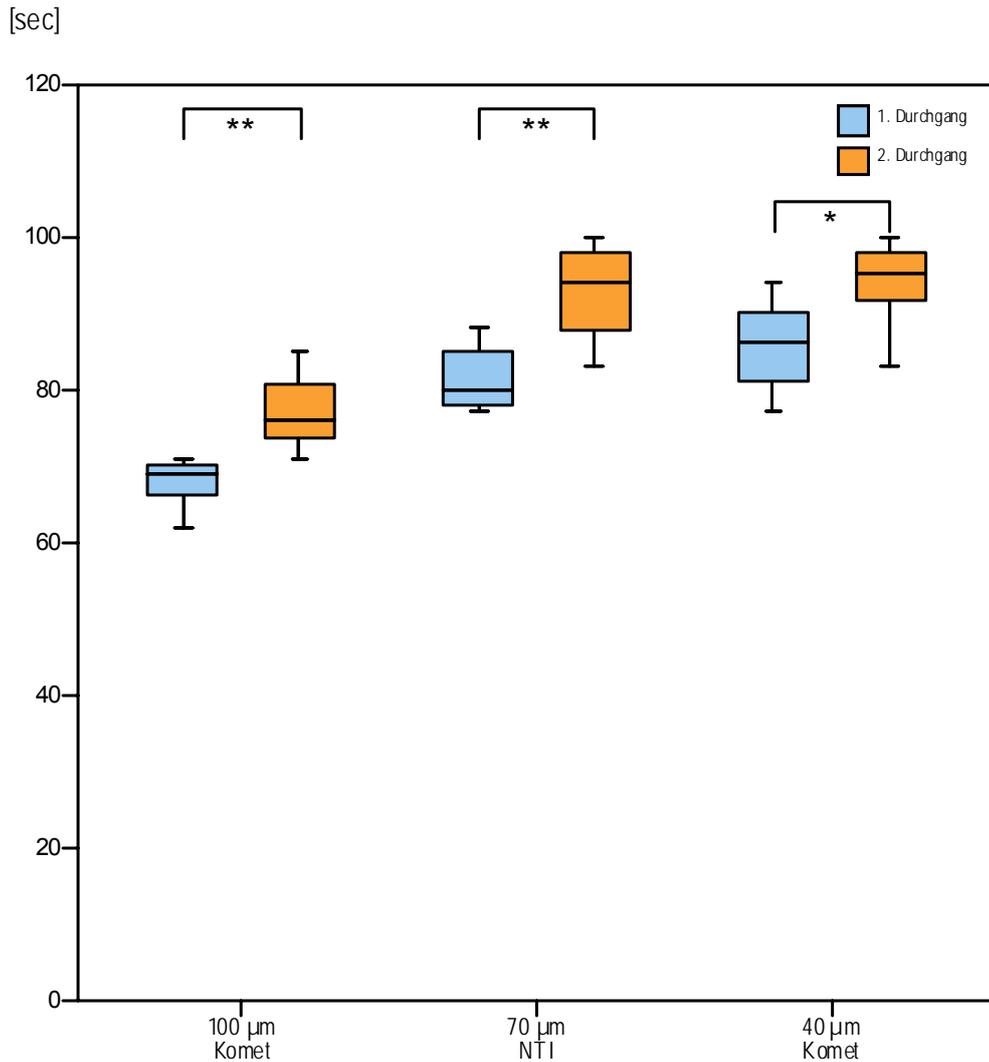


Abb. 41: Darstellung der verschiedenen speziell für Zirkondioxidkeramik hergestellten Schleifkörper mit einem Durchmesser von 1,6 mm und unterschiedlicher Körnung in Abhängigkeit von der Zeit, welche sie benötigten, um einen oberflächlichen Abtrag von 0,2 mm zu erzielen. (*p< 0,05; **p< 0,01)

1,6 mm Durchmesser, Zeit

1.Durchgang

	100µm	70µm	40µm
100µm	/	***	***
70µm	***	/	n.s.
40µm	***	n.s.	/

2.Durchgang

	100µm	70µm	40µm
100µm	/	***	***
70µm	***	/	n.s.
40µm	***	n.s.	/

Tab. 10: Vergleich der Beschleifzeiten der Keramiksleifer in Abhängigkeit von Durchgang, Körnung und Durchmesser (***p< 0,001; n.s.= nicht signifikant, p>0,05)

Die Schleifkörper mit 100 µm Körnung erzeugten unabhängig vom Durchgang eine hochsignifikant höhere Mittenrauigkeit von durchschnittlich 6 µm, als die Schleifkörper mit der feineren Körnung von 70 µm und 40 µm mit durchschnittlich 1 bis 2 µm (Abb. 42, Tab. 11). Zwischen den Ergebnissen mit 40 µm bzw. 70 µm gekörnten Diamantschleifkörpern bestanden ebenfalls hochsignifikante Differenzen. Innerhalb der jeweiligen Versuchsgruppen wurden zwischen den ersten und zweiten Durchgang signifikante Unterschiede für 100 µm und 70 µm Körnung sowie niedrig signifikante Unterschiede für 40 µm Körnung gemessen. Beim zweiten Durchgang war unabhängig von der Körnung die Mittenrauigkeit geringer.

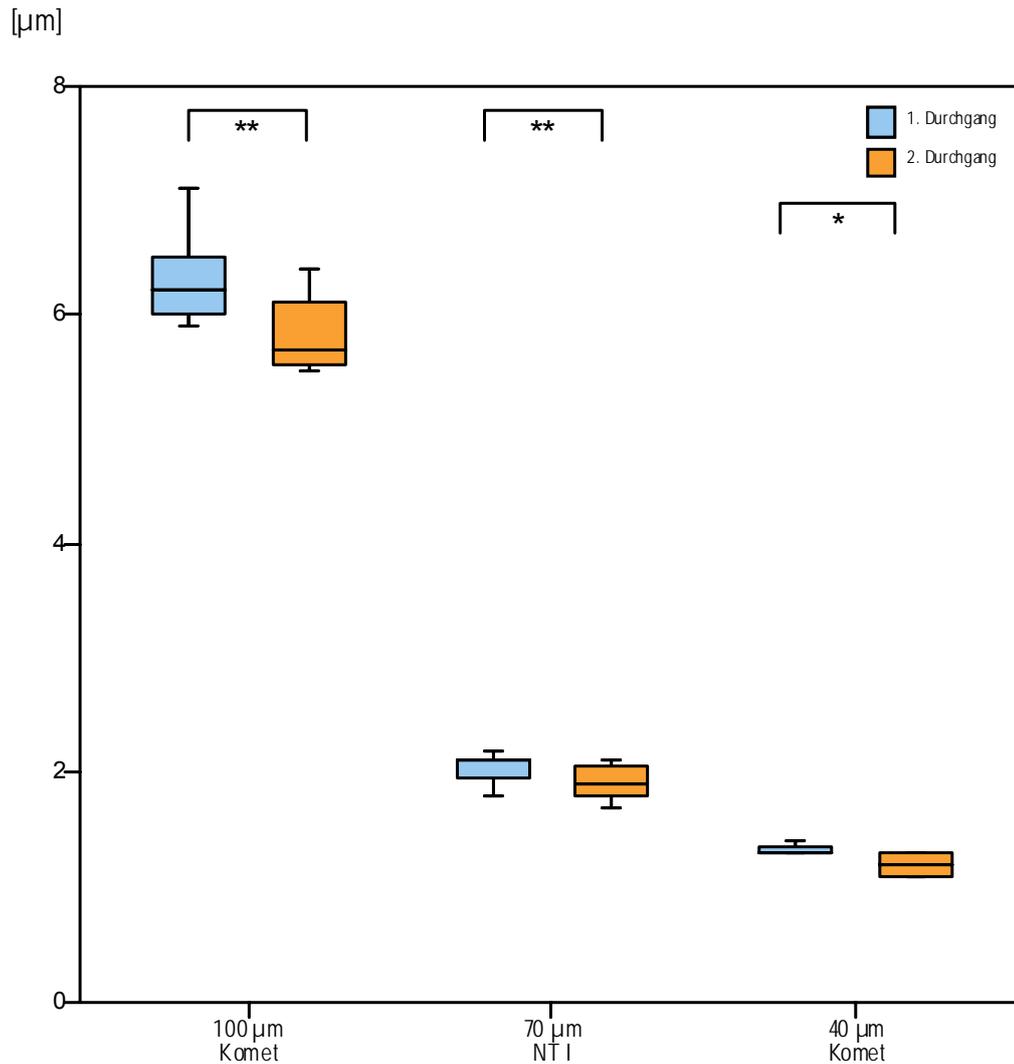


Abb. 42: Darstellung der Mittenrauigkeit R_A auf der Keramikoberfläche nach den Beschleifen mit Schleifkörpern für Zirkondioxidkeramik mit einem Durchmesser von 1,6 mm und Körnungen von 100 μm , 70 μm und 40 μm . (* $p < 0,05$; ** $p < 0,01$)

1,6 mm Durchmesser, R_A

1.Durchgang

	100 μm	70 μm	40 μm
100 μm	/	***	***
70 μm	***	/	***
40 μm	***	***	/

2.Durchgang

100 μm	/	***	***
70 μm	***	/	***
40 μm	***	***	/

Tab. 11: Vergleich der Mittenrauigkeit R_A der Keramikscheifer in Abhängigkeit von Durchgang, Körnung und Durchmesser (*** $p < 0,001$)

Die Schleifkörper mit 100 μm Körnung führten unabhängig vom Durchgang zu einer hochsignifikant höheren gemittelten Rautiefe R_z von durchschnittlich 33 μm , als die Schleifkörper mit der feineren Körnung von 70 μm und 40 μm mit durchschnittlich 9 bis 13 μm Rauigkeit R_z (Abb. 43, Tab.14). Zwischen den Rauigkeiten der Zirkondioxidkeramik, die mit 70 μm und 40 μm Diamantkörnung beschliffen wurde, wurden signifikante Unterschiede festgestellt.

Innerhalb der jeweiligen Versuchsgruppen bestanden zwischen dem ersten und zweiten Durchgang signifikanten Unterschiede in der gemittelten Rautiefe für 100 μm und 40 μm Körnung sowie niedrig signifikante Unterschiede für 70 μm Körnung. Der zweite Durchgang hatte unabhängig von der Körnung eine geringere gemittelte Rautiefe.

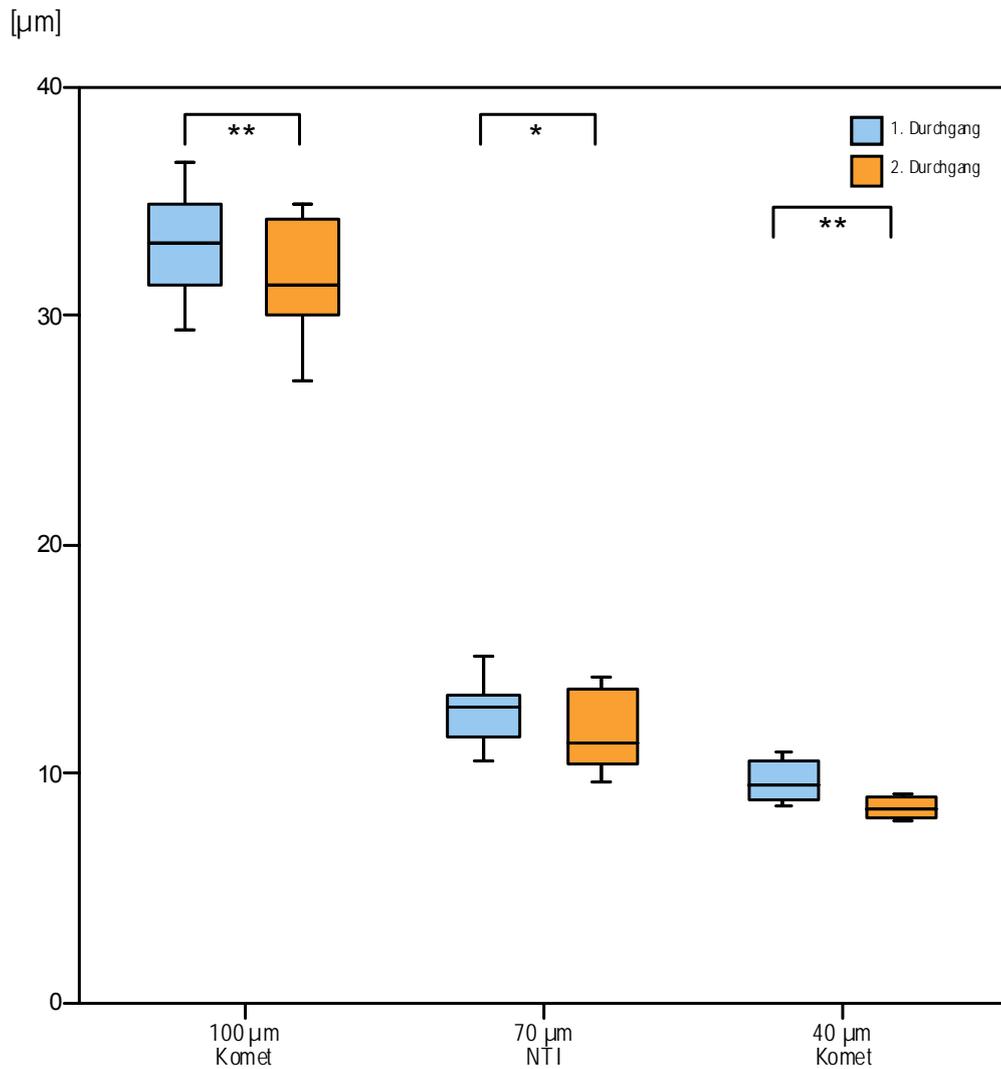


Abb. 43: Darstellung der gemittelten Rautiefe R_z auf der Keramikoberfläche nach Beschleifen mit Schleifkörpern für Zirkondioxidkeramik mit einem Durchmesser von 1,6 mm und unterschiedlicher Körnung von 100 μm , 70 μm und 40 μm . (* $p < 0,05$; ** $p < 0,01$)

1,6 mm Durchmesser, RZ

1.Durchgang

	100 μm	70 μm	40 μm
100 μm	/	***	***
70 μm	***	/	**
40 μm	***	**	/

2.Durchgang

	100 μm	70 μm	40 μm
100 μm	/	***	***
70 μm	***	/	**
40 μm	***	**	/

Tab. 12: Vergleich der gemittelten Rautiefe R_z der Keramikschleifer in Abhängigkeit von Durchgang, Körnung und Durchmesser (** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$)

In dem zweiten Teil der REM- Aufnahmen sind die Oberflächen verschiedener Diamantschleifer mit unterschiedlicher Körnung (100 μm /70 μm /40 μm) und die bearbeiteten Oberflächen der Zirkondioxidkeramik dargestellt. Die REM-Aufnahmen gliedern sich in:

1. unbenutzte Diamantschleifer
2. einmal benutzte Diamantschleifer
3. zweimal benutzte Diamantschleifer
4. Zirkondioxidoberfläche nach einem Schleifdurchgang
5. Zirkondioxidoberfläche nach zwei Schleifdurchgängen

Bei den REM- Aufnahmen der Oberflächen der **unbenutzten Diamantschleifer** in Abb. 44-48 sind unterschiedlich große scharfkantige und abgerundete Diamantschleifer zu erkennen, die von Bindemittel umgeben sind. Dagegen sind bei den REM- Aufnahmen in Abb. 49-53 mit Diamantschleifer unterschiedlicher Körnung (100 μm / 70 μm / 40 μm) **nach einem Schleifdurchgang** die Diamantkörner bereits leicht abgerundet. Es sind keine aber heraus gebrochenen Diamantpartikel aus dem Bindemittel zu sehen, die auf Verschleiß hindeuten würden.

Im Vergleich zwischen dem ersten und zweiten Beschleifdurchgang war eine gewisse Abnutzung zu erkennen, während nach dem ersten Beschleifdurchgang gegenüber den unbenutzten Schleifern keine wesentliche Beeinträchtigung zu sehen waren (Abb. 54-58). Die Schleifkörner waren nach 2- maligem Beschleifen entrundet und kantenfrei, einige Diamantkörner sind heraus gebrochen.

Im Vergleich der 100 μm - gekörnten Keramikschleifer zeigte der *NTI-Kahla* Diamantschleifer große, kantige Diamantkörner, die im Laufe der Untersuchung nicht deutlich verschlissen (Abb.44/ 49/ 54). Die Diamantkörnung des *Komet*-Schleifers war von vornherein weniger kantig und groß und zeigte im Verlauf der Untersuchung eine stärkere Entrundung und Verkleinerung der Diamantkörner, die zum Teil auch herausbrachen (Abb.45/ 50/ 55).

Die 70 μm - gekörnten *NTI-Kahla* Diamantschleifer zeichneten sich in beiden Durchmessern durch kleinere, aber ebenfalls wie bei 100 μm stark kantige Diamantkörner aus. Bereits nach dem ersten Beschleifen waren einige

Diamantkörner heraus gebrochen und nach dem zweiten Beschleifen waren die Diamantkörner deutlich weniger kantig (Abb. 46, 47/ 51, 52/ 56, 57).

Die $40\ \mu\text{m}$ feinkörnigen *Komet-* Keramikscheifer zeigten eine analoge, nur kleinere Schleifkörperform gegenüber den $100\ \mu\text{m}$ *Komet-* Keramikscheifern.

Diese waren dicht im Bindemittel eingebettet. Nach zweimaliger Benutzung begannen die Diamantkörner auszubrechen (Abb. 48/ 53/ 58).

In den Abbildungen 59-63 sind die Oberflächen der Zirkondioxidkeramik nach einem Schleifdurchgang mit Diamantscheifern unterschiedlicher Körnung ($100\ \mu\text{m}$ / $70\ \mu\text{m}$ / $40\ \mu\text{m}$) dargestellt und in den Abbildungen 64- 68 nach zwei Schleifdurchgängen. Nach einem Schleifdurchgang erzeugten die beiden $100\ \mu\text{m}$ -gekörnten Diamantscheifer grobe scharfkantige Furchen und Rillen auf der Keramikoberfläche. Außerdem waren auch teilweise Absplitterungen zu erkennen (Abb. 59/ 60). Dabei war die Struktur mit dem $100\ \mu\text{m}$ *NTI-Kahla-* Keramikscheifer größer, hatte mehr Risse und tiefe Furchen, als mit dem *Komet-* Keramikscheifer gleicher Körnung. Mit den beiden *NTI-Kahla-* Keramikscheifern mit $70\ \mu\text{m}$ Körnung waren die Riefen weniger tief, aber weiterhin scharfkantig und unregelmäßig. Es lagen aber weiterhin Absplitterungen vor (Abb. 61/ 62). Nur mit dem $40\ \mu\text{m}$ - gekörnten *Komet-* Keramikscheifer stellten sich gleichmäßig strukturierte, parallel angeordnete, flache Rillen ohne Absplitterungen dar (Abb. 63).

Nach dem zweiten Schleifdurchgang zeigten alle Keramikscheifer ein gleichmäßigeres Schleifergebnis:

Die Rillentiefe und- form war bei beiden $100\ \mu\text{m}$ Diamantscheifern weniger tief und ungerichtet, es lagen aber weiterhin Absprengungen vor (Abb. 64/ 65). Mit den $70\ \mu\text{m}$ Diamantscheifern (Abb. 66/ 67) wurde eine ähnliche Rillentiefe erzeugt wie mit den $40\ \mu\text{m}$ Diamantscheifern (Abb. 68), wobei bei allen abgeplatze Keramiksplitter beobachtet wurden. Mit den $40\ \mu\text{m}$ Keramikscheifer veränderte sich das Schliffbild am wenigsten zwischen ersten und zweiten Durchgang.

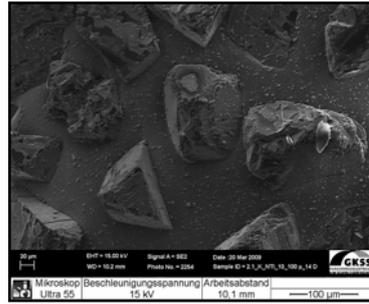
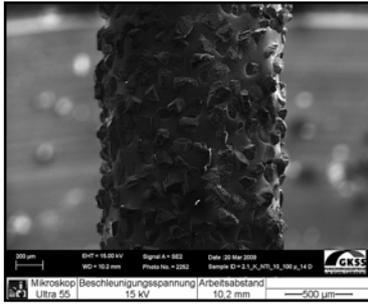


Abb. 44 a/b:
NTI-Kahla-Keramikschleifer
(Ø: 1,4mm; 100µm Körnung)

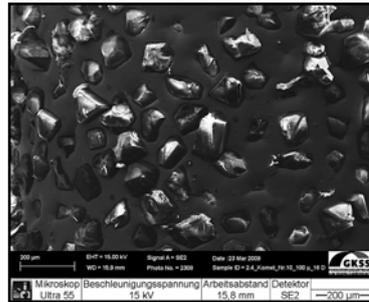
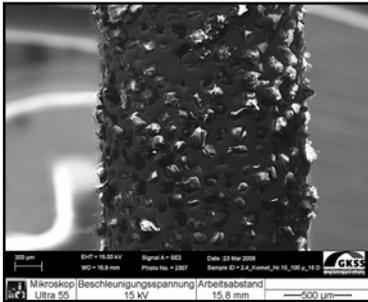


Abb. 45 a/b:
Komet-Keramikschleifer
(Ø: 1,6mm; 100µm Körnung)

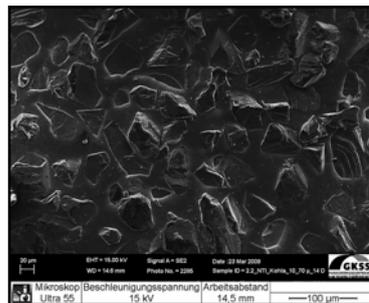
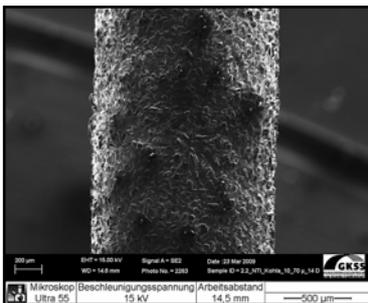


Abb. 46 a/b:
NTI-Kahla-Keramikschleifer
(Ø: 1,4mm; 70µm Körnung)

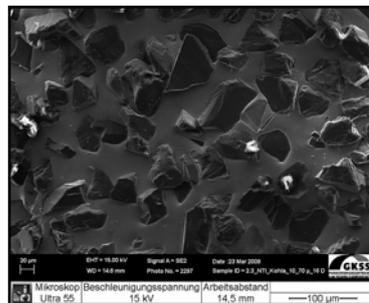
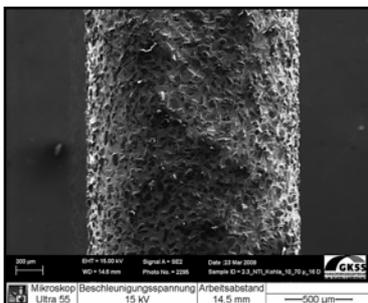


Abb. 47 a/b:
NTI-Kahla-Keramikschleifer
(Ø: 1,6mm; 70µm Körnung)

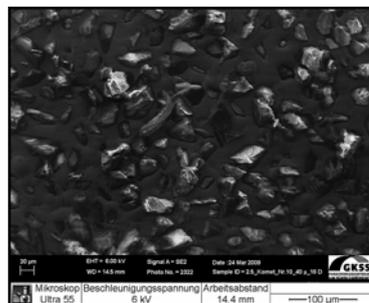
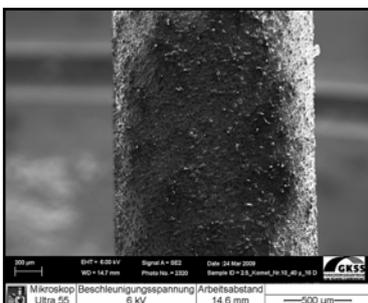


Abb. 48 a/b:
Komet-Keramikschleifer
(Ø: 1,6mm; 40µm Körnung)

Abb. 44-48: Darstellung der Oberflächen der unbenutzten Diamantschleifer mit jeweils 1,4mm/ 1,6mm Durchmesser und 100/ 70/ 40 µm Körnung (Maßstab a= 500µm/ b= 100µm).

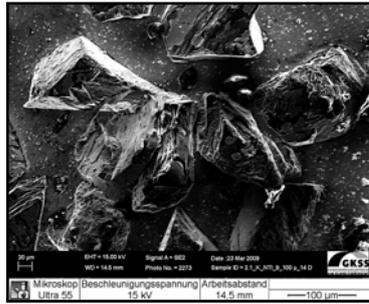
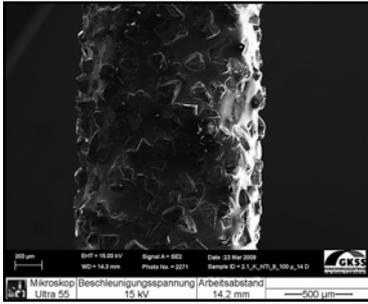


Abb. 49 a/b:
NTI-Kahla-Keramikschleifer
(Ø: 1,4mm; 100µm Körnung)

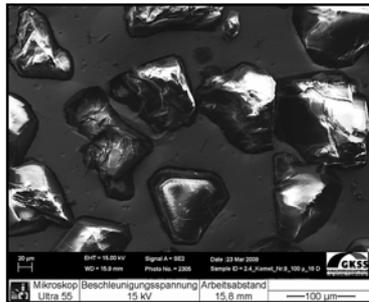
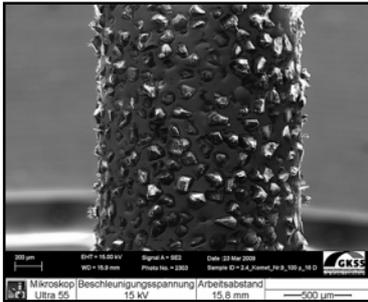


Abb. 50 a/b:
Komet-Keramikschleifer
(Ø: 1,6mm; 100µm Körnung)

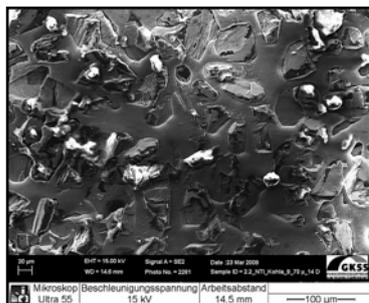
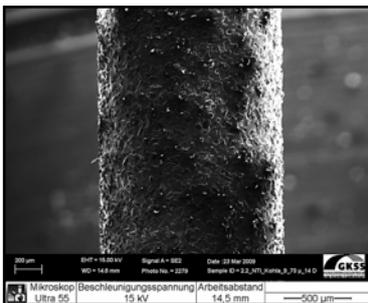


Abb. 51 a/b:
NTI-Kahla-Keramikschleifer
(Ø: 1,4mm; 70µm Körnung)

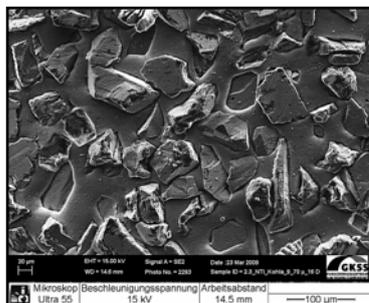
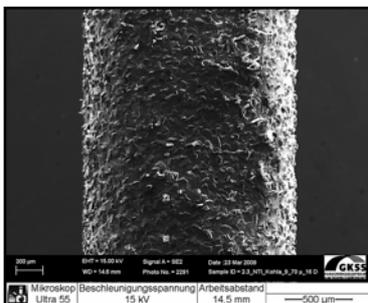


Abb. 52 a/b:
NTI-Kahla-Keramikschleifer
(Ø: 1,6mm; 70µm Körnung)

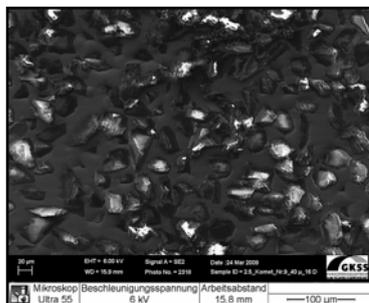
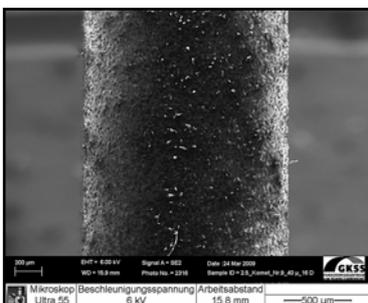


Abb. 53 a/b:
Komet-Keramikschleifer
(Ø: 1,6mm; 40µm Körnung)

Abb. 49-53: Darstellung der Oberflächen der einmal benutzten Diamantschleifer mit jeweils 1,4mm/ 1,6mm Durchmesser und 100/ 70/ 40 µm Körnung (Maßstab a= 500µm/ b= 100µm).

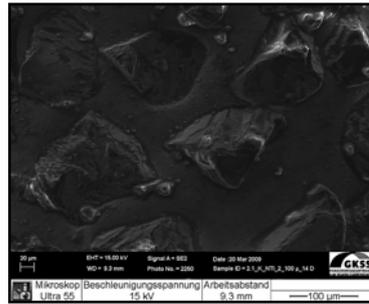
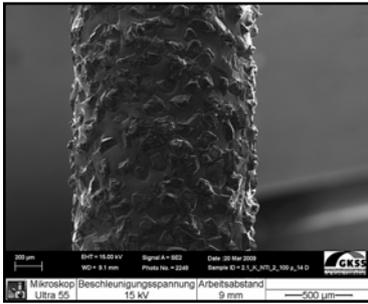


Abb. 54 a/b:
 NTI-Kahla-Keramikschleifer
 (Ø: 1,4mm; 100µm Körnung)

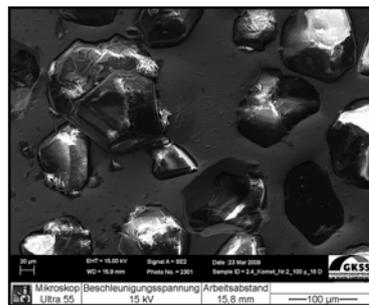
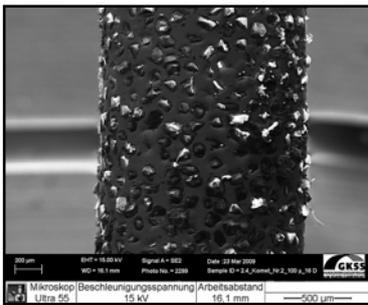


Abb. 55 a/b:
 Komet-Keramikschleifer
 (Ø: 1,6mm; 100µm Körnung)

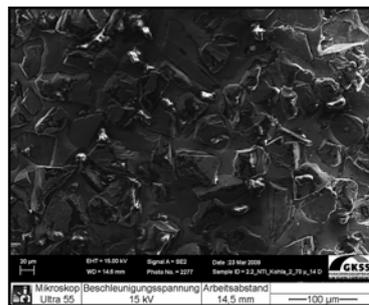
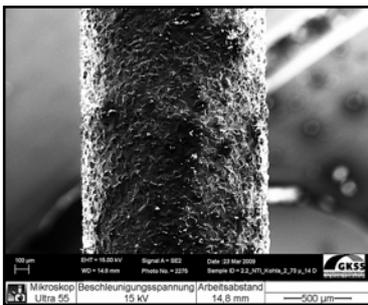


Abb. 56 a/b:
 NTI-Kahla-Keramikschleifer
 (Ø: 1,4mm; 70µm Körnung)

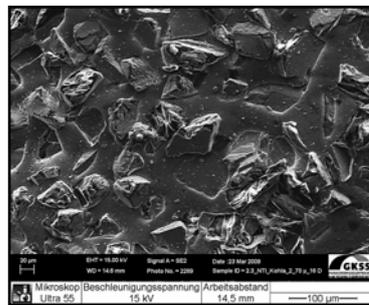
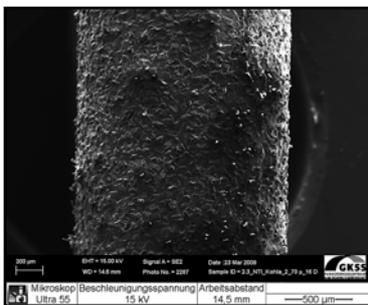


Abb. 57 a/b:
 NTI-Kahla-Keramikschleifer
 (Ø: 1,6mm; 70µm Körnung)

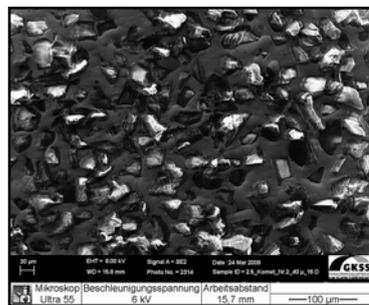
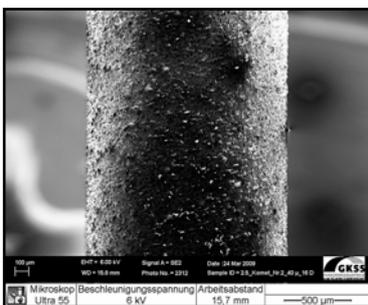


Abb. 58 a/b:
 Komet-Keramikschleifer
 (Ø: 1,6mm; 40µm Körnung)

Abb. 54-58: Darstellung der Oberflächen der zweimal benutzten Diamantschleifer mit jeweils 1,4mm/ 1,6mm Durchmesser und 100/ 70/ 40 µm Körnung (Maßstab a= 500µm/ b= 100µm).

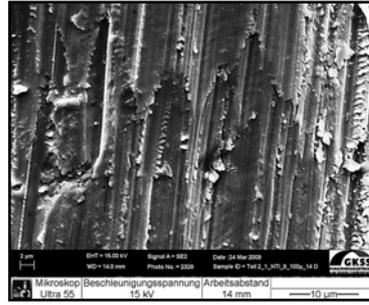
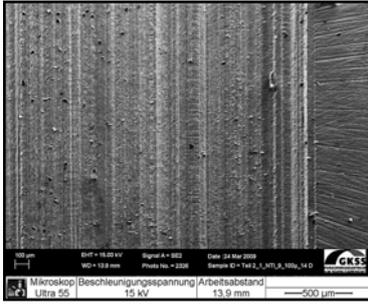


Abb. 59 a/b:
Zirkondioxidkeramik-
Oberfläche nach Schleifgang
mit NTI-Kahla-
Keramikschleifer
(Ø: 1,4mm; 100µm Körnung)

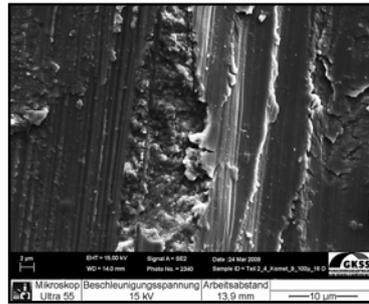
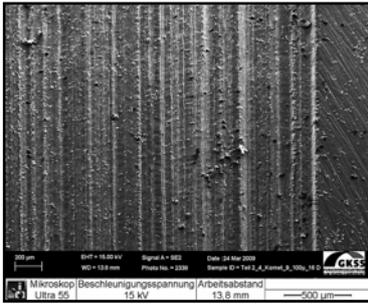


Abb. 60 a/b:
Zirkondioxidkeramik-
Oberfläche nach Schleifgang
mit Komet-Keramikschleifer
(Ø: 1,6mm; 100µm Körnung)

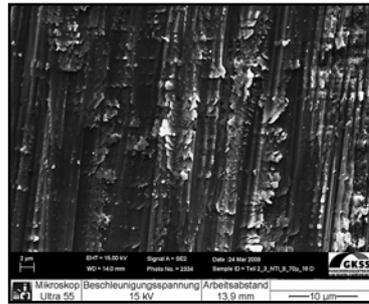
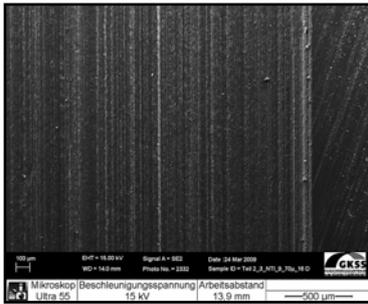


Abb. 61 a/b:
Zirkondioxidkeramik-
Oberfläche nach Schleifgang
mit NTI-Kahla-
Keramikschleifer
(Ø: 1,6mm; 70µm Körnung)

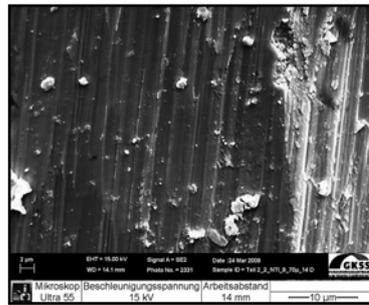
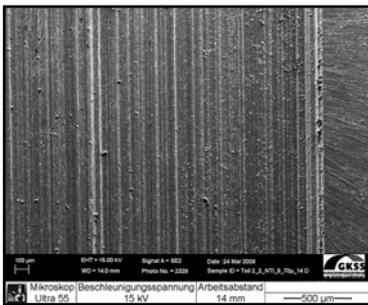


Abb. 62 a/b:
Zirkondioxidkeramik-
Oberfläche nach Schleifgang
mit NTI-Kahla-
Keramikschleifer
(Ø: 1,4mm; 70µm Körnung)

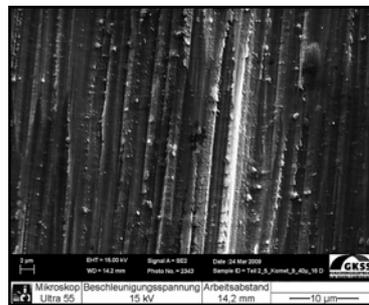
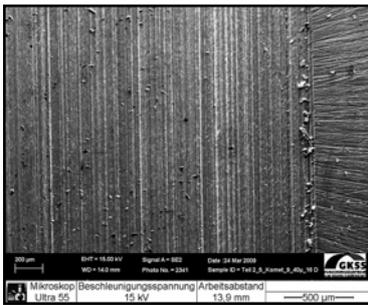


Abb. 63 a/b:
Zirkondioxidkeramik-
Oberfläche nach Schleifgang
mit Komet-Keramikschleifer
(Ø: 1,6mm; 40µm Körnung)

Abb. 59-63: Darstellung der Oberflächen der Zirkondioxidkeramik nach einem Schleifdurchgang mit Diamantschleifern verschiedener Hersteller mit jeweils 1,4 mm/1,6mm , 100/ 70/ 40 µm Körnung.
(Maßstab a= 500 µm/ b= 10 µm).

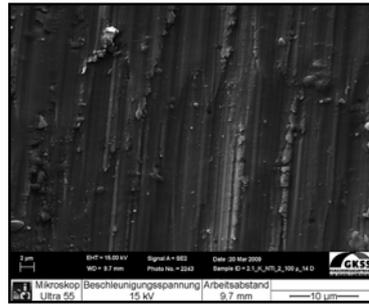
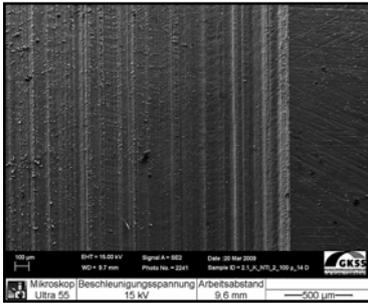


Abb. 64 a/b:
Zirkondioxidkeramik-
Oberfläche nach Schleifgang
mit NTI-Kahla-
Keramikschleifer
(Ø: 1,4mm; 100µm Körnung)

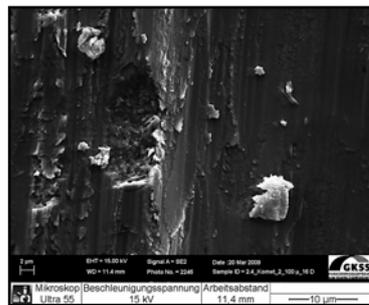
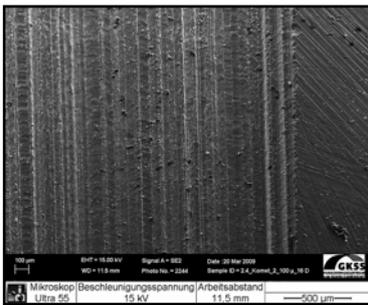


Abb. 65 a/b:
Zirkondioxidkeramik-
Oberfläche nach Schleifgang
mit Komet-Keramikschleifer
(Ø: 1,6mm; 100µm Körnung)

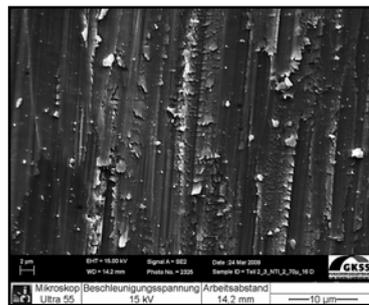
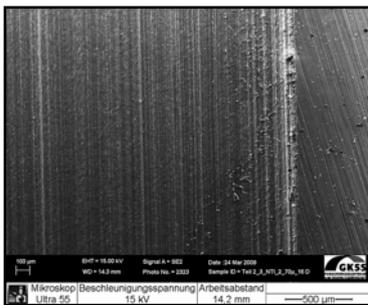


Abb. 66 a/b:
Zirkondioxidkeramik-
Oberfläche nach Schleifgang
mit NTI-Kahla-
Keramikschleifer
(Ø: 1,6mm; 70µm Körnung)

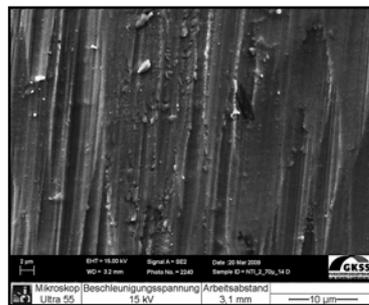
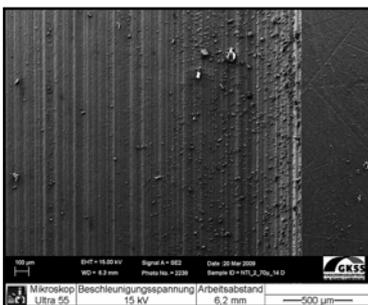


Abb. 67 a/b:
Zirkondioxidkeramik-
Oberfläche nach Schleifgang
mit NTI-Kahla-
Keramikschleifer
(Ø: 1,4mm; 70µm Körnung)

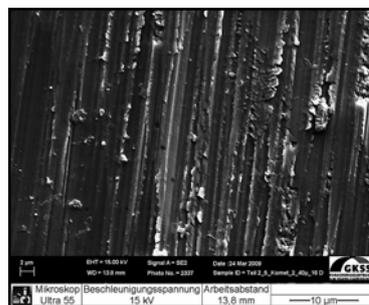
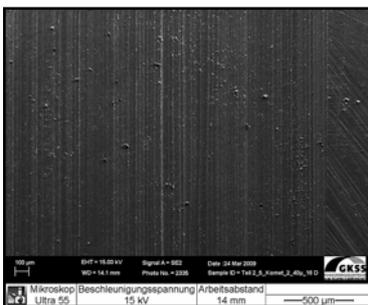


Abb. 68 a/b:
Zirkondioxidkeramik-
Oberfläche nach Schleifgang
mit Komet-Keramikschleifer
(Ø: 1,6mm; 40µm Körnung)

Abb. 64-68: Darstellung der Oberflächen der Zirkondioxidkeramik nach zwei Schleifdurchgängen mit Diamantschleifern verschiedener Hersteller mit jeweils 1,4 mm/1,6mm , 100/ 70/ 40 µm Körnung (Maßstab a= 500 µm/ b= 10 µm).

6 Diskussion

6.1 Methodendiskussion

Die verwendete Untersuchungsmethode ist in der Industrie zur Testung von Schleifkörpern und in der wissenschaftlichen Literatur als "preparation guided by weight" etabliert. (TANAKA et al. 1991, GURECKIS et al. 1991, von FRAUNHOFER & SIEGEL 2000, WILGUS et al. 2004, YIN et al. 2006).

Der Vorteil dieser Methode ist, dass die verschiedenen Einflussparameter, die beim manuellen Beschleifen variabel wären, definiert gehalten werden können. Im Einzelnen wird das Beschleifen durch folgende Parameter beeinflusst:

dem Beschleifinstrument, seiner Körnung, Form, Durchmesser, Verschleiß und Herstellungsqualität (SIEGEL & von FRAUNHOFER 1998). Außerdem wird das Beschleifen von der Kühlwassermenge, dem Anpressdruck des Instruments, der Präparationstiefe, dem Handstück, seiner Rotationsgeschwindigkeit sowie dem Spiel des Instruments im Handstückkopf variiert. Weiterhin spielt das Beschleifmaterial eine wichtige Rolle. In früheren Arbeiten der Arbeitsgruppe wurden die Beschleifeigenschaften verschiedener Aufbaumaterialien untersucht (LASSON et al. 2005, SCHMAGE et al. 2006, SITO 2007), während in der vorliegenden Arbeit nur ein Beschleifmaterial verwendet wurde und daran verschiedene Schleifkörper getestet. Nacheinander wurden die einzelnen Parameter Diamantschleifkörper, -Qualität bzw. Hersteller, Körnung, Durchmesser und Verschleiß modifiziert, während die übrigen Einflussgrößen jeweils konstant gehalten wurden. Ein Problem stellten die verschiedenen Durchmesser und Körnungen der zu vergleichenden Schleifkörper dar:

Von verschiedenen Herstellern wurden spezielle Keramikdiamanten nur mit 1,6 mm Durchmesser angeboten, weshalb das Versuchsdesign so gestaltet wurde, dass zunächst der Einfluss vom Durchmesser und der Produktqualität und danach der der Körnung geprüft wurde.

Der Anpressdruck wurde über das Gewicht reguliert, dass das Handstück an das Objekt zog. Dabei sind erhebliche Unterschiede zwischen verschiedenen Personen möglich, wobei hier eine "leichte Hand" simuliert werden sollte (TANAKA et al. 1991, MIYAWAKI et al. 1996, WILGUS et al. 2004).

Als Zielgrößen wurden die Beschleifgeschwindigkeit und die Oberflächengüte des beschliffenen Objekts evaluiert. Bisher untersuchten nur wenige Autoren das Beschleifen von Keramik (TANAKA et al. 1991, TEIRA et al. 1990, YIN et al.

2006), wobei es sich nicht um Zirkondioxidkeramik handelte. Da dem Werkstoff Zirkondioxidkeramik eine zunehmende Bedeutung in der ästhetischen Zahnheilkunde zukommt, sollte auch seine Nachbearbeitbarkeit möglich und bekannt sein, was aber bislang noch nicht zufrieden stellend geklärt wurde.

Die Prüfkörper aus Zirkondioxidkeramik waren Rohlinge, die vor dem Pressen und Brennen genutzt wurden, da sie mit identischen Durchmessern und Materialqualitäten zur Verfügung stehen sollten. Allerdings konnte die Keramikqualität nach der endgültigen Verarbeitung variieren und die Beschleifeigenschaften sollten erneut damit geprüft werden. Für diese Untersuchung wurden durchgehend nur diese Prüfkörper verwendet, so dass Unterschiede zur gepressten, gebrannten Keramik einen einheitlichen, systematischen Fehler darstellen würden.

Die Beschleifgeschwindigkeit wird durch die Härte des Beschleifmaterials, dem Anpressdruck, der Kühlung und der Qualität des Schleifkörpers gesteuert (Marxkors & Danger 1998).

Hinsichtlich der Qualität des Schleifkörpers ist die Bindungsfestigkeit der Diamantpartikel in der Matrix relevant sowie die Stabilität der Kantenschärfe der Diamantpartikel. Gerade auf einem sehr harten Beschleifmedium bestehen hohe Forderungen an die Qualität der Schleifkörper.

Neben dem effizienten Beschleifen sollte gerade in der Nachbearbeitung der Werkstücke eine Oberflächengüte produziert werden, die eine rasche Politur und Eingliederung erlaubt. Auf jeden Fall sollte Chipping oder ein Glasbrand aufgrund hoher Oberflächenrauigkeit vermieden werden. Daher wurde die Oberflächenrauigkeit nach Bearbeitung mit verschiedenen Korngrößen ermittelt (AYAD et al. 1996, WAHLE & WENDT 1993).

6.2 Ergebnisdiskussion

Die erste Arbeitshypothese, dass spezielle Keramikdiamantschleifer besser als konventionelle Diamantschleifer zur Bearbeitung von Zirkondioxidkeramik geeignet waren, wurde fürs oberflächliche Beschleifen mit 0,2 mm Abtrag hinsichtlich der Beschleifgeschwindigkeit bestätigt. Für tieferes Beschleifen mit 1,4 mm oder 2,0 mm Anstelltiefe traf die Hypothese jedoch nicht zu.

Zur Erklärung wird eine auf die Härte des Beschleifmaterials abgestimmte Qualität des Keramik-Schleifkörpers vermutet. Dabei spielen die Einbettfestigkeit der Diamantpartikel in der Matrix, die Art der Matrix des Schleifkörpers und die Schärfe der Diamantpartikel eine Rolle. Zwischen den verschiedenen Herstellern der herkömmlichen Diamanten wurden beim oberflächlichen Abtrag keine Unterschiede hinsichtlich der Beschleifgeschwindigkeit gefunden, was verdeutlicht, dass alle gleichermaßen schlecht für das Material geeignet waren.

Bei tieferen Anstelltiefen bestand keine Überlegenheit des Diamantschleifkörpers mehr, was vermutlich daran lag, dass der Schleifkörper mit seinem gesamten Durchmesser durch das Material geführt werden muss. Dabei spielten die Faktoren Spülflüssigkeit zum Abtransport des Schleifstaubs und der Zusatz der Diamantschleifkörper mit Schleifrückständen eine entscheidende Rolle, weshalb die Überlegenheit der Keramikscheifkörper nicht mehr deutlich wurde. Offensichtlich waren herkömmliche Komet-Diamanten weniger zum Durchschleifen von Keramik geeignet, da sie sich hochsignifikant von den übrigen drei Produkten in der Geschwindigkeit unterschieden. Als Erklärung könnte der Zusatz mit Schleifstaub dienen, der nicht abtransportiert bzw. abgewaschen werden konnte.

Bereits in den Vorversuchen zeigte sich dieser Sachverhalt, da ein Durchschleifen des Probekörpers bei 2,0 mm Abtragtiefe unmöglich war, sondern sich der Schleifer mit Bohrstaub zu setzte und fest fraß.

Überraschend war, dass nicht nur die herkömmlichen Diamantschleifer, sondern auch die speziellen Keramik-Diamantschleifer bereits beim zweiten Durchgang signifikant verschlissen.

Dies zeigte, dass das Beschleifen von Zirkondioxidkeramik offensichtlich weiterhin eine Herausforderung darstellt. Wünschenswert wären eine längere Haltbarkeit der speziellen Schleifer. Die Abnutzung erfolgte laut REM- Bildern bei konventionellen Diamantschleifern durch Herausbrechen der Diamantpartikel und

Entrundung, während die Diamantpartikel bei den Keramikdiamantschleifern nicht aus ihrer Bindung gerissen werden, aber ebenfalls entrundeten.

Erwartungsgemäß erforderte das Beschleifen mit feineren Diamantkörnungen mehr Zeit und größere Schleiferdurchmesser arbeiteten effektiver. Dies war aus früheren Untersuchungen mit Schleifkörpern auf anderen Materialien wie Dentin bereits bekannt (Marxkors & Danger 1998, Sito 2007, Lasson et al. 2005)

Hinsichtlich der zweiten Arbeitshypothese, dass feinere Diamantkörnungen und größere Durchmesser eine bessere Oberflächengüte erzielen, wurde festgestellt, dass die Aussage bezüglich der Körnungen stimmte, bezüglich der Durchmesser jedoch nicht. Erwartungsgemäß hatte die Korngröße der Diamanten auf die Oberflächenrauigkeit der Keramik den entscheidenden Einfluss.

Aus der klinischen Erfahrung ist bekannt, dass größere Schleifkörperdurchmesser mehr Laufruhe besitzen, durch die standardisierte Konstruktion besaß dies in diesem Versuch keine Relevanz. In Übereinstimmung mit einer vergleichbaren Untersuchung (YIN et al. 2006) beeinflussten die Abtragtiefe und die Vorschubgeschwindigkeit entscheidend die Oberflächenstruktur. Im Gegensatz zum Beschleifen von Schmelz oder Dentin besaß die Keramik eine größere Härte (1200 HV), so dass die Vorschubgeschwindigkeit langsamer war (LASSON et al. 2005, SITO 2007) bei vergleichbarem seitlichen Anpressdruck, der gewichtsgesteuert war. Dadurch, dass es sich um einen dynamischen Schleifprozess handelte, führte das Schleifen mit Diamantpartikeln nicht nur zu einem Materialabtrag im Bereich der Kontaktzone, sondern auch zu seitlichen Abplatzungen. Um solche Schäden gering zu halten, die später wieder auspoliert werden müssen, wird ein geringer Anpressdruck von 0,55 N empfohlen (YIN et al. 2006). Dieses wurde in der vorliegenden Untersuchung nicht nur eingehalten, sondern mit 0,2 N deutlich unterschritten. Außerdem sollte Zirkondioxidkeramik über verschiedene Anstellwinkel geschliffen werden (Empfehlung bei Trennschleifsysteme, Fa. Exakt, Norderstedt), um effektiver abgetragen zu werden, was bedeutet, dass Werkstück oder Winkelstück während des Schleifvorgangs bewegt werden. Dies wurde in diesem Versuch nicht genutzt.

Die Oberflächengüte zeigte in den REM- Bildern in Übereinstimmung zur Rauigkeitsmessung gleichmäßiger geschliffene Oberflächen und weniger Oberflächenschäden bei 70 µm Diamantkörnung im Gegensatz zu 100 µm.

Deshalb wäre vorzuschlagen, geringe Korrekturen direkt mit dem 70 µm der Diamantenkörnung vorzunehmen oder im Anschluss an das Schleifen mit 100 µm gekörnten Diamantschleifkörper immer einen Feinschliff mit 40 µm gekörnten Diamantschleifkörpern anzuschließen. Obwohl seit einiger Zeit spezielle Keramikschleifkörper auf dem Markt angeboten werden, ist nicht zu erwarten, dass alle praktizierenden Zahnärzte diese auch nutzen, sondern weiterhin Keramik mit dem herkömmlichen Diamantschleifkörper bearbeiten.

Daher erschien es wichtig nachzuweisen, dass die Nutzung von speziellen Keramikschleifern empfehlenswert wäre, da sie eine höhere Standzeit besaßen und effektiver arbeiteten. Dies war aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten interessant, da sich normale Diamantschleifkörper nach dem zweiten Schleifgang auf Zirkondioxidkeramik deutlich schneller abnutzten, erscheinen sie unrentabel und ineffektiv. Daher kann aufgrund der vorliegenden Arbeit die Empfehlung zur Nutzung der Keramikdiamantschleifer dringend gegeben werden. Auch wenn nicht alle Messungen die Überlegenheit belegten, waren Sie in keinem Bereich den Normaldiamanten unterlegen.

Zum Schleifen auf Zirkondioxidkeramik liegen noch nicht ausreichend Erfahrungen vor, weshalb sich weitere Untersuchungen auf diesem Gebiet anschließen sollten und die Technik weiter verbessert werden muss.

7 Schlussfolgerungen

1. Hinsichtlich der Beschleifzeiten bei oberflächlichem Abtrag war die Zirkondioxidkeramik-Diamantschleifer den herkömmlichen Diamantschleifern überlegen. Da bei tieferem Abtrag dieser Vorteil nicht mehr bestand, sollte Zirkondioxidkeramik durch schichtweises, oberflächliches Schleifen abgetragen werden.
2. Alle Diamanten sowohl herkömmliche als auch spezielle Keramik-Diamantschleifkörper nutzten beim Beschleifen von Zirkondioxidkeramik relativ schnell ab, d.h. bereits nach dem ersten Beschleifgang war Verschleiß zu erkennen.
3. Die Oberflächenrauigkeiten der Keramikoberfläche waren von der Diamantkörnung und weniger vom Durchmesser, vom Schleifkörperhersteller oder speziellen Keramikschleifkörper abhängig. Mit dem Verschleiß des Schleifkörpers reduzierte sich die Oberflächenrauigkeit.
4. Zum effizienten Beschleifen mit hoher Oberflächengüte sollte ein möglichst großer Durchmesser mit nicht zu grober Körnung (unter 70 μm) verwendet und längere Beschleifzeiten berücksichtigt werden.
5. Die Effizienz spezieller Keramikdiamantschleifer zum Beschleifen von Zirkondioxidkeramik wurde bestätigt.

8 Zusammenfassung

Die Nachbearbeitung von Fräskeramik, namentlich Zirkondioxidkeramik nimmt in der ästhetischen Zahnheilkunde eine zunehmend bedeutende Rolle ein. Für eine Bearbeitung von Zirkondioxidkeramik werden spezielle Keramik-Diamantschleifkörper angeboten. Bislang wurden konventionelle Diamantschleifkörper auch für Keramikwerkstoffe verwendet, wobei nicht bekannt war, welchen Schleifeffekt und welche Effizienz sie besaßen. Daher war das Ziel der vorliegenden Arbeit zunächst den Nutzen spezieller Keramiksleifkörper gegenüber herkömmlichen Diamantschleifern zu prüfen und die Qualität verschiedener Diamantschleifkörper gegeneinander abzuwägen. Weiterhin sollte die Geschwindigkeit ihres Verschleißes und die Oberflächengüte der beschliffenen Keramikoberfläche bestimmt werden. Die Einflussparameter Diamantkörnung und Durchmesser sollten ebenfalls evaluiert werden. Die Versuche wurden auf Yttrium-verstärkten, tetragonalen Zirkondioxidkeramik-Rohlingen durchgeführt.

Mittels einer standardisierten Beschleifapparatur wurde der Einfluss der einzelnen Parameter verglichen. Messgrößen stellten die Beschleifgeschwindigkeiten von vier konventionellen Diamantschleifkörpern und einen Zirkondioxidkeramik-Diamantschleifkörper in zylindrischer Form von 1,4 mm Durchmesser und 100 µm Körnung bei drei verschiedenen Anstelltiefen dar. Weiterhin wurden Zirkondioxidkeramik-Schleifkörper mit 1,4 mm und 1,6 mm Durchmesser sowie 100 µm, 70 µm und 40 µm gegeneinander verglichen. Von allen Versuchen erfolgte ein zweiter Beschleifdurchgang zur Bestimmung der Verschleißgeschwindigkeit der Diamantschleifkörper.

Zusätzlich wurden die Oberflächenrauigkeiten der beschliffenen Keramikprüfkörper profilometrisch anhand der Kenngröße Ra und Rz gemessen. Exemplarisch wurden die Diamantschleifkörper neu und nach Verwendung sowie die Keramikoberflächen rasterelektronenmikroskopisch dargestellt. Die Ergebnisse wurden statistisch ausgewertet und signifikante Differenzen berechnet (ANOVA, Scheffé-Korrektur, Signifikanzniveau $\alpha=0,05$).

Die Zirkondioxidkeramikschleifer ermöglichten ein hochsignifikant schnelleres Beschleifen als alle vier herkömmlichen Diamantschleifer bei einem oberflächlichen Abtrag von 0,2 mm. Bei Schleifen in der Keramiksubstanz mit 1,4 bzw. 2,0 mm Anstelltiefe besaß der Keramiksleifer keine Überlegenheit mehr, sondern war signifikant langsamer als die herkömmlichen Diamanten außer dem

Komet- Diamanten bei 2,0 mm Tiefe. Alle Diamanten zeigten bereits nach dem ersten Schleifgang Abnutzungen und heraus gebrochene Diamantpartikel in den rasterelektronenmikroskopischen Abbildungen. Entsprechend signifikant längere Beschleifzeiten wurden in der jeweiligen Gruppe im zweiten Beschleifgang festgestellt.

Die Oberflächenrauigkeiten der Keramikoberfläche verhielten sich einheitlich außer mit dem Komet- Diamanten, der geringere Rauigkeiten erzeugte. Bei allen Gruppen wurde im zweiten Durchgang eine niedrigere Oberflächenrauigkeit gemessen als im ersten, was durch die REM-Bilder der Keramikoberflächen verdeutlicht wurde.

Der Einflussparameter Körnung führte zu längeren Beschleifzeiten, während sie ein größerer Durchmesser des Schleifkörpers verkürzte. Die Rauigkeiten der Keramikoberfläche verhielten sich bei 70 µm Körnung hochsignifikant geringer als mit 100 µm Körnung der Schleifkörper und ließen sich mit 40 µm Körnung noch weiter reduzieren. Der Durchmesser hatte keinen Einfluss auf die Oberflächenrauigkeit. Die speziellen Diamantschleifkörper sind grundsätzlich zu empfehlen, wobei ein oberflächlicher Keramikabtrag beim Beschleifen vorgenommen werden sollte. Weiterhin haben sich Schleifkörper mit einem größeren Durchmesser und einer Körnung von maximal 70 µm bewährt, da sie Effizienz und Oberflächengüte der beschliffenen Keramik kombinieren.

9 Literaturverzeichnis

1. **Akagawa Y, Ichikawa Y, Nikai H, Tsuru H** (1993) Interface histology of unloaded and early loaded partially stabilized zirconia endosseous implant in initial bone healing. *J Prosthet Dent* 69:619-624
2. **Aldini NN, Fini M, Giavaresi G, Torricelli P, Martini L, Giardino R, Ravaglioli A, Krajewski A, Mazzocchi M, Dubini B, Ponzi-Bossi MG, Rustichelli F, Stanic V** (2002) Improvement in zirconia osseointegration by means of a biological glass coating: An in vitro and in vivo investigation. *J Biomed Mater Res* 61:282-289
3. **Ayad MF, Rosenstiel SF, Hassan MM.** Surface roughness of dentin after preparation with different rotary instrumentation. *J Prosthet Dent* 1996; 75:122-128.
4. **Bieniek WK, Marx R** (1994) Die mechanische Belastbarkeit neuer vollkeramischer Kronen- und Brückenmaterialien. *Schweiz Monatsschr. Zahnmed* 104:284-289
5. **Blumenauer H, Pusch G** (1993) Ermittlung bruchmechanischer Werkstoffkennwerte. In: *Technische Bruchmechanik*. Dt. Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig- Stuttgart
6. **Burger W** (1996) Zirkonoxid in der Medizintechnik. *Erg.- Lfg.-keramische Werkstoffe*:1-49
7. **Cales B, Stefani Y, Lilley E** (1994) Long- term in vivo and in vitro aging of a zirconia ceramic used in orthopaedy. *J Biomed Mater Res* 28:619-624
8. **Christel P, Meunier A, Heller M, Torre JP, Peille CN** (1989) Mechanical properties and short- term in vivo evaluation of yttrium- oxide partially-stabilized zirconia. *J Biomed Mater Res* 23:45-61
9. **Covacci V, Bruzzese N, Maccauro G, Andreassi C, Ricci GA, Piconi C, Marmo E, Burger W, Cittadini A** (1999) In vitro evaluation of the mutagenic and carcinogenic power of high purity zirconia ceramic. *Biomaterials* 20:371-376
10. **DGZMK- Stellungnahme v 1.0, Stand (11/2007)** Vollkeramische Restaurationen. *Dtsch Zahnärztl Z* 62
11. **DGZMK- Stellungnahme (2007)** Zahnfarbene Restaurationen aus Keramik: Inlays, Teilkronen und Veneers. *Dtsch Zahnärztl Z* 62 (09)
12. **DIN EN ISO 4287** (2009-11) Geometrical Product Specifications (GPS)- Surface texture: Profile method- Terms, definitions and surface texture parameters. [http:// www bentn.de](http://www.bentn.de)

13. **Dion I, Bordenare L, Lefebvre F, Bareille R, Baqney Ch** (1994) Physico-chemistry and cytotoxicity of ceramics, Part II. *J Mater Sci Mater Med* 5:18-24
14. **Edelhoff D, Weber V** (2003) Inlaybrücke mit CAD/ CAM- gefertigtem Gerüst aus Zirkoniumdioxid- Keramik. *Quintessenz Zahntech* 29:1022-1032
15. **Evans AG** (1990) Perspective on the development of hightoughness ceramics. *J Am Ceram Soc* 73:187-206
16. **Evans AG, Heuer AH** (1986) Toughening of brittle solids by martensitic transformations. *Acta Metall* 34:761-800
17. **Filser F, Lüthy H, Kocher P, Schärer P, Gauckler LJ** (2002) Vollkeramischer Zahnersatz im Seitenzahnbereich. *Quintessenz Zahntech* 28:48-60
18. **Fischer H, Edelhoff D, Marx R** (1998) Mechanische Beanspruchbarkeit von Zirkonoxidwurzelstiften. *Dtsch Zahnärztl. Z* 53: 854-858
19. **Garvie RC, Hannink RH, Pascoe RT** (1975) Ceramic steel. *Nature* 258: 703-704
20. **Geis- Gerstorfer J, Kanjantra P, Pröbster L, Weber H** (1993) Untersuchung der Bruchzähigkeit und des Reißwachstums zweier vollkeramischer Kronen-und Brückensysteme. *Dtsch Zahnärztl. Z* 48:685-691
21. **Graber G, Besimo C** (1994) Das DCS- Hochleistungskeramiksystem . Ein neuer Weg zur computergestützten Herstellung von metallfreien Zirkonoxid- Kronen und Brücken. *Quintessenz Zahntech* 20:57-64
22. **Gupta TK** (1978) Sintering of tetragonal zirconia and its characteristics. *Sci Sinter* 10:205-216
23. **Gupta TK, BechtholdJH, Kuznickie RC, Cadorff LH, Rosing BR** (1977) Stabilisation of tetragonal phase in polycrystalline zirconia. *J Mater Sci* 12: 2421-2426
24. **Gureckis KM, Burgess JO, Schwartz RS.** Cutting effectiveness of diamond instruments subjected to cyclic sterilization methods. *J Prosthet Dent* 1991;66:721-726
25. **Hahn R, Löst C** (1992) Konventionelle Dentalporzellane versus bruchzähe Hochleistungskeramiken. *Dtsch Zahnärztl Z* 47:659-664
26. **Hahn R, Wolf M** (1994) Teil II Hochleistungskeramik und sonoerosive Fertigungstechnik. *Dental- Labor XL.II:169-177*

27. **Hennike HW** Werkstoffsystematik keramischer Stoffe. Clausthal-Zellerfeld: 7-10
28. **Hayashi K, Inadome T, Tsumura H, Mashima T, Sugioka Y** (1993) Bone- implant interface mechanics of in-vivo bio-inert ceramics. *Biomaterials* 13: 195-200
29. **Hayashi K, Matsuguchi N, Uenoyama K, Sugioka Y** (1992) Re-evaluation of the biocompatibility of bio-inert ceramics in- vivo. *Biomaterials* 13:195-200
30. **Ichikawa Y, Akagawa Y, Nikai H, Tsuru H** (1992) Tissue compatibility and stability of a new zirconia ceramic in vivo. *J Prosthet Dent* 68:322-326
31. **Janda R** (2009) Vollkeramiken: Zusammensetzung, Eigenschaften, Anwendung, Wertung. *Quintessenz Update Zahntechnik Band 1*: 1-16
32. **Kappert HF** (1996) Werkstoffkundliche Grundlagen der Dentalkeramik In: *Vollkeramik*. Quintessenz Berlin:19-40
33. **Kern M** (2005) Klinische Langzeitbewahrung von zwei- und einflügeligen Adhäsivbrücken aus Vollkeramik. *Quintessenz* 56:231-239
34. **Kern M** (2008) Vollkeramik- langfristig mit guten Perspektiven? *aesthetische Zahnmedizin Heft 2* 11. Jahrgang, 58-63
35. **Kern M, Knode H** (1991) Stiftkernaufbauten aus In-ceram. Direkte und indirekte Methode. *Quintessenz Zahntech* 17:917-925
36. **Kern M, Simon MHP, Strub JR** (1998) Erste klinische Erfahrungen mit Wurzelstiften aus Zirkondioxidkeramik. *Dtsch Zahnärztl Z* 53:266-268
37. **Lasson I, Schmage P, Nergiz I, Platzer U** (2005),. Roughness and substance loss of 9 core materials after preparation. *J Dent Res* ;24A:No2693
38. **Li J, Lin Y, Hermansson L Söremark R** (1993) Evaluation of biocompatibility of various ceramic powders with human fibroblasts in vitro. *Clin Mat* 12: 197-201
39. **Ludwig P** (1975) Die Kaukraftentwicklung der Kaumuskulatur und ihre sensorische Stellung. *Dtsch Zahnärztl Z* 30:797-802
40. **Luthardt R, Herold V, Sandkuhl O, Reitz B, Knaack JP, Lenz E** (1998) Kronen aus Hochleistungskeramik. Zirkondioxid-keramik, ein neuer Werkstoff in der Kronenprothetik. *Dtsch Zahnärztl Z* 53:280-285
41. **Luthardt R, Musil R** (1996) Hochleistungskeramik und CAD/ CAM-Technologie in der Zahnmedizin – zur Frage der dental- technologischen Bearbeitbarkeit von Zirkondioxid- Keramik. *Swiss Dent* 11: 37-41

42. **Lüthy H, Filser F, Loeffel O, Schuhmacher M, Gauckler LJ, Hammerle CHF** (2005) Strength and reliability of four- unit allceramic posterior bridges. Dent Mater 21:930-937
43. **Maier HR** (1995) Leitfaden Technische Keramik, Werkstofftechnik, Keramik. Selbstverlag Institut für keramische Komponenten im Maschinenbau, Aachen, 2. Auflage
44. **Maier HR** (1991) Leitfaden Technische Keramik, Werkstoffkunde II, Keramik. Selbstverlag Institut für keramische Komponenten im Maschinenbau, 2. Auflage, Aachen
45. **Marx R** (1993) Moderne keramische Werkstoffe für ästhetische Restaurationen Verstärkung und Bruchzähigkeit. Dtsch Zahnärztl Z 48, 229-236
46. **Meyenberg KH, Lüthy H, Schärer P** (1995) Zirconia Posts: A new All-ceramic concept for Nonvital Abutment Teeth. J Eshet Dent 7:73-80
47. **Miyawaki H, Teira M, Yamaki M.** Cutting effectiveness of diamond burs on commercial core composite resins and cements. J Oral Rehabil 1996;23:409-415
48. **Munz D** (1987) Werkstoffmechanische Charakterisierung keramischer Werkstoffe. In: Hochfeste Ingenieurkeramik. Haus der Technik. Vortragsveröffentlichung 519, Tagung Essen,10-16
49. **Munz D, Fett T** (1989) Mechanisches Verhalten keramischer Werkstoffe, Springer, Berlin- Heidelberg
50. **Piconi C, Maccauro G** (1999) Zirconia as a ceramic biomaterial. Biomaterials 20:1-25
51. **Richter H** (1977) Unterkritische Rissausbreitung in keramischen Werkstoffen. Ber Dtsch Keram. Ges. 54:405-409
52. **Rieth PH, Reed JS, Naumann AW** (1976) Fabrication and flexural strength of ultra- fine grained yttria- stabillized zirconia. Bull Am Ceram Soc 55: 717-721
53. **Rosentritt M.** (2008) A Focus on Zirconia- an in- vitro lifetime prediction of zirconia dental restorations- Promotion Universität Amsterdam
54. **Sandkuhl O** (1996) Technologische Untersuchungen zum Schleifen von Zirkonoxid für dentale Anwendungen. Diplomarbeit Universität Jena
55. **Scherrer SS, Denry IL, Wiskott HWA** (1998) Comparison of three fracture toughness testing techniques using a dental glass and a dental ceramic. Dent Mater 14:246-255

56. **Schmage P, Lason I, Nergiz I, Platzer U.** Effect of finishing preparation on surface of 9 core materials. J Dent Res 2006;85A:No1412.
57. **Schnemenn P, Borchers L, Stiesch- Scholz M** (2005) Belastbarkeit 4-gliedriger Seitenzahnbrücken aus Vollkeramik. ZWR 114:28-36
58. **Schwickerath H** (1986) Dauerfestigkeit von Keramik. Dtsch Zahnärztl Z 41: 264-266
59. **Schwickerath H** (1994) Neue Keramiksyste~~m~~e unter Dauerbeanspruchung. Quintessenz Zahntech 20:1495-1499
60. **Seghi RR, Rosenstiel SF** (1995) Relative fracture toughness and hardness of new dental ceramics. J Prosthet. Dent 74:145-150
61. **Siegel SC, von Fraunhofer A.** Dental cutting: the historical development of diamond burs. JADA 1998;129:740-745
62. **Sito F** (2007) Eigenschaften von Kompositen zum Stumpfaufbau hinsichtlich Verschleiß und Beschleifbarkeit. Med. Dissertation. Universität Hamburg
63. **Spur G, Tio TH** (1987) Schleifschäden an der Oberflächenrandzone keramischer Werkstoffe. Keramikbearbeitung. IDR:234-242
64. **Stamouli K, Smeekens S, Att W, Strub JR** (2006) Bruchfestigkeit von dreigliedrigen Zirkoniumdioxid- Seitenzahnbrücken. Dtsch zahnärztl Z 61: 621-626
65. **Stephan M** (1996) Beschichtungsverhalten von Verblendmaterialien auf Dentalkeramik. Diplomarbeit der Geowissenschaftlichen Fakultät, Tübingen
66. **Stevens R** (1986) Zirconia and Zirconia Ceramics. An introduction to Zirconia. Magnesium Elektron Publication No. 113, Litho 2000, Twickenham/ UK
67. **Strub JR** (1992) Vollkeramische Systeme. Dtsch Zahnärztl Z 47:566-571
68. **Tanaka N, Teira M, Wakasa K, Shintani H, Yamaki M.** Cutting effectiveness and wear of carbide burs on eight machinable ceramics and bovine dentin. Dent Mater 1991;7:247-253
69. **Teira M, Wakasa K, Yamaki M, Matsui A.** Denal cutting behavior of mica-based and apatite-based machinable glass ceramics. J Oral Rehabil 1990;17:461-72
70. **Tietz HD** (1994) Technische Keramik: Aufbau, Eigenschaften, Herstellung, Bearbeitung, Prüfung. VDI- Verlag, Düsseldorf

71. **Tinschert J** (2002) Werkstoffkundliche und klinische Untersuchungen zu vollkeramischen Kronen und Brücken aus Hartkern- Systemen. Habilitationsschrift, Aachen
72. **Tinschert J, Götz N, Natt G, Spiekermann H** (2005) Probleme der residualen Festigkeit von vollkeramischen Restaurationen und deren Kompensation. Vortrag auf der 55. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für zahnärztliche Prothetik und Werkstoffkunde, Berlin
73. **Tinschert J, Natt G, Doose B, Fischer H, Marx R** (1999) Seitenzahnbrücken aus hochfester Strukturkeramik. Dtsch Zahnärztl Z 54:545-550
74. **Tinschert J, Natt G, Mautsch W, Augthun M, Spiekermann H** (2001) Fracture strenght of Lithium disilicate-, alumina- and zirconia- based three-unit fixed partial dentures. Int J Prosthodont 14:231-238
75. **Tinschert J, Natt G, Mohrbotter N, Spiekermann H, Schulze KA** (2007) Lifetime of alumina- and zirconia ceramics used for crown and bridge restorations. J Biomed Mater Res Part B: Appl Biomater 80B, 317-321
76. **Tinschert J, Natt G, Jorewitz A, Fischer H, Spiekermann H, Marx R** (2000) Belastbarkeit vollkeramischer Seitenzahnbrücken aus neuen Hartkernkeramiken. Dtsch Zahnärztl Z 55:545-550
77. **Tinschert J, Natt G, Körbe S, Neines N, Heussen N, Weber M, Spiekermann H** (2006) Bruchfestigkeit zirkonoxidbasierter Seitenzahnbrücken- Eine vergleichende In- vitro- Studie. Quintessenz 57: 867-876
78. **Tinschert J, Natt G, On HS, Spiekermann H** (2006) Vollkeramische Brücken- Ein aktueller Überblick zur klinischen Anwendung und Bewährung. Ästhet Zahnmed 3:32-41
79. **Tinschert J, Zwez D, Marx R, Anusavice KJ** (2000) Structural reliability of alumina-, feldspar-, leucite-, mica- and zirconia- based Ceramics. J Dent 28:529-535
80. **Uo M, Sjörgen G, Sundh A, Watari F, Bergmann M, Lerner U** (2003) Cytotoxicity and bonding property of dental ceramics. Dent Mater 19:487-492
81. **Volz U** (2006) Zirkonoxid- Implantate- Die Entwicklung des Z- Look- Implantatsystems. Ästhet Zahnmed 3:42-46
82. **von Fraunhofer JA, Siegel SC.** Enhanced dental cutting through chemomechanical effects. JADA 2000;131:1465-1469.
83. **Wagner WC, Chu TM** (1996) Biaxial flexural strength and indentation fracture toughness of three new dental core ceramics. J Prosthet Dent 76: 141-144

84. **Wahle JJ, Wendt SI.** Dentinal surface roughness: A comparison of tooth preparation techniques. J Prosthet Dent 1993;69:160-164
85. **Weigl P, Lauer HC** (2000) Advanced biomaterials used for a new telescopic retainer for removable dentures, Ceramics vs. electroplated gold copings: Part II. Clinical effects. J Biomed Mater Res 53:337-347
86. **White SN** (1993) Mechanical fatigue of a feldspathic dental porcelain. Dent Mater 9: 260-264
87. **Wilgus RR, Nguyen D, Gekelman D, White JM.** Cutting efficiency of dental drills. J Dent Res 2004;83:N0.0642.
88. **Willmann G** (1986) Basis für die konstruktive Gestaltung keramischer Bauteile. In: Hochfeste Ingenieurkeramik. Haus der Technik, Vortragsveröffentlichung 519, Springer, Heidelberg: 38-43
89. **Willmann G** (1997) Normung von Zirkondioxidkeramik für Hüftendoprothesen. Biomed. Technik 42:342-346
90. **Wohlwend A, Studer St, Schärer P** (1996) Das Zirkonoxidabutment- ein neues vollkeramisches Konzept zur ästhetischen Verbesserung der Suprastruktur in der Implantologie. Quintessenz Zahntechnik 22:364-381
91. **Yin L, Song XF, Ou SF; Han YG, Wang H.** Surface integrity and removal mechanism in simulated dental finishing of a feldspathic porcelain. J Biomed Mater Res Part B; Appl. Biomater 79B:365-378,2006
92. **Yoichiro I, Yasumasa A, Hirosama N, Hiromichi T** (1992) Tissue compatibility and stability of a new zirconia ceramic in vivo. J Prosthet Dent 68:322-326
93. **Ziegler G** (1987) Keramische Konstruktionswerkstoffe – Stand der Technik. In: Hochfeste Ingenieurkeramik. Haus der Technik. Vortragsveröffentlichung 519, Tagung Essen

10 Danksagung

Herrn Prof. Dr. Hans-Dieter Jüde gilt mein Dank für die Möglichkeit zur Promotion und die Auswahl des Themas.

In Gedenken an Herrn Dr. Ingo Kirsch bin ich für die anfängliche Betreuung und Unterstützung dankbar.

Für die Betreuung, Kooperation bei der Durchführung und beim Verfassen dieser Arbeit möchte ich meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. Ibrahim Nergiz herzlich danken.

Frau Prof. Dr. Ursula Platzler gilt mein Dank für ihre Unterstützung.

Für die zu Verfügung Stellung der verschiedenen Bohrer bedanke ich mich bei Komet, NTI- Kahla und Meisinger.

Der Firma Komet, Lemgo danke ich für die Zusammenarbeit bei den Beschleifuntersuchungen, die unter der Beratung von Herrn Friedrich-Wilhelm Meier stattfanden.

Bei Herrn Thomas Thimian bedanke ich mich für die Anregungen zum Layout der Arbeit.

11 Curriculum vitae

Persönliche Daten

Name: Josip Klasnić
Geburtsdatum: 08.07.1974
Geburtsort: Hamburg
Staatsangehörigkeit: deutsch
Familienstand: ledig, ein Kind

Schul- und Berufsausbildung

1987 - 1994 Kurt- Tucholsky- Gymnasium
Abschluss: Abitur

1995 - 1996 Praktikum als Zahntechniker

1996 - 1999 Ausbildung mit Abschluss zum Zahntechniker

1999 - 2005 Zahnmedizinstudium an der Universität Hamburg
Abschluss: Staatsexamen

Beruflicher Werdegang

2005 - 2007 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Universitätsklinikum
Hamburg-Eppendorf, Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik

seit 2008 Mitarbeiter am Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf,
Poliklinik für Zahnerhaltung und Präventive Zahnheilkunde

12 Eidesstattliche Versicherung:

Ich versichere ausdrücklich, dass ich die Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die aus den benutzten Werken wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen einzeln nach Ausgabe (Auflage und Jahr des Erscheinens), Band und Seite des benutzten Werkes kenntlich gemacht habe. Ferner versichere ich, dass ich die Dissertation bisher nicht einem Fachvertreter an einer anderen Hochschule zur Überprüfung vorgelegt oder mich anderweitig um Zulassung zur Promotion beworben habe.

Unterschrift: