

Aus dem Zentrum der Zahn-, Mund und Kieferheilkunde (Carolinum)
des Klinikums der Johann Wolfgang Goethe-Universität
Frankfurt am Main

Poliklinik für Zahnerhaltungskunde

Direktor
Prof. Dr. D. Heidemann

**Verschleiß- und Dimensionsverhalten von
diamantierten Schleifkörpern und Hartmetallinstrumenten
bei der Bearbeitung einer neuartigen
ZrSiO₄-Keramik im Grünzustand**

Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades der Zahnmedizin
des Fachbereichs Humanmedizin der
Johann Wolfgang Goethe-Universität
Frankfurt am Main

vorgelegt von
Frank Hintz
Darmstadt
Frankfurt am Main, 2002

Dekan: Prof. Dr. J. Pfeilschifter

Referent: Priv.-Doz. Dr. J. Becker

Korreferent: Prof. Dr. H.-Ch. Lauer

Tag der mündlichen Prüfung: 05.12.2002

Gewidmet meinen Eltern

Inhaltsverzeichnis

<u>1</u>	<u>Einleitung</u>	<u>1</u>
<u>1.1</u>	<u>Allgemeines</u>	<u>1</u>
<u>1.2</u>	<u>Ziel der Untersuchung</u>	<u>5</u>
<u>1.3</u>	<u>Spanabhebende Bearbeitungsverfahren</u>	<u>7</u>
1.3.1	Fräsen	9
1.3.1.1	Hartmetallinstrumente	10
1.3.2	Schleifen	13
1.3.2.1	Diamantierte Schleifkörper	14
<u>1.4</u>	<u>Bearbeitung keramischer Werkstoffe</u>	<u>14</u>
1.4.1	Hartbearbeitung	15
1.4.2	Weißbearbeitung	16
1.4.3	Grünbearbeitung	16
<u>2</u>	<u>Material und Methode</u>	<u>18</u>
<u>2.1</u>	<u>Die Keramiken</u>	<u>18</u>
2.1.1	Zirkonoxid-Keramik	18
2.1.2	In-Ceram [®] -Alumina Keramik	20
<u>2.2</u>	<u>Verwendete diamantierte Schleifkörper und Hartmetall-Instrumente</u>	<u>22</u>
<u>2.3</u>	<u>Die Schleifvorrichtung, Hard- und Software</u>	<u>24</u>
<u>2.4</u>	<u>Die Messvorrichtung</u>	<u>26</u>
<u>2.5</u>	<u>Technischer Ablauf</u>	<u>27</u>
2.5.1	Vorbereitung	27
2.5.1.1	Voralterung der diamantierten Schleifkörper	27
2.5.1.2	Vermessen der Schleifkörper	27
2.5.2	Vorversuch	29
2.5.2.1	Ergebnisse der Vorversuche	30
2.5.3	Hauptversuche	32

2.5.3.1	Versuchsaufbau	32
2.5.3.1.1	Beschleifen der Zirkonoxid-Keramik	36
2.5.3.1.2	Beschleifen der In-Ceram-Alumina-Blanks®	37
2.5.3.2	Abtastung der Oberfläche der Probenkörper	38
2.6	Statistische Auswertungsmethoden	39
3	Ergebnisse	41
3.1	Bearbeitung der Zirkonoxid-Keramik mit:	41
3.1.1	Hartmetallfräsen	41
3.1.2	Diamantierte Schleifkörper	43
3.2	Bearbeitung der In-Ceram®-Keramik	54
3.3	Ergebnisse der Oberflächenabtastung	60
3.3.1	Zirkonoxid-Probenkörper	61
3.3.2	In-Ceram®-Probenkörper	63
3.3.3	Vita Mk II®-Probenkörper	64
3.4	Schleifkörperverschleiß	65
3.5	Statistische Auswertung	67
3.5.1	Zirkonoxidkeramik	67
3.5.2	In-Ceram®	70
4	Diskussion	72
4.1	Generelle Probleme der Bearbeitung vorliegender Zirkonoxid-Keramik	73
4.2	Problematik der Hartmetallfräsen an der Zirkonoxid-Keramik	74
4.3	Bearbeitung mit diamantierten Schleifkörpern	75
4.4	Wahl der Instrumentengeometrie	77
4.5	Bearbeitungsbahnen	77

<u>4.6 Ursachen der makroskopischen Unebenheiten und Formabweichungen der Keramikproben</u>	79
<u>4.7 Vergleich zu den Ergebnissen der Bearbeitung der In-Ceram® - Keramik</u>	88
<u>4.8 Systembedingte Messungenauigkeiten</u>	89
4.8.1 Messfehler durch die Mikrometerschraube	89
4.8.2 Probleme bei der Oberflächenabtastung	90
<u>4.9 Instrumentenverschleiß / Instrumentengeometrie</u>	91
<u>4.10 Grünbearbeitung im Vergleich zu anderen Bearbeitungsverfahren</u>	92
<u>4.11 Schlussfolgerung</u>	95
<u>5 Zusammenfassung</u>	96
<u>6 Summary</u>	100
<u>7 Literatur</u>	103
<u>Danksagung</u>	113
<u>Schriftliche Erklärung</u>	114
<u>Lebenslauf</u>	115

1 Einleitung

1.1 Allgemeines

Der Wunsch nach ästhetisch hochwertigen und gleichzeitig biokompatiblen Restaurationen lenkt das Interesse neben Titan vermehrt auf vollkeramische Systeme, die ein breites Indikationsspektrum abzudecken vermögen. Gerade auch vor dem Hintergrund der Amalgamdiskussion und gestiegener ästhetischer Ansprüche, ist es ein Bestreben der Zahnmedizin, ihren Patienten die bisher noch relativ teuren keramischen Restaurationen als Alternative zu den plastischen Füllungen im Seitenzahnbereich möglichst preiswert anbieten zu können.

Dazu wurde in den letzten Jahren verstärkt versucht, die aus der Industrie schon lange bekannten, CAD/CAM-Systeme (**C**omputer-**A**ided-**D**esign / **C**omputer-**A**ided-**M**anufacturing) in der Zahnheilkunde zu etablieren. Man versteht darunter die automatische Herstellung eines Werkstücks durch eine vom Computer gesteuerte Maschine, dessen geometrische Form zuvor als Datensatz vorliegen muss. Durch diese neuen Verfahren können viele Arbeitsschritte vom Computer übernommen und somit schneller und vielfach preiswerter dem Patienten angeboten werden.

Neben der Wirtschaftlichkeit solcher computerunterstützter Systeme sprechen auch werkstoffkundliche Gründe für maschinell hergestellte Restaurationen. Wie bei kaum einer anderen Werkstoffgruppe sind die mechanischen Eigenschaften so entscheidend von dem jeweiligen Fertigungs- und Bearbeitungsverfahren abhängig, wie bei den Keramiken. Bei den konventionellen Dentalkeramiksystemen sind die eigentliche Materialherstellung und die individuelle Formgebung der Restauration, wie z.B. der Schlickertechnik, direkt miteinander verknüpft. Dabei werden die guten werkstoffkundlichen Eigenschaften der Rohmaterialien verschlechtert.

Die individuelle Formgebung der Restauration durch Sinter-, Guss- oder Press-technik führt v.a. unter zahntechnischen Laborbedingungen (mangelnde Pri-

märverdichtung der Schlickermassen, Porenbildung, Verunreinigungen, schichtweise Brandführung) zu Fehlern und Phasengrenzen, welche die Festigkeit des Werkstücks deutlich beeinflussen. Darüber hinaus kommt es durch Volumenänderungen und thermischen Belastungen zu Spannungen und Mikrorissen innerhalb des Werkstücks.

Ein für das Versagen von keramischen Restaurationen bedeutsamer Mechanismus ist die Konzentration von Spannungen an Rissen. Hier wird die kritische Bruchzähigkeit des Materials schnell überschritten, obwohl die Gesamtspannung insgesamt unter dem kritischen Wert bleibt. Ausgehend von solchen Mikrorissen, entwickelt sich bei äußerer Belastung ein langsam fortschreitender Riss (unterkritisches Risswachstum).

Anders als bei Metallen kann es durch die gerichteten kovalenten Bindungen in der Keramik nicht zu einem Abrunden des Rissgrundes durch plastische Verformung kommen. Da Wasser darüber hinaus die Geschwindigkeit des Risswachstums noch erheblich beschleunigt, was durch das feuchte Mundmilieu gegeben ist, führt dies nach einiger Zeit auch unter normaler Belastung zum Versagen der Restauration [24, 81].

Bei täglich bis zu 14000 Kontakten zwischen Ober- und Unterkiefer, kommt dieser, durch die Spannungsrisskorrosion beschleunigten, Rissausbreitung eine hohe Bedeutung zu.

Gerade die Hochleistungskeramiken (z.B. Aluminium- und Zirkonoxidkeramiken) erlangen neben dem Einsatz in der Hüftgelenkendoprothetik, auch in der zahnärztlichen Prothetik als Werkstoffe für Hartkerngerüste vollkeramischer Restaurationen zunehmende Bedeutung.

Ziel bei der Entwicklung von Hochleistungskeramiken ist v.a. die Optimierung des Widerstandes gegen lastinduzierte Rissöffnungs- und mechano-hydrolytisch verursachte Risswachstumseffekte. Es wurden bereits verschiedene Verstärkungsmechanismen entwickelt:

- Einbettung von Leuzitkristallen
- Erzeugung von „Misfit-Spannungen“
- Einbringen von Whiskern
- Transformationsfestigung bei der Zirkonoxidkeramik (dieser Mechanismus wird näher unter Kapitel 2.1.1 beschrieben)

Als Hochleistungskeramiken bezeichnet man Keramiken, deren Rohstoffe in hohem Reinheitsgrad und hoher Feinheit als sinteraktive Pulver zur Verfügung stehen [123]. Dies sind oxidische und nicht-oxidische Werkstoffe, die anders als herkömmliche Keramiken, einen nur sehr geringen Anteil an amorpher Glasphase aufweisen. Für den Dentalbereich sind aufgrund ihrer Farbe bisher nur die oxidischen Hochleistungskeramiken auf Aluminium- und Zirkonoxidbasis geeignet. Um ihre hohen mechanischen Werte voll zur Geltung zu bringen, erfordern diese Keramiken eine hochtechnisierte Fertigung standardisierter Rohlinge (Preforms), sowie anschließend den Einsatz spezieller Bearbeitungstechniken, wie z.B. sonoerosiver Verfahren oder dentaler CAD/CAM-Systeme, für eine keramikgerechte Hartbearbeitung. Dies bedeutet, dass die individuelle Formgebung eines Werkstückes von der Herstellung der Keramik getrennt wird. Seit der IDS 2001 sind mehr als zehn CAD/CAM-Systeme für die Herstellung vollkeramischer Restaurationen angekündigt, bzw. bereits auf dem Markt. Beispielsweise das Cerec-System[®] (Fa. Sirona / Bensheim), das DCS[®]-System (Fa. DCS Production AG / Schweiz), das Celay[®]-System (Fa. Mikrona, Schweiz), das Procera[®]-Verfahren (Fa. Nobelpharma / Schweden), Cad.esthetics[®] (Fa. Ivoclar, Schaan/Lichtenstein) oder das Cercon[®]-System (Fa. Degussa / Hanau) bearbeiten Keramikrohlinge mit diamantierten Schleifkörpern oder Fräsen.

Diese Systeme sind zwar schon in der Lage keramische Restaurationen z.T. „chairside“ (Cerec-System[®]) herzustellen (d.h. den Patienten in einer Sitzung definitiv zu versorgen), können aber noch nicht die Präzision einer konventionell im Labor gefertigten Arbeit erreichen. Somit besteht ein Schwerpunkt der momentanen Forschung in der Optimierung der Passgenauigkeit [12].

Fehlermöglichkeiten heutiger CAD/CAM-Verfahren bestehen in allen Teilschritten bis zur fertigen Restauration.

Diese Teilschritte gliedern sich in:

- Die zahnärztliche Präparation. Hierbei entstehen immer gewisse Rauigkeiten und Kanten, die später, selbst wenn sie durch das Abtastverfahren exakt dargestellt werden können, nicht von der Schleifeinheit aufgrund ihrer Schleifkörpergeometrie herstellbar sind.
- Die Akquisition der Daten. Hier erfolgt die dreidimensionale Erfassung der zahnärztlichen Präparation.
- Die Konstruktion und Berechnung der herzustellenden Restauration am Computer. Hierbei werden vom Rechner mathematische Interpolationsverfahren durchgeführt (z.B. „Spline- oder Hermite- Interpolation“), welche die als Punktmenge vorliegende Datenmenge der Präparation in eine für die Schleifeinheit umsetzbare Kurvenfunktion umwandeln. Durch dieses „nivellieren“ der Unebenheiten entstehen aber stets Ungenauigkeiten.
- Eine weitere wichtige Fehlerquelle ist die Umsetzung der nun ermittelten Form der zu fertigenden Restauration z.B. mittels einer Schleifeinheit. Dabei kommen u.a. Lagerspiele in der Schleifkörperführung, die Auflösung mit der die Antriebsmotoren den Schleifkörper bewegen können, sowie der Verschleiß der Instrumente in Betracht.

Manche Systeme, wie z.B. das Cercon[®] -System (Fa. Degussa / Hanau) erfordern darüber hinaus eventuell noch eine manuelle Nachbearbeitung durch den Zahntechniker.

Die erzielbare Präzision kann also immer nur so gut sein wie die Genauigkeit der schwächsten Komponente.

1.2 Ziel der Untersuchung

Ziel dieser Untersuchung ist die Bestimmung des Verschleiß- und Dimensionsverhaltens zylindrischer diamantierter Schleifkörper und Hartmetall-Fräsen anhand der Änderung der Außengeometrie hergestellter Keramikproben. Die Untersuchung erfolgte an einer neuartigen Zirkonoxidkeramik im Grünzustand und in einem Zusatzexperiment auch an der Vita In-Ceram-Alumina-Keramik® (Fa. Vita / Bad Säckingen). Dabei sollte gleichzeitig die Bearbeitbarkeit einer Keramik im Grünzustand in der CAC-Schleifeinheit nach Becker [12] mittels handelsüblicher Instrumente beurteilt werden.

Die Herstellung vollkeramischer Restaurationen mit Hilfe von CAD/CAM-Systemen erfordert die Kenntnis über das Verschleiß- und Dimensionsverhalten der eingesetzten Instrumente. Durch die Steuerung der Rotationsachse der Bearbeitungsinstrumente mittels eines Computers muss zu jeder Zeit die exakte Form des Instrumentes bekannt sein. Verändert sich diese im Laufe der Bearbeitung, ändert sich bei gleichbleibender Bahnkurve auch das Präparationsprofil, was sich in der Außengeometrie der hergestellten Restauration bemerkbar macht. Durch Berücksichtigung der Verschleißdaten der Instrumente und der dadurch ermittelten Standzeit, kann eine konstant hohe Fertigungspräzision gewährleistet werden. Die Standzeit variiert je nach zu bearbeitendem Material, wodurch man also auch bemüht ist ein Material in einem Zustand zu bearbeiten, welcher lange Instrumentenstandzeiten ermöglicht.

Aber nicht nur der Verschleiß beeinflusst die Geometrie der verwendeten Schleifkörper und Fräsen, sondern auch schon bei deren Herstellung lassen sich nie exakt identische Instrumente fertigen. Deutlich wird dies v.a. bei den diamantierten Schleifkörpern, die besonders starken Schwankungen ihrer Außengeometrie unterliegen.

Im Gegensatz zu diamantierten Schleifkörpern lässt sich die Außengeometrie von Hartmetallinstrumenten exakter herstellen und sie verändert sich bis zur Abstumpfung des Instrumentes auch deutlich weniger. Hartmetaller konnten aufgrund der großen Härte von Keramiken in bisherigen Bearbeitungssystemen, die Restaurationen aus gesinterten Keramikrohlingen fertigen, nicht ein-

gesetzt werden. Diese sind nur mit diamantierten Schleifkörpern zu bearbeiten. Es stellte sich also die Frage, ob es nicht möglich wäre eine Keramik zu wählen, die zunächst als Grünkörper mit sehr geringer Härte vorliegt, um so die Möglichkeit zu haben diese, statt mit diamantierten Schleifkörpern, mit Hartmetallinstrumenten zu bearbeiten. Als Grünkörper bezeichnet man kreideähnliche Formkörper aus hoch verdichteten sinteraktiven Pulvern, die erst nach der Formgebung in einem speziellen Sinterverfahren zum festen Sinterkörper umgesetzt werden. Der traditionelle Begriff des Grünzustandes, der die ungesinterterte Keramik beschreibt, stammt von den frühen Gebrauchs- und Feuerfestkeramiken, die im ungebrannten Zustand zum Teil einen grünlichen Farbschimmer aufwiesen.

In der vorliegenden Arbeit wurden mittels eines Rotring-Winkelstücks (Fa. KaVo / Leutkirch), welches in einer zweiachsigen computergesteuerten Schleifeinheit eingespannt ist, kreisförmige Präparationen in einem Keramik-Rohling mit einer gleichbleibenden Arbeitstiefe von 4 mm durchgeführt. An den so entstandenen Probenzylindern war dann eine einfache und reproduzierbare Messung ihrer Durchmesser möglich. Aus der Formänderungen dieser Proben sollten nun Rückschlüsse auf die Dimensionsänderungen gezogen werden, wie sie sich durch den Verschleiß der Instrumente ergeben. Um die Abnutzung beurteilen zu können, wurde das zerspannte Volumen berechnet und in Beziehung zu den Durchmessern der Keramikzylinder gesetzt.

Von der neuartigen Zirkonoxidkeramik erhofft man aufgrund ihrer besonderen mechanischen Eigenschaften Vorteile in der Bearbeitbarkeit im Vergleich zu herkömmlichen Keramiken. Die besonderen Eigenschaften liegen v.a. darin, dass sie als Grünkörper verarbeitet werden kann und es dann beim folgenden Reaktionssinterverfahren nicht mehr, wie bei anderen Keramiken, die vom Grün- in den Endzustand überführt werden, zu einer Sinterschrumpfung kommt. (s.a. Kap. 2.1.1)

Bisher kamen herkömmliche Zirkonoxid-Keramiken in der Medizin aufgrund ihrer hohen Festigkeit und Bruchzähigkeit als Werkstoff zur Herstellung von Gelenkkugeln bei Hüftendoprothesen vor [102]. In der Zahnmedizin beschränkte sich ihr Einsatz zunächst auf apikale Verschlussstifte bei Wurzelspitzenresekti-

onen (z.B. FriaCon-Apexstifte[®] / Fa. Ceramed, Idar-Oberstein) [46, 47], Wurzelstifte (z.B. Cerapost[®], Fa. Brassler, Lemgo) bzw. den Einsatz als Implantat-Abutments (z.B. Fa. Wohlwend Innovative, Zürich, CH).

Vor allem die Erweiterung des Indikationsspektrums der vollkeramischen Restaurationen stellt heute einen Forschungsschwerpunkt dar. Neben den Aluminiumoxid-Keramiken gewinnen dabei die Zirkonoxid-Keramiken, aufgrund ihrer höheren mechanischen Belastbarkeit und ihres Widerstandes gegen Risswachstum, an Bedeutung. Verschiedene vielversprechende Ansätze zur Herstellung von Hartkerngerüsten aus Zirkonoxid-Keramik wurden untersucht. [50, 75, 76, 77, 131]

Neben der Hartbearbeitung z.B. mit dem DCS-System[®] (Digitising Computer Systems; DCS Production AG / Allschwil, Schweiz) an Zirconia-TZP-Keramik[®] (Fa. Metoxid AG / Thayngen, Schweiz) [131] und der Weißbearbeitung z.B. mit dem Cercon-System[®] (Fa. Degussa / Hanau) an Cercon-base-Keramik[®] [34, 128], stellt die Grünbearbeitung einer schrumpfungsfreien Zirkonoxid-Keramik einen weiteren neuen interessanten Ansatz dar.

1.3 Spanabhebende Bearbeitungsverfahren

Spanabhebende Bearbeitungsverfahren werden nach DIN 8580 in zwei Gruppen unterteilt:

- Spanen mit geometrisch bestimmten Schneiden : Bohren, Fräsen und Drehen
- Spanen mit geometrisch unbestimmten Schneiden : Schleifen

Die Zerspanung wird von verschiedenen Faktoren beeinflusst: [33]

- Instrument, z.B. die Schneidengeometrie
- Einsatzbedingung, z.B. die Schnittgeschwindigkeit
- Eigenschaften des zu bearbeitenden Werkstoffs, z.B. die Härte

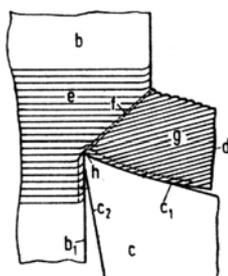
Der Begriff der „Zerspanbarkeit“ beschreibt alle Eigenschaften eines zu bearbeitenden Werkstoffes bei einer spanenden Bearbeitung. Dabei werden v.a. Parameter wie: Standzeit, Oberflächengüte, Schnitttemperatur und Spanbildung

beurteilt. Die „Zerspanbarkeit“ eines Werkstoffes ist gut, wenn: [33]

- Die Zerspankraft klein ist
- Die Schneide lange scharf bleibt
- In kurzer Zeit ein großes Volumen zerspant werden kann
- Die Spanform günstig ist

Die möglichen Bearbeitungsverfahren keramischer Werkstoffe sind im Gegensatz zu Metallen deutlich eingeschränkt. Fast alle Keramiken lassen sich durch Spanen mit geometrisch unbestimmten Schneiden bearbeiten. Lassen sich Werkstoffe nur durch diese Verfahren bearbeiten, ordnet man sie der Gruppe schlechter Bearbeitbarkeit zu. Sind keramische Werkstoffe aber auch durch Spanen mit geometrisch bestimmten Schneiden bearbeitbar, zählt man sie zur Gruppe mit besserer Bearbeitbarkeit [120].

Das Eindringen der Schneide bzw. der Schleifspitze in den Werkstoff erfolgt mit einer bestimmten Zerspankraft. Die dabei auftretende plastische Verformung führt zur Stauchung des Materials über der Spanfläche des Werkzeugs. Bei spröden Werkstoffen kommt es durch die plastische Verformung in der Scherebene bereits dort zu einer Werkstofftrennung und nicht wie bei verformbaren Materialien erst an der Schneidekante. (Abb. 1-1)



b Werkstück, b₁ Schnittfläche, c Instrument, c₁ Spanfläche, c₂ Freifläche, d Span, e Struktur im Werkstück, f Scherebene, g Struktur im Span, h Schneidekante

Abb. 1-1: Spanbildung [aus: 121]

Bei der Schleifbearbeitung von schwer zerspanbaren Keramiken wird eine hohe Tren-, Verformungs- und Reibarbeit geleistet. Die dafür aufgewendete Energie wird dabei fast vollständig in Wärme umgesetzt, die im Gegensatz zum Spanen mit definierter Schneide nicht größtenteils durch die Späne abgeführt wird, sondern verstärkt in Werkstück und Werkzeug abfließt. Dadurch ist das Bearbeitungsinstrument und die Keramik einer erhöhten thermischen Beanspruchung ausgesetzt, was durch ein Kühlmittel vermindert werden muss. Kühlschmier-

stoffe sollen so Schäden am Instrument und in der Keramikoberfläche (geringe Thermoschockbeständigkeit) vermeiden. Des weiteren soll die Reibung zwischen Werkzeug und Werkstück durch Schmieren vermindert und anfallende Späne abtransportiert werden.

Die Form der anfallenden Späne ist v.a. bei Bearbeitungsverfahren mit begrenztem Spanraum (z.B. Fräsen) von Bedeutung. Kurze aber nicht zu feine Späne sind am leichtesten zu beseitigen und stören bei der Bearbeitung am wenigsten.

Für die Optimierung von Bearbeitungsvorgängen hat es sich als günstig herausgestellt, diese in eine Grob- und Feinbearbeitung zu unterteilen. Auch in wirtschaftlicher Hinsicht ergibt sich daraus die beste Kosten-Nutzen-Relation. Bei der Grobbearbeitung wird versucht das Zeitspannungsvolumen durch die Verwendung möglichst grobkörniger Instrumente, großer Zustellung und hoher Schnittgeschwindigkeiten bis zum Kostenminimum zu vergrößern. Dabei darf es aber nicht zu so großen Formfehlern kommen, welche dann nicht mehr durch die Feinbearbeitung beseitigt werden können. Auch dürfen keine Schädigungen des Werkstücks durch erhöhte Temperaturen auftreten.

Beim Feinbearbeiten sind die Maßhaltigkeit und die Oberflächengüte die relevanten Kriterien. Hierzu ist eine Verringerung des Zeitspanvolumens unumgänglich. Trotzdem sollte die Schnittgeschwindigkeit möglichst hoch gewählt werden. Feinere Instrumente erfordern aber auch eine gute Kühlmittelzufuhr, da die Gefahr des Zusetzens deutlich höher ist.

1.3.1 Fräsen

Unter Fräsen versteht man das meist mit Hartmetallinstrumenten durchgeführte Spanen mit geometrisch bestimmten Schneiden. Beim Fräsen sind die Schneiden im Gegensatz zum Bohren oder Drehen nicht ständig mit dem Werkstück in Kontakt und so der Spanungsquerschnitt nicht gleichbleibend. Der Vorteil besteht in der besseren Kühlung und Abtransport der Späne. Durch den ungleichen Spanungsquerschnitt kommt es aber leichter zu Schwingungen. Man unterscheidet beim Umfangsfräsen das Gegen- und das Gleichlaufräsen. (Abb. 1-2)

Die Werkzeugschneiden heben beim Gegenlaufräsen einen kommaförmigen Span vom Werkstück ab. Dabei treffen sie zunächst in einem spitzen Winkel auf der Oberfläche auf. Nach dem Eindringen nimmt der Spanquerschnitt langsam zu und fällt am Schluss schnell wieder ab.

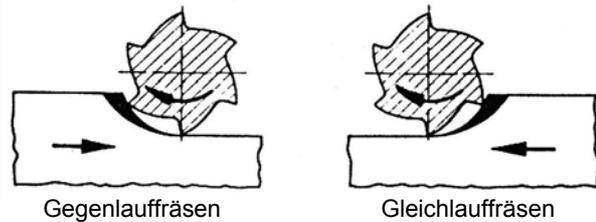


Abb. 1-2 : Gleich- und Gegenlaufräsen
(aus: [33])

Da der Fräser mehrere Schneiden besitzt, hinterlässt er auf der Oberfläche ein wellenförmiges Profil. Beim Gleichlaufräsen dringt die Schneide an der Oberfläche des Werkstücks zuerst ein, wodurch die Krafteinleitung mehr Richtung Werkstück erfolgt. Besonders bei wenig kantenstabilen Materialien macht sich dies positiv bemerkbar.

1.3.1.1 Hartmetallinstrumente

Im Gegensatz zu den diamantierten Schleifkörpern besitzen Hartmetallinstrumente definierte Schneiden und erlauben so die präzise Herstellung ihrer gewünschten Außengeometrie. Bei einer Untersuchung von Schröder und Opitz 1987 [113] zeigten Hartmetallinstrumente unter dortigen Bedingungen auch einen im Vergleich mit diamantierten Schleifkörpern geringeren Verschleiß. Betrachtet man die erzeugte Rautiefe bei der Präparation von Zahnhartsubstanz, schneiden Hartmetallinstrumente deutlich besser ab, als diamantierte Schleifkörper [90, 135]. Die von Marxkors [82] als optimal angesehene Rautiefe von $5\ \mu\text{m}$ lässt sich laut Wegmann [135] mit Hartmetallfinierern am nächsten kommen.

Zur Bearbeitung von gesinterten keramischen Werkstoffen wurden sie bisher nicht eingesetzt, da ein Zerspanen von herkömmlichen Keramiken zu einem überproportional hohem Verschleiß und Werkstoffausbrüchen an der Oberfläche führt.

Wichtige Parameter von Instrumenten mit geometrisch bestimmten Schneiden sind:

- Anzahl der Schneiden
- Schneidengeometrie und Wirkwinkel
- Verzahnungsart
- Spanraum

Grundsätzlich gilt für die Vorpräparation Instrumente mit wenig Schneiden, zum Finieren die mit vielen Schneiden zu verwenden. Auch die Art der Verzahnung beeinflusst die Präparation, so sind gerade verzahnte Instrumente zwar sehr schnittfreudig, jedoch kommt es durch die parallelen Schneiden zum „rattern“ und dadurch zu Kantenausprägungen, sowie insgesamt schlechteren Oberflächen. Deutlich ruhiger laufen gewunden verzahnte Instrumente, die im Gegensatz zu gerade verzahnten, eine kontinuierliche Abstützung auf dem Werkstoff gewährleisten, wodurch auch bessere Oberflächen zu erzielen sind [135]. Andere Verzahnungsarten, wie Instrumente mit Querhieb, Kreuzverzahnung oder Diamantverzahnung bieten Vorteile bei bestimmten Werkstoffen, z.B. langspanenden Metalllegierungen, denn hier werden die Späne besser zerkleinert.

Man unterscheidet folgende Verzahnungsarten:

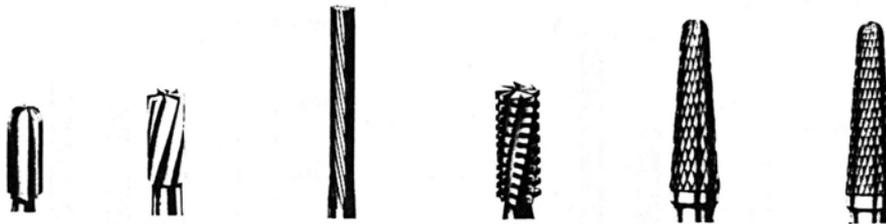


Abb. 1-3 : Verzahnungsarten (aus: [33])

- Gerade Verzahnung
- gewundene Verzahnung (Rechts- oder Linksdrill)
- Querhieb (die zwei vorgenannten Verzahnungsarten können jeweils damit versehen sein)
- Kreuzverzahnung
- Diamantverzahnung

Wichtig für das Fräsen ist die Schneidengeometrie. Anders als bei den Diamantschleifkörpern, wo die Wirkwinkel durch die Kornformen vorgegeben sind, können diese bei der Herstellung von Hartmetallinstrumenten gezielt verändert und so dem zu bearbeitenden Material angepasst werden.

Man unterscheidet bei den Wirkwinkeln: (Abb. 1-4 und 1-5)

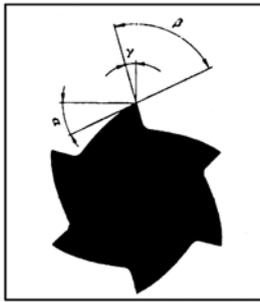


Abb. 1-4 : Wirkwinkel
(aus: [33])

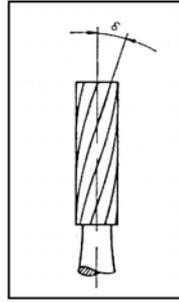


Abb. 1-5 : Drallwinkel δ
(aus: [33])

α) Freiwinkel:

- Er beeinflusst die Reibung zwischen Instrument und zu bearbeitender Materialoberfläche und somit die Wärmeentwicklung. Ein zu geringer Freiwinkel verhindert das Eindringen der Schneide in den zu bearbeitenden Werkstoff.

β) Keilwinkel:

- Er beeinflusst den Kraftaufwand beim Eindringen der Schneide in das zu bearbeitende Material. Je kleiner der Keilwinkel, um so kleiner ist auch der Kraftaufwand. Der Keilwinkel muss aber dem zu bearbeitenden Material angepasst sein. Eine Schneide mit zu kleinem Keilwinkel bricht, wenn die Härte des zu bearbeitenden Materials zu groß ist.

γ) Spanwinkel:

- Er beeinflusst die Spanbildung, sowie die Schneidleistung und die Schnittkräfte. Rotierend Dentalinstrumente verfügen in der Regel über negative Spanwinkel. Wird ein zu großer negativer Spanwinkel gewählt, so ist das Ergebnis eine zu geringe Schneidleistung.

δ) Drallwinkel: (Abb. 1-5)

- Die Drallrichtung ist bei allen zahnärztlichen Fräsinstrumenten „Rechts“. Durch ihn wird der Schneideneingriff über einen längeren Drehwinkel verteilt und somit Schnittkraftschwankungen, die zu Schwingungen führen, vermindert.

Der Spanraum (Abb. 1-6) gehört zu den passiven Elementen rotierender Instrumente. Er beschreibt den Raum zwischen den Schneiden bzw. Schleifspitzen. Ist dieser zu klein, verschmieren die Instrumente und es kommt zu erhöh-

ter Wärmeentwicklung, geringer Schneidleistung und schlechten Oberflächenqualitäten. Eine ausreichende Menge an Kühlmittel hilft dabei ein Zusetzen des Instrumentes zu verhindern.

Andere Faktoren, wie die Schnittgeschwindigkeit, die Anpresskraft, der Vorschub und die Zustellung müssen meist erst experimentell ermittelt werden, da es dafür in der Regel keine allgemein gültigen Empfehlungen gibt.

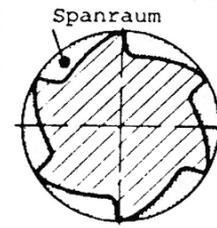


Abb. 1-6: Spanraum
(aus: [33])

1.3.2 Schleifen

Das Schleifen mit rotierenden Werkzeugen ist nach DIN 8589 Teil 11 ein spannendes Fertigungsverfahren mit vielschneidigen Werkzeugen, deren geometrisch unbestimmte Schneiden von einer Vielzahl gebundener Schleifkörper aus natürlichen oder synthetischen Schleifmitteln gebildet werden. Die gebräuchlichsten Schleifmittel sind:

- Diamant
- Siliziumkarbid
- Edelmetall

Das Schleifen erfolgt in der Regel mit hohen Schnittgeschwindigkeiten. Es wird v.a. dann verwendet, wenn aufgrund der großen Härte eines Werkstoffs andere Bearbeitungsverfahren wie das Drehen oder Fräsen ausscheiden oder eine besonders feine Oberfläche verlangt wird. Bezogen auf die Oberflächengüte haben neben der Körnung des Schleifinstrumentes auch das Zeitspannungsvolumen und die Schleifgeschwindigkeit einen großen Einfluss. Ein kleines Zeitspannungsvolumen und eine große Schleifgeschwindigkeit ergeben eine kleine Werkstückrautiefe, sofern eine höhere Schleifgeschwindigkeit durch eine Unwucht nicht zu erhöhten Schwingungen führt. Auch durch die Wahl des richtigen Kühlschmiermittels lässt sich eine wesentlich bessere Oberflächengüte erzielen [91, 136].

1.3.2.1 Diamantierte Schleifkörper

Anders als die Hartmetallinstrumente besitzen Diamantschleifkörper keine definierten Schneiden und somit auch keinen klar beschreibbaren Spanraum. In einer galvanisch aufgetragenen Bindungsschicht werden die Diamantsplitter mechanisch festgehalten. Das Bindemittel ist auf die Härte des Zahnschmelzes abgestimmt, d.h. die Diamantkörner werden festgehalten, bis sie nur noch eine ungenügende Schleifleistung erbringen, und brechen dann aus. Dadurch wird wieder ein darunter liegendes scharfes Korn frei. Für den abgetragenen Schleifstaub stehen nur die Zwischenräume zwischen den einzelnen Diamantkörnern zum Abtransport zur Verfügung, (Abb. 1-7) die je nach Hersteller in ihrem Durchmesser innerhalb einer gewissen Toleranzgrenze variieren und außerdem verschieden tief in die Bindungsschicht des Trägers eingelassen sind.

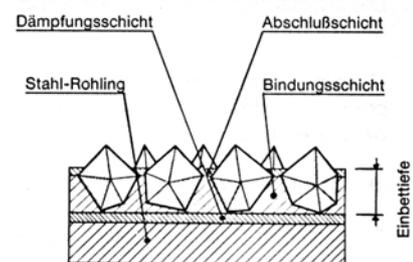


Abb. 1-7 : Einbettung der Diamantkörner (aus: [31])

1.4 Bearbeitung keramischer Werkstoffe

Die hohe Härte, die fehlende Duktilität, die geringe Thermoschockbeständigkeit, sowie die hohe Schmelztemperatur schränken die Bearbeitbarkeit von Keramiken stark ein. Spanende Bearbeitungsverfahren mit geometrisch bestimmter Schneide wie das Drehen, Fräsen und Bohren können nur in Ausnahmefällen, z.B. bei der Grün- und Weißbearbeitung, wirtschaftlich eingesetzt werden [123]. In der Zahnmedizin wird bei der Herstellung von keramischen Zahnersatz v.a. die schleifende Bearbeitung, z.B. in der CAD/CAM-Technik, oder das Sonoerosions-Verfahren [50] eingesetzt. Die Keramikbearbeitung stellt an die Schleifmaschinen aufgrund der im Vergleich zum Schleifen metallischer Werkstoffe erhöhten Prozesskräfte und der Spröbruchempfindlichkeit keramischer Werkstoffe besondere Anforderungen an steife Lager, ruckfreie und genaue Vorschubantriebe, sowie geeignete Kühlmittel. Als allgemein verbindliche Bedingungen beim Schleifen von Keramik können betrachtet werden: (nach: [136])

- Höhere Schnittgeschwindigkeiten führen zu besserer Oberflächengüte
- Die Auswirkungen der Schnitttiefe auf die Oberflächenbeschaffenheit werden auch durch die Steifheit des Systems – Schleifmaschine, Werkstück, Haltevorrichtung, Schleifinstrument – bestimmt. Deshalb muss eine dem jeweiligen System entsprechende optimale Schnitttiefe für jeden Anwendungsfall ermittelt werden.

Gerade bei Maschinen mit zu geringer dynamischer Steifigkeit kommt es durch Rattererscheinungen zu schlechteren Oberflächenqualitäten [120].

Der Einsatz von Kühlmitteln hat großen Einfluss auf das Endergebnis und den Verschleiß der Diamantwerkzeuge. Die ausreichende Menge und die richtige Zufuhr des Kühlmittels erlauben es die entstehenden Temperaturen in der Wirkzone zu minimieren, sowie die Keramikspäne aus der Kontaktzone und vom Instrument zu beseitigen.

Als Fertigungsverfahren werden in der Industrie die Hartbearbeitung auf der einen und die Grün- und Weißbearbeitung auf der anderen Seite unterschieden.

1.4.1 Hartbearbeitung

Unter Hartbearbeitung versteht man die Herstellung eines Werkstücks aus der gesinterten Keramik. Dabei wird entweder das gesamte Werkstück aus einem Rohling herausgearbeitet oder nur eine Feinbearbeitung zur Erzielung geforderter Maßtoleranzen oder Oberflächenqualitäten durchgeführt. In der Zahnmedizin kommen v.a. die schleifenden Bearbeitungsverfahren, z.B. in der CAD/CAM-Technik, oder das Sonoerosions-Verfahren zum Einsatz. Keramische Werkstücke durch Endbearbeitung eines gesinterten Rohlings herzustellen bedingt einen hohen Zeit- und Kostenaufwand und ist dadurch meist wenig wirtschaftlich. Durch die große Härte, fehlende Duktilität und hohen Schmelztemperaturen kommt es während der Bearbeitung leicht durch den Korneingriff an der Wirkstelle zur Induktion von Mikrodefekten (Initialrissen) in der Keramik, einem hohen Werkzeugverschleiß, schlechter Oberflächenqualität und z.T. ausgeprägten Randzonenschädigungen bis hin zur Spontanfraktur [38, 50]. Darüber hinaus fallen sehr große Wärmemengen an, welche wegen der im

Vergleich zu Metallen schlechteren Leitfähigkeit der Keramik, vermehrt in das Werkzeug abfließen, was zu geringen Standzeiten führt. Der zur Bearbeitung verwendete Schneidstoff Diamant beginnt bei Temperaturen von 700°C zu graphitisieren und die Bindung der Schleifkörner wird beeinträchtigt, d.h. es kommt zu einer temperaturbedingten Schädigung des Schleifkörpers [89]. In der Industrie wird deshalb seit langem der Weg der sogenannten endkonturnahen Urformung gewählt, um bei der Endbearbeitung Kosten zu sparen [123]. Die dafür notwendigen bauteilspezifischen Formwerkzeuge sind nur bei einer entsprechend hohen zu fertigenden Stückzahl wirtschaftlich vertretbar. Ein Punkt, der in der Zahnmedizin durch ihre hochindividuellen Restaurationen nicht zu realisieren ist.

1.4.2 Weißbearbeitung

Unter Weißbearbeitung versteht man die Bearbeitung eines durch einen Vorbrand verfestigten Werkstücks, das aber noch nicht seine endgültige Härte und Brennschwindung erfahren hat. Sie ist zu bevorzugen, wenn keine ausreichende Grünfestigkeit für die Spann- und Handhabungsvorgänge vorliegt.

Ein gewünschtes Formteil muss entsprechend größer dimensioniert werden, was wiederum voraussetzt, dass die Schrumpfung beim Sintern isotrop erfolgt. Meist ist aber eine Nachbearbeitung zur Korrektur von Schrumpfung Fehlern unumgänglich.

1.4.3 Grünbearbeitung

Bei der Grünbearbeitung werden urgeformte, aber ungesinterte Körper, sogenannte „Grünlinge“ bearbeitet. Hierbei können alle spanenden Bearbeitungsverfahren mit geometrisch bestimmter (z.B. Fräsen, Bohren, Drehen) und geometrisch unbestimmter Schneide (z.B. Sägen, Schleifen) verwendet werden, wobei man aber Fertigungsverfahren mit geometrisch bestimmter Schneide, v.a. Fräsen, bevorzugt.

Vor- und Nachteile der Grünbearbeitung: [79, 112, 120, 133]

Vorteile:

- Der Einsatz von Bearbeitungsinstrumenten mit definierten Schneiden ist möglich
- Wirtschaftlichere Formgebung
- Aufgrund der geringeren Härte sind größere Zeitspannungsvolumina und somit kürzere Bearbeitungszeiten möglich
- Eventuelle Wiederverwendung des zerspannten Materials

Nachteile:

- Geringe Festigkeit des Grünkörpers erlaubt nur geringe Zerspankräfte und wirft Probleme beim Transport und der Handhabung auf
- Notwendigkeit besonderer, auf den empfindlichen Werkstoff abgestimmter Spannsysteme
- Geringe Kantenstabilität v.a. dünn auslaufender Ränder
- Gefahr der Kantenausbrüche an der Austrittsseite des Werkzeuges
- Gefahr der Vorschädigung durch den Einsatz stumpfer Werkzeuge (Risse, Oberflächen- und Kantenausbrüche)
- Aufgrund der hohen Abrasivität der Abtragpartikel sind entsprechende Vorkehrungen zum Schutz der Lager- und Führungsstellen der Werkzeugmaschine notwendig
- Kühlschmierstoffe sind aufgrund der porösen Struktur der Grünkörper nicht oder nur bedingt einsetzbar
- Staubbelastung
- Wie bei der Weißbearbeitung besteht bei herkömmlichen Grünkeramiken das Problem der Sinterschrumpfung und somit der Bedarf einer Nachbearbeitung.

2 Material und Methode

2.1 Die Keramiken

2.1.1 Zirkonoxid-Keramik

Zirkonoxid-Keramik (exakter Terminus „Zirkoniumdioxid-Keramiken“) ist unter den strukturkeramischen Werkstoffen diejenige mit der höchsten Risszähigkeit und einer für Keramiken sehr hohen Biegefestigkeit [39, 79]. So haben Zirkonoxid-Keramiken eine etwa sechsfach höhere Biegefestigkeit als Glaskeramiken bzw. die doppelte Biegefestigkeit von Aluminiumoxidkeramiken [63]. Im Vergleich zu In-Ceram[®] besteht eine deutlich höhere Dauerbiegefestigkeit bei Biegeproben mit einem Mikrodefekt (Anriss), d.h. ein Fortschreiten eines Defektes bei Beanspruchung des Werkstücks findet deutlich weniger statt. Dies lässt sich mit der Fähigkeit des tetragonal stabilisierten Zirkonoxids erklären, oberflächliche Defekte selbst reparieren zu können [43, 81]. Dabei kommt es zur Umwandlung der tetragonalen Teilchen in die monokline Phase (es zeigt eine gewisse Analogie zur martensitischen Umwandlung in Metallegierungen), wodurch es zur Volumenausdehnung und dadurch zu lokalen Druckspannungen in Material kommt. Für die weitere Rissausdehnung wird dadurch mehr Energie benötigt [75].

Die vorliegende Zirkonoxid-Keramik wurde vom Institut für Materialforschung III des Forschungszentrums Karlsruhe entwickelt und besitzt einige besondere physikalische Eigenschaften, die man sich auch in der Zahnmedizin zunutze machen möchte. Die Keramik befindet sich noch im Versuchsstadium, was bedeutet, dass es durch die fehlende industrielle Herstellung noch keine standardisierten Fertigungsabläufe gibt. Es wurden 1999 nur geringe Stückzahlen für verschiedene Versuchsreihen hergestellt, von denen zehn Rohlinge mit einem Durchmesser und einer Höhe von je 15 mm für diese Untersuchung zur Verfügung gestellt wurden. Diese Keramik wird als Grünkörper gefertigt, der dann

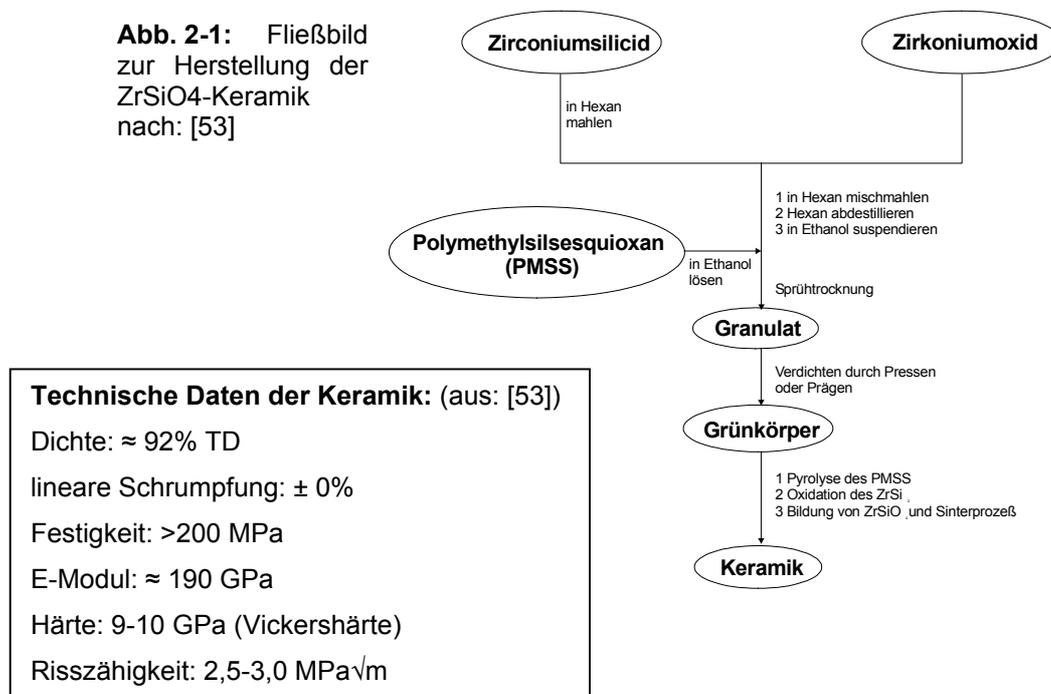
erst durch einen speziellen Reaktionssinterprozess in eine dichte und feste Keramik überführt wird. Beim Reaktionssinterverfahren vergrößert eine reaktive Komponente im Grünkörper ihr Volumen im Laufe des Prozesses, wodurch die Sinterschrumpfung praktisch vollständig kompensiert wird. Eine Nachbearbeitung zur endgültigen Formgebung kann dadurch entfallen. Beim Reaktionssintern laufen in einem mit Luft gespülten Hochtemperatur-Kammerofen beim Durchlaufen eines definierten Temperaturprogramms die verschiedenen Reaktionen bis zum Erhalt der endgültigen Keramik ab. Dabei ändert der zunächst schwarze, kreideähnliche Grünkörper seine Farbe, bis am Ende ein opak weißer, harter Formkörper vorliegt.

Die vorliegenden Grünkörper bestehen aus einer uniaxial gepressten Pulvermischung mit einer Teilchengröße von nur ca. 10 µm.

Zusammensetzung der Pulvermischung:

- Ein Oxidkeramik-Pulver (Zirconiumdioxid, ZrO_2)
- Als reaktive Komponente eine intermetallische Verbindung (Zirconiumdisilicid, $ZrSi_2$)
- Als Presshilfsmittel ein Binder auf Silizium-Basis (Polymethylsilsesquioxan, PMSS), ein sogenannter low-loss-binder. (Abb. 2-1)

Abb. 2-1: Fließbild zur Herstellung der $ZrSiO_4$ -Keramik nach: [53]



Der verwendete Binder hat gegenüber konventionellen Bindern den Vorteil, dass er beim keramischen Brand nicht völlig verbrennt, sondern teilweise keramisiert wird, was die Sinterschrumpfung weiter vermindert. Das Zirkoniumdioxid reagiert am Ende mit den Oxidationsprodukten des Silicids und des Polysiloxans zur gewünschten Keramik (ZrSiO_4). Durch die mit der Oxidation des ZrSi_2 verbundenen Volumenzunahme, lässt sich also die zu erwartende Schrumpfung des Körpers weitestgehend ausgleichen. Voraussetzung ist allerdings eine konstante Pressdichte des Grünkörpers [53].

2.1.2 In-Ceram[®]-Alumina Keramik

Bei den modernen Materialien besitzen die Oxidkeramiken einige für die Zahnheilkunde interessante Eigenschaften. Speziell die Aluminiumoxidkeramik (Al_2O_3) spielt hier eine herausragende Rolle. Das von Dr. Sadoun entwickelte In-Ceram-System[®] ist ein aus zwei Komponenten bestehendes Keramiksystem, bei dem zunächst eine Primärstruktur aus Aluminiumoxid porös gesintert und dieses Grundgerüst anschließend mit einem Spezialglas (Lanthanglas) infiltriert wird. Das Grundgerüst besteht ausschließlich aus zusammengebackenen (nicht aufgeschmolzenen) Aluminiumoxidteilchen (Korngröße ca. 3 μm). Bei der Infiltration wird das zunächst offenporige Aluminiumoxidgerüst vollkommen homogen und porenfrei, woraus seine hohe Festigkeit resultiert. Durch das Aufbrennen weiterer Schichten üblicher dentalkeramischer Massen, erhält die Restauration ihre endgültige Form und Farbe. Die Herstellung der kompletten Restauration aus In-Ceram[®]-Keramik scheitert an der opak weißen Farbe des Materials, was in ästhetisch wichtigen Bereichen zu unbefriedigenden Ergebnissen führen würde. Im Gegensatz zu den lediglich aluminiumoxidverstärkten Glaskeramiken liegen die Aluminiumoxidteilchen nicht frei in der Matrix sondern dicht nebeneinander, so dass nur noch die dazwischen liegenden Lücken mit Glas gefüllt werden. Sich ausbildende Mikrorisse treffen in diesem Gefüge sofort auf ein Aluminiumoxid-Teilchen und werden so am Weiterlaufen gehindert.

Die zuerst im Schlickerverfahren nach der Markteinführung des Materials 1989 hergestellten Gerüste konnten seit 1993 eine deutliche Verbesserung der mechanischen Werte, durch die Herstellung industriell gefertigter In-Ceram[®]-

Rohlinge erzielen, die dann allerdings maschinell bearbeitet werden müssen (z.B. mit dem Celay-System[®] (Fa. Mikrona, Schweiz). Die guten mechanischen Eigenschaften resultieren aus den idealer verteilten Porositäten und die stärkere Versinterung der Partikel, als dies bei der Schlickertechnik seither möglich war [104]. Darüber hinaus ist durch die Herstellung von Rohlingen, die Sinterschrumpfung, die beim In-Ceram-Verfahren[®] zwar nur sehr klein ist, bereits abgelaufen. Diese Gerüste können auch besser mit Glas infiltriert werden, da die Aluminiumoxidpartikel beim Sinterungsprozess noch dichter gepackt werden, woraus kleinere Kapillarräume resultieren, die aufgrund der höheren Kapillarkräfte den Infiltrationsprozess deutlich schneller ablaufen lassen [97, 104, 116]. Im Vergleich mit vorher bekannten vollkeramischen Systemen, besitzt die In-Ceram[®]-Keramik eine drei- bis vierfach höhere Biegefestigkeit, die damit auch Brückenkonstruktionen ermöglicht [12, 104].

Für die Untersuchung wurden sechs Celay-In-Ceram Alumina Blanks[®] AC-12 (Firma Vita /Bad Säckingen) aus der laufenden Produktion zur Verfügung gestellt. Es handelt sich dabei um Rohlinge für die Celay-Technik[®], bei denen der Aluminiumoxidgehalt auf 80% erhöht wurde und laut Herstellerangaben nach der Infiltration mit speziellen Lanthangläsern Festigkeitswerte erreicht, die im Bereich hochreinen Aluminiumoxids liegen und eine gute Bruchzähigkeit aufweisen [34]. Durch ihre poröse Struktur und damit relativ geringen Härte, sind die Rohlinge gut für die zerspanende Bearbeitung geeignet, was auch die Herstellung selbst dünn auslaufender Ränder ermöglicht. Die Rohlinge haben eine Kantenlänge von 9,5 x 11 mm und eine Höhe von 14,5 mm. Sie werden aufgeklebt auf einem speziellen Metallträger, der den direkten Einbau in das Celay[®]-Gerät ermöglicht, geliefert. Für den Einsatz in der bei dieser Untersuchung eingesetzten Schleifeinheit, musste zunächst ein spezieller Sockel hergestellt werden, der die Fixierung in der Klemmvorrichtung der Schleifeinheit ermöglicht. (Abb. 2-18)

2.2 Verwendete diamantierte Schleifkörper und Hartmetall-Instrumente

In der vorliegenden Arbeit wurden zum einen zylindrische, diamantierte Schleifkörper (Normal- und Feinstkorn (Gelbring)), sowie zylindrische Hartmetallfräser und -finierer der Firma Komet / Brasseler (Lemgo) verwendet.

Diamant-Schleifkörper:

Normalkörnung:

ISO 806 314 110 524 012

(Durchmesser 1,2 mm; zylindrisch; Kanten nicht gerundet; Länge des Arbeitsteils 6 mm; Gesamtlänge \cong 21,2 mm)

Die Korngröße liegt durchschnittlich zwischen 63 und 125 μm (ISO-Nummer 524). Die Rundlaufgenauigkeit wurde von Lang [72] mit etwa 40 μm angegeben.



Abb. 2-2: Diamantschleifkörper

Feinstkörnung:

ISO 806 314 157 504 012

(Durchmesser 1,2 mm; zylindrisch; Kanten gerundet; Länge des Arbeitsteils 6 mm; Gesamtlänge \cong 21,0 mm.)

Die Korngröße beträgt durchschnittlich 15 μm (ISO-Nummer 504). Die Rundlaufgenauigkeit wird von Lang [72] mit 22 μm angegeben. (Tab. 2-2)

Hartmetallinstrumente:

Hartmetall-Fräser:

ISO 500 314 110 006 012

(Durchmesser 1,2 mm; zylindrisch; Kanten nicht gerundet; Länge des Arbeitsteils 6 mm; Gesamtlänge \cong 20,0 mm; gewundene Verzahnung; sechs Schneiden)

Sie sind zwar etwas weniger schnittfreudig als die gerade Verzahnten, dafür laufen sie aber wesentlich ruhiger und ergeben somit bessere Oberflächen. [2, 3]

Hartmetall-Finierer:

ISO 500 314 157 072 012

(Durchmesser 1,2 mm; zylindrisch; Kanten gerundet; Länge des Arbeitsteils 6 mm; Gesamtlänge \cong 21,0 mm; gewundene Verzahnung; 12 Schneiden)

Durch die etwas höhere Gesamtlänge, mussten die Hartmetallfinierer manuell um etwa 1,5 mm gekürzt werden, damit bei der Nachpräparation die Spitze des Instrumentes nicht im Vollmaterial arbeitet. (Abb. 2-22)



Abb. 2-3: Hartmetallinstrumente

Zur Bearbeitung werden Instrumentenpaare für die Grob- und Feinbearbeitung gebildet, die auch während des gesamten Versuches nicht getrennt werden.

Nach einer von Lang [72] durchgeführte Untersuchung über das Abnutzungsverhalten diamantierter Schleifkörper verschiedener Hersteller, lieferte die Fa. Komet (Lemgo), neben einigen anderen Herstellern, Instrumente hoher Qualität, welche die für die Untersuchung notwendigen Parameter wie: Standzeit, Rundlaufgenauigkeit, konstante Herstellungspräzision und Steifigkeit aufwiesen.

Durch die Verwendung von Instrumentenpaaren, jeweils zur Grob- und anschließenden Feinbearbeitung, werden die durch den erhöhten Verschleiß der zur Grobbearbeitung verwendeten Instrumente, auftretenden Dimensionsänderungen des Probenkörpers, durch die anschließende Nachbearbeitung mit Finierern reduziert und z.T. Randfrakturen, die durch die Grobbearbeitung entstanden, beseitigt. Finierer verschleifen durch ein kleineres zu zerspanendes Volumen langsamer, sie sind in Bezug auf die Geometrie exakter gefertigt und zeigen eine geringere Rundlaufabweichung.

2.3 Die Schleifvorrichtung, Hard- und Software

Für die vorliegende Arbeit wurde die Schleifvorrichtung des CAC-Prototypen nach Becker [12] verwendet. (Abb. 2-4 / 2-5) Dabei handelt es sich um eine computergesteuerte, zweiachsige Bearbeitungseinheit. Sie besteht aus einem KaVo-Rotring-Winkelstück (Übersetzung 4:1 / Fa. KaVo, Lemgo), welches auf einem Schlitten befestigt ist, der sich auf einem Kreuztisch mit umlaufender Kugellagerführung, in horizontaler Ebene (x-, y- Achse) bewegen lässt. Bewegt wird der Schlitten von zwei senkrecht zueinander angeordneten linearen Schrittmotoren (Firma Vexta; Oriental Motor Co., Ltd., Japan) (Abb. 2-6), die über mit den Motorachsen fest verbundenen Gewindespindeln und passenden Muttern am Schlitten, die Drehbewegung in eine lineare Bewegung umwandeln. (Abb. 2-7)

Die Schrittmotoren ermöglichen in Verbindung mit der geringen Steigung des Gewindes (M5-Feingewinde, d.h. eine Umdrehung bewegt die Mutter um 0,5 mm linear), pro Schrittpuls von der Steuereinheit, eine Bewegung des Schlittens um lediglich 0,625 μm , was eine sehr exakte lineare Positionierung erlaubt. Die Motoren führen keine fließende Drehbewegung aus, sondern bewegen sich im sogenannten Halbschrittbetrieb bei jedem Steuerimpuls um 0,45°, d.h. für eine komplette Umdrehung sind 800 Steuerimpulse nötig.

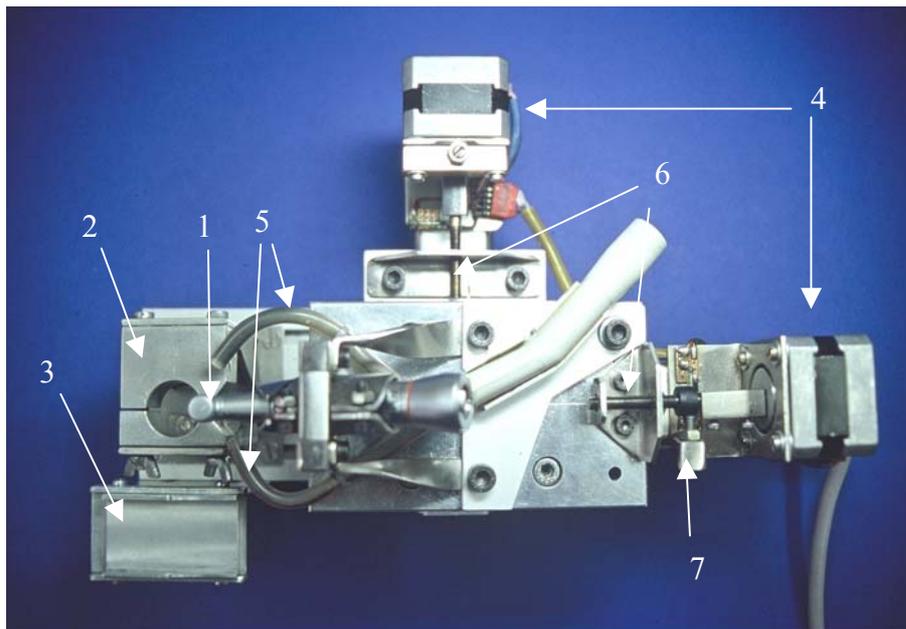


Abb. 2-4: Schleifeinheit von oben

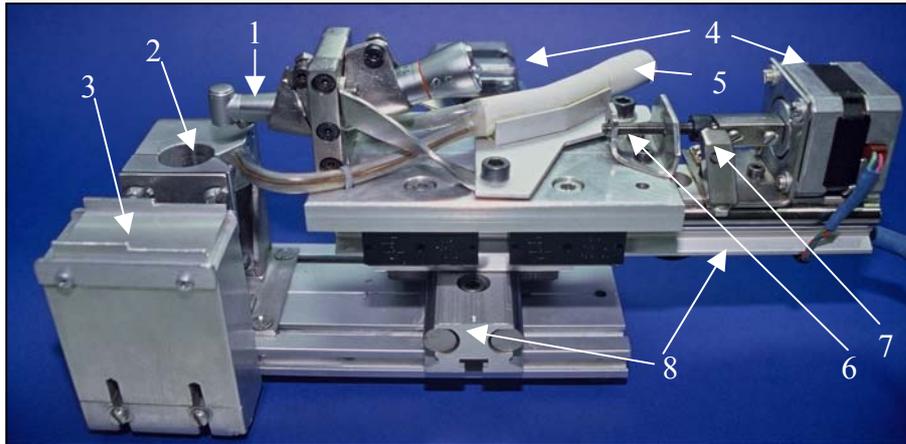


Abb. 2-5: Schleifeinheit von der Seite

- | | |
|---|---------------------------------------|
| 1. Rotring-Winkelstück Fa. KaVo (Lemgo) | 5. Absaugung |
| 2. Spannvorrichtung | 6. Gewindespindeln |
| 3. Auflage für Mikrometerschraube | 7. Reibrad |
| 4. Schrittmotoren | 8. Gleitschienen mit Umlaufkugellager |

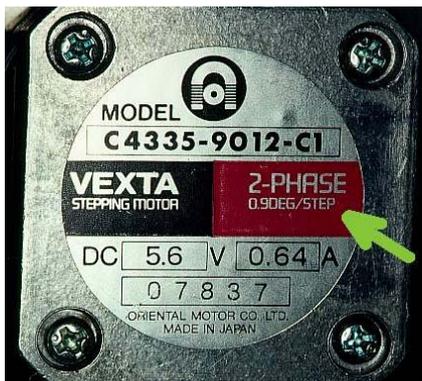


Abb. 2-6 : Schrittmotor

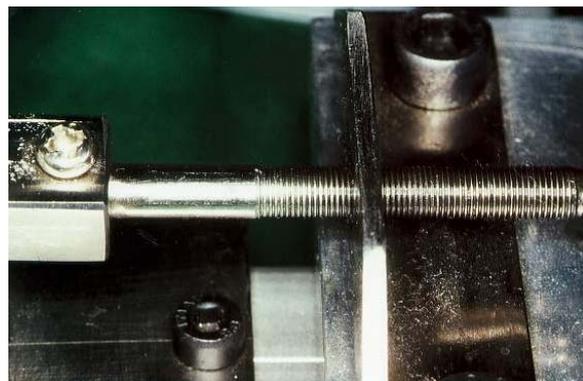


Abb. 2-7 : Gewindespindel

Durch die geringe Gewindesteigung der Spindel steht eine sehr hohe Kraft zur Verfügung den Schlitten in jede gewünschte Position zu bringen.

Auf Wegaufnehmer oder Mikrokontroller zur Positionskontrolle des Schlittens wurde beim Prototyp verzichtet, da der Computer die Anzahl der zurückgelegten Schritte kennt und so auch dessen Position genau bekannt ist (sofern alle Schritte auch wirklich ausgeführt werden). Die An-



Abb. 2-8: Steuerinterface

steuerung der Schrittmotoren erfolgt über ein Steuerinterface (Abb. 2-8), welches die Daten der Schleifbahnen von einem Computer in Steuersignale umwandelt. Eine spezielle CAC-Software erlaubt die Konstruktion der Bahnkurven, die das Instrument zurücklegen soll.

Die Schleifeinheit wird zum Antrieb des Winkelstücks, sowie zur Absaugung des Wassersprays an eine Sirona M1-Einheit (Fa. Sirona, Bensheim) angeschlossen. Die Proben können über zwei Schrauben in der Spannvorrichtung (Abb. 2-4, Nr. 2) befestigt werden. Eine eigens für die Mikrometerschraube konstruierte höhenverstellbare Auflage (Abb. 2-4, Nr.3) ermöglicht das reproduzierbare Vermessen der Proben an zwei festgelegten Messpunkten. (Abb. 2-11)

2.4 Die Messvorrichtung

Zur Vermessung der Instrumente und der Proben wurde eine digitale Mikrometerschraube der Fa. Conrad Electronic GmbH Hirschau mit einem Messbereich von 0-25 mm, einer Auflösung von 0,001 mm und einem Anzeigefehler von max. 0,002 mm eingesetzt. Sie besitzt eine Drehmomentratsche, die einen gleichbleibenden Druck der Messbacken auf den Probenkörper ermöglicht. Regelmäßige Eichung mit Hilfe eines 4 mm Endmaßes (nach DIN 861, Klasse 0), soll die Präzision der Messwerte konstant hoch halten. (Abb. 2-9)



Abb. 2-9 : Mikrometerschraube mit Endmaß

2.5 Technischer Ablauf

2.5.1 Vorbereitung

2.5.1.1 Voralterung der diamantierten Schleifkörper

Die Voralterung diamantierter Schleifkörper ist, wie von anderen Autoren bereits belegt [72, 113, 129], notwendig, da es zu einer anfänglich erhöhten Abnutzung der Diamantinstrumente kommt. Nur locker in der Oberfläche des Schleifkörpers verankerte Diamantkörner gehen verloren und die am weitesten vorragenden Diamantkörner werden als erstes abgenutzt. Dadurch nimmt zwar der Durchmesser durchschnittlich um ca. 25 μm (Normalkörnung) (Tab. 2-1) ab, es sind aber Präparationen mit konstanteren Ergebnissen in Bezug auf die Dimensionstreuung und Oberflächenqualität des Probenkörpers zu erwarten. Die Wirkrautiefe wird verkleinert, sowie die Anzahl der Schleifkörner, die an der Zerspaltung teilnehmen, vergrößert.

Die Voralterung erfolgte an einer Vita Mk II-Keramik[®] (Fa. Vita, Bad Säckingen) mit Hilfe der Schleifvorrichtung. An dem Keramikblock wurden dazu jeweils ein Volumen von 150 mm³ für normalgekörnte und 20 mm³ für feinstgekörnte Schleifkörper abgetragen. Diese Werte entstammen der Arbeit von Lang [72].

2.5.1.2 Vermessen der Schleifkörper

Um vergleichbare Messwerte an den einzelnen Schleifkörpern zu erzielen, wurden diese für die Messung in eine Haltevorrichtung mit variablem Tiefenanschlag eingespannt. (Abb. 2-10) Dadurch war gewährleistet, dass bei allen Schleifkörpern an der gleichen Stelle (1 mm bzw. 3 mm von der Spitze) gemessen wurde. Oberhalb von 5 mm kommt es fertigungsbedingt am diamantierten Arbeitsteil zu einer überproportionalen Durchmesserzunahme. (Abb. 2-11) Durch die Haltevorrichtung war außerdem gewährleistet, dass sich die Schleifkörper während

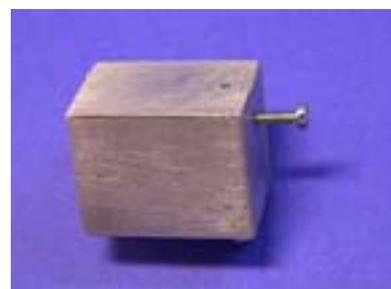


Abb. 2-10 : Halterung zum Vermessen der Schleifkörper

des Messvorganges durch die Drehung der einen Messbacke beim Schließen nicht wegdrehen oder verkanten konnten.

An jedem Schleifkörper wurden in jeder Messebene fünf Messungen mit der Mikrometerschraube durchgeführt und aus den Messwerten dann das arithmetische Mittel gebildet. (Tab. 2-1/ 2-2)

Die Messergebnisse an den diamantierten Schleifkörpern sind nicht so exakt wie bei den Hartmetallern. Dies resultiert aus der ungleichmäßigen Verteilung der Diamantkörner auf der Oberfläche der Schleifkörper.

Die Schleifkörper wurden jeweils *fabrikneu*, sowie nach der *Voralterung* vermessen und die Konizität des Arbeitsteils berechnet. Es zeigt sich, dass bei den fabrikneuen diamantierten Schleifkörpern der Durchmesser z.T. deutlich unter dem erwarteten Wert von 1,2 mm liegt und durch die Voralterung noch mal um durchschnittlich 0,025 mm (Normalkörnung) und 0,005 mm (Feinstkörnung) abnimmt. (Tab. 2-1/ 2-2) Die Abweichungen der neuen Schleifkörper bewegen sich aber noch in der Toleranz der ISO-Norm.

Die Tabellen 2-1 bis 2-4 zeigen, dass die eigentlich als zylindrisch angegebene Arbeitsteile der neuen Instrumente eine leichte Konizität zur Stirnfläche hin aufweisen. So besitzen die Normalkorndiamanten eine durchschnittliche Konizität von $1,29^\circ$ (Abb. 2-12). Bei den Feinstgekörnten fällt sie mit durchschnittlich $0,37^\circ$ deutlich geringer aus.

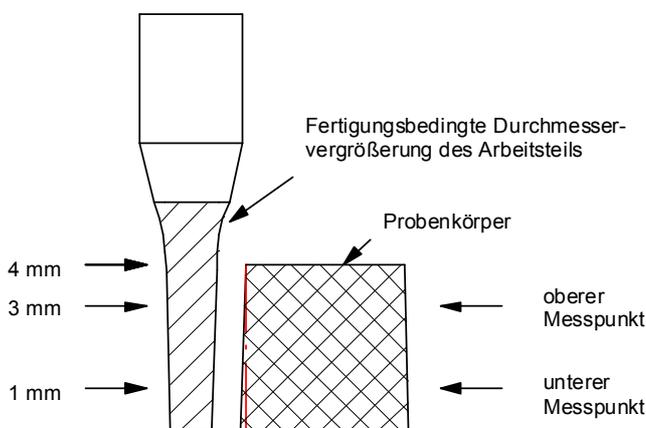


Abb. 2-11 : Skizze der Messpunkte

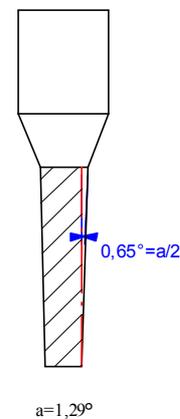


Abb. 2-12 : Durchschnittliche Konizität der fabrikneuen Schleifkörper (Normalkörnung)

Bei den Hartmetallinstrumenten ist sie nur sehr gering ausgeprägt und beträgt bei den Fräsern und den Finierern nur rund $0,23^\circ$.

Bei den Hartmetall-Instrumenten fand keine Voralterung statt.

Tab. 2-1 : Diamantierte Schleifkörper (Normalkörnung) (Angaben in mm)

Nr.	Spitze (1mm)		Mitte (3mm)		Länge	Konizität	
	neu	voralt	neu	voralt		neu	voralt
1	1,152	1,124	1,199	1,163	21,2	$1,35^\circ$	$1,12^\circ$
2	1,159	1,150	1,194	1,183	21,2	$1,00^\circ$	$0,95^\circ$
3	1,154	1,120	1,199	1,163	21,2	$1,29^\circ$	$1,23^\circ$
4	1,164	1,141	1,217	1,182	21,1	$1,52^\circ$	$1,18^\circ$

Tab. 2-2 : Diamantierte Schleifkörper (Feinstkörnung) (Angaben in mm)

Nr.	Spitze (1mm)		Mitte (3mm)		Länge	Konizität	
	neu	voralt	neu	voralt		neu	voralt
1	1,176	1,175	1,188	1,183	21,1	$0,34^\circ$	$0,23^\circ$
2	1,160	1,154	1,175	1,173	21,0	$0,43^\circ$	$0,54^\circ$
3	1,169	1,161	1,184	1,177	21,1	$0,43^\circ$	$0,46^\circ$
4	1,198	1,192	1,208	1,200	21,0	$0,29^\circ$	$0,23^\circ$

Tab. 2-3 : Hartmetallfräsen (Werte an neuen Instrumenten ermittelt) (Angaben in mm)

Nr.	(1mm)	(3mm)	Länge	Konizität
1 HM	1,188	1,197	20,1	$0,26^\circ$
2 HM	1,219	1,227	20,0	$0,23^\circ$

Tab. 2-4 : Hartmetallfinierer (Werte an neuen Instrumenten ermittelt) (Angaben in mm)

Nr.	(1mm)	(3mm)	Länge	Konizität
1 HMF	1,157	1,165	21,0	$0,23^\circ$

2.5.2 Vorversuch

Aufgrund der sehr weichen kreideartigen Struktur des Grünkörpers, war es zunächst notwendig Erfahrungen mit der Bearbeitung zu sammeln. Es standen aus Kostengründen aber nicht genügend Zirkonoxid-Blöcke zur Verfügung, um verschiedene Bearbeitungsparameter daran zu überprüfen. Deshalb wurde als Material für die Vorversuche Graphit gewählt, welches von der Härte und Konsistenz sehr ähnliche Eigenschaften aufweist.

Aus einem Plattenmaterial wurden zunächst Zylinder mit ca. 15 mm Durchmesser und 10 mm Höhe hergestellt. (Abb. 2-13) Sie wurden auf den für die Zirkonoxidkeramik hergestellten Haltesockel mit einem handelsüblichen Zweikompo-

nentenkleber aufgeklebt, um sie zur Bearbeitung in die Schleifeinheit einspannen zu können.

Drei einzelne Präparationen wurden auch an Vita Mk II-Keramikhlingen (Fa. Vita / Bad Säckingen) durchgeführt.

Ziel der Vorversuche war es, die einzelnen Parameter, die Einfluss auf die Geometrie der Probekörper haben können, zu bestimmen.



Abb. 2-13 : Graphitblock

Zu überprüfende Fragestellungen:

- Sind die gewählten Instrumente für die Art der Keramik geeignet?
- Besteht die Notwendigkeit die Spraykühlung beim Präparieren einzusetzen und wenn ja, welche Menge ist ausreichend?
- Wie hoch sollte die Geschwindigkeit des Vortriebs gewählt werden?
- Welche Umdrehungsgeschwindigkeit der Instrumente ist notwendig?
- Sind die am Computer konstruierten Ausräumfunktionen vor der eigentlichen Präparation umsetzbar und erlauben sie die Vermessung der Proben mit der Mikrometerschraube?
- Wahl der richtigen Vorlast an den Schrittmotoren.

2.5.2.1 Ergebnisse der Vorversuche

Bei der kreideartigen Zirkonoxidkeramik lag die Überlegung nahe, diese mit Hartmetallinstrumenten zu bearbeiten. Bei den Vorversuchen an Graphitblöcken erzielte man mit diesen Instrumenten unter maximaler Spraykühlung bei der Grobbearbeitung Proben mit einer relativ glatten Oberfläche. Visuell und akustisch war kein Zusetzen der Instrumente erkennbar, so dass nichts gegen den Einsatz an der Zirkonoxidkeramik sprach. Bei der Bearbeitung mit Hartmetallfinierern zeigten sich allerdings an der Oberfläche wellige Unebenheiten, die aber nicht so stark ausfielen, um diese Bearbeitungsart grundsätzlich zu verwerfen. Auch der Einsatz diamantierter Schleifkörper war möglich und lieferte ähnliche Ergebnisse.

Es konnte nicht auf die maximale Spraykühlung (ca. 60 ml/min) verzichtet werden, da es sonst sofort zum Zusetzen der Instrumente mit folgender Beschädigung der Instrumente bzw. der Probenkörper kam. Alle Präparationen wurden mit maximaler Umdrehungszahl von 120.000 U/min durchgeführt.

Für die Vermessung der Proben mussten die Bereiche, die bei der Kreispräparation seitlich an dem Probenzylinder stehen bleiben, maschinell entfernt werden, um die Messbacken der Mikrometerschraube anlegen zu können. Dieses maschinelle Ausräumschleifen vor der eigentlichen Präparation der Proben war nötig, da aufgrund der beengten Verhältnisse in der Schleifeinheit beim manuellem Entfernen dieser Bereiche das Risiko zu hoch ist, zuviel Material abzutragen, wodurch dann eventuell für die Präparation des benachbarten Probenkörpers zu wenig Material vorhanden gewesen wäre. Außerdem wurde durch das vorherige Ausräumschleifen auch der Anteil der Bahnkurve, die das Instrument bei der eigentlichen Präparation im Vollmaterial zurücklegen musste, reduziert. (Abb. 2-14) Diese Ausräumfunktionen wurden ebenfalls mittels der Computersoftware erstellt und von der Schleifeinheit ausgeführt.

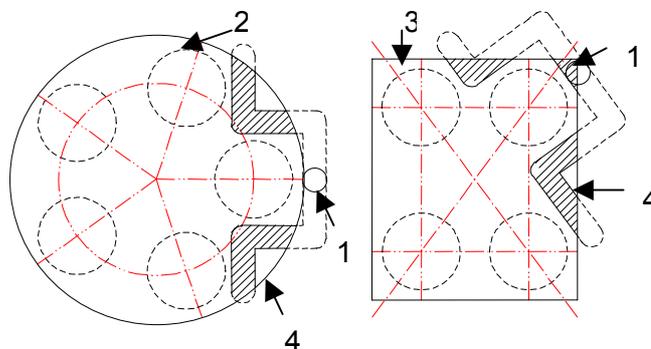


Abb. 2-14: Ausräumfunktionen vor der eigentlichen Präparation

1. Instrument
2. Zirkonoxidrohling
3. In-Ceram[®]-Rohling
4. Bereiche, die aufgrund ihres geringen Querschnitts während des Ausräumschleifens von selbst wegbrachen

Des Weiteren musste an den Schrittmotoren eine Vorlast, über ein auf der Motorwelle angebrachtes Gummireibrad, (Abb. 2-15) eingestellt werden, um auftretende Schwingungen des Rotors im Schrittmotor während der Ansteuerung zu unterbinden, wie bereits in [12] beschrieben.

Diese Schwingungen können zu unkontrollierten Schrittfolgen und Sprüngen des Motors führen, was Auswirkungen auf die Präzision der hergestellten Proben hat. Die Vorlast wird also über eine Klemmschraube gerade so hoch gewählt, dass der Rotor nie lastfrei arbeitet, sein Drehmoment aber trotzdem ausreicht den Schlitten zu bewegen. Sie ist dann richtig gewählt, wenn die Stellung der Motoren zu Beginn und Ende eines Schleifdurchganges identisch ist.

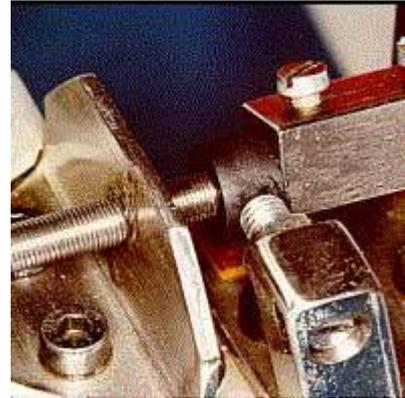


Abb. 2-15 : Stellschraube

2.5.3 Hauptversuche

2.5.3.1 Versuchsaufbau

Die Zirkonoxidkeramik-Rohlinge wurden zum Beschleifen auf einen aus nichtrostendem Stahl gefertigten Sockel mittels eines handelsüblichen Zweikomponentenklebers aufgeklebt, um sie in die Schleifeinheit einspannen zu können. Für einen neuen Keramikblock ließ sich der Kleber leicht mit einem Messer von der Sockeloberfläche entfernen. Die Rohlinge sind somit in der Spannvorrichtung um ihre senkrechte Achse dreh- und verschiebbar gelagert und können durch zwei Schrauben in jeder gewünschten Position sicher fixiert werden.

Durch die fehlende Beweglichkeit des Schlittens in vertikaler Richtung müssen die Rohlinge mittels eines Höhenanschlages manuell justiert werden, um eine

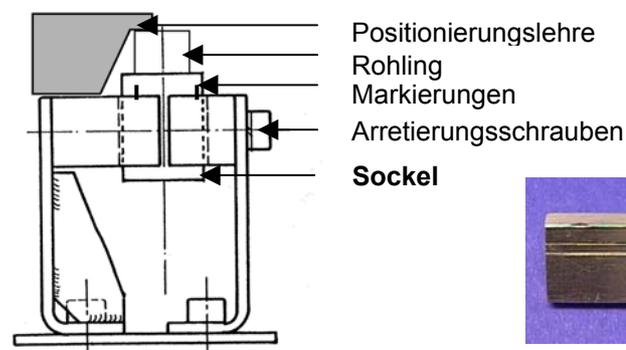


Abb. 2-16 : Einsatz der Positionierungslehre

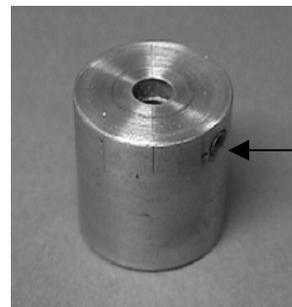


Abb. 2-17: Positionierungslehre

gleichbleibende Präparationstiefe von 4 mm einzuhalten. (Abb. 2-16 / 2-17)

Um die Rohlinge für den nächsten Präparationsvorgang in der selben Ebene definiert weiterdrehen zu können, wurden mit Hilfe eines Winkelteilkopf-Geräts fünf Markierungen im Abstand von exakt 72° auf dem Umfang des Sockels angebracht.

Für die In-Ceram[®]-Rohlinge, musste ebenfalls zunächst ein spezieller Sockel hergestellt werden, der die Fixierung in der Spannvorrichtung der Schleifeinheit ermöglichte. Dazu wurde ein Zylinder mit 19 mm Durchmesser aus einem nicht-rostenden Material hergestellt und mit einer zentralen Bohrung zur Aufnahme der Halterung des Rohlings versehen. Der Keramikrohling konnte seitlich von einer Schraube im Zylinder geklemmt werden. Ferner wurden am Umfang des Zylinders vier Markierungen in 0° , 80° , 180° und 260° angebracht, um die Rohlinge jeweils um exakt diese Winkel in der Schleifeinheit drehen zu können.



Klemmschraube

(Abb. 2-18)

Abb. 2-18 :
Halterung für In-Ceram

Für die Präparationen wurde zunächst mit Hilfe der in Abb. 2-14 beschriebenen Ausräumfunktion Platz für die spätere Vermessung des Probenzylinders geschaffen.

Die eigentliche Bearbeitung des Zylinders erfolgt durch Konstruktion der Bahnkurve. Dazu wird mittels der CAC-Software zunächst ein Quadrat mit der Kantenlänge 5,2 mm gezeichnet und durch Einstellen eines Verrundungsradius von 2,6 mm zu einem Kreis mit 5,2 mm Durchmesser transformiert. Dieser Kreis beschreibt die Bahnkurve, die die Schleifkörperrotationsachse zurücklegen soll. Bei einem Instrumentendurchmesser von 1,2 mm bleibt theoretisch in der Mitte ein Zylinder mit exakt 4,0 mm Durchmesser stehen. (Abb. 2-19)

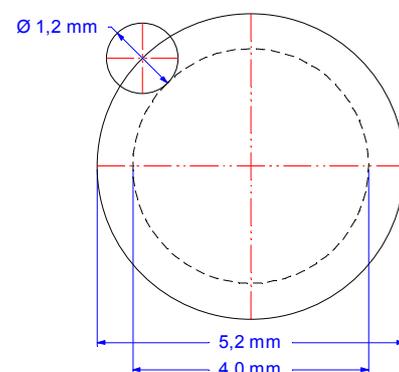


Abb. 2-19 : Schleifbahn

Diese Kurve wird nun genutzt, um mit einem groben Instrument (Normalkorndiamant bzw. Hartmetallfräser), vorzupräparieren, diesen entstehenden Zylinder zu vermessen und ihn dann mit einer weiteren, um 0,4 mm kleineren Bahnkurve und einem Finierinstrument nach zu bearbeiten.

Beide Schleifgänge werden mit höchster Drehzahl (120.000 U/min) und voller Spraykühlung (ca. 60 ml/sec) durchgeführt.

Zunächst wird das Winkelstück manuell bis zum Kontakt mit dem Rohling herangefahren. Erst dann wird die Schleifeinheit gestartet und das Programm fährt die vorgegebene Bahn ab. Dabei erfolgen die Rotation des Instrumentes, sowie der Verlauf der Bahnkurve im Uhrzeigersinn. Dies bedeutet, dass ein „Gleichlaufschleifen“ stattfindet (der Schneideneingriff und der Vorschub erfolgen gleichsinnig). (Abb. 1-2)

Jeweils nach Ende eines Schleifvorganges bewegt sich der Schlitten in eine zuvor festgelegte Parkposition zurück, in der das zur Vorpräparation genutzte Instrument gegen den dazugehörigen Finierer getauscht werden kann. Der entstandene Probenzylinder wird mittels der Mikrometerschraube an zwei Messpunkten (jeweils 1 mm von der oberen und der unteren Kante entfernt) vermessen, was nur durch die leichte Konizität des Probenzylinders möglich ist. (Abb. 2-20 / 2-11) Dazu wird die Mikrometerschraube auf einer Auflage an der Schleifeinheit abgestützt, da jegliche Kräfte, die beispielsweise durch das Verkanten der Messbacken auf die Proben einwirken, unweigerlich zum Brechen des Zirkonoxidzylinders führen würde. (Abb. 2-21) Um bei jeder Probe möglichst genau in der gleichen Höhe der beiden Messpunkte zu messen, ist die Auflage um 2 mm in der Höhe verstellbar. Nach der Messung wird nun im Programm der erste Verfahrensweg konzentrisch um 0,2 mm nach innen verlegt, wodurch ein Kreis mit 4,8 mm Durchmesser entsteht. Fährt die Schleifeinheit nach Tauschen des groben Instrumentes gegen ein Finierinstrument die neue Bahn ab, werden an der Zylinderoberfläche zirkulär 0,2 mm abgetragen und es resultiert ein Zylinder mit theoretisch 3,6 mm Durchmesser. (Abb. 2-22)

Die Finierinstrumente müssen allerdings um wenige $\frac{1}{10}$ mm kürzer eingespannt werden, um zu vermeiden, dass die Spitze im Vollmaterial arbeitet, was durch die geringe Abtragsleistung der Stirnfläche zu erhöhter Abnutzung und unerwünschten Auslenkungen des Instrumentes führen würde. Da bei den Diamantfinierern der Schaft ohnehin etwas kürzer ausfällt als bei den Normkorndiamanten, war dies leicht möglich. Nur bei den Hartmetallern musste die Schaftlänge der Finierer manuell mit einem Heatless-Stein ein wenig reduziert werden.

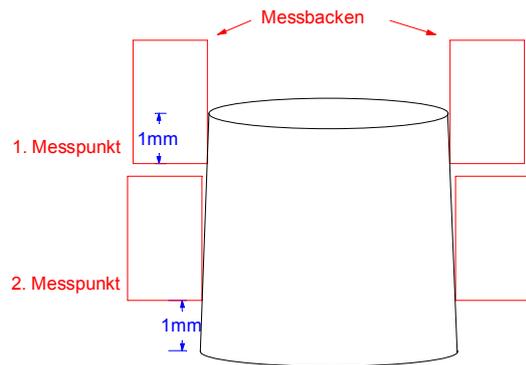


Abb. 2-20 : Messpunkte am Zylinder



Abb.: 2-21 : Vermessung der Zirkonoxidkeramikproben

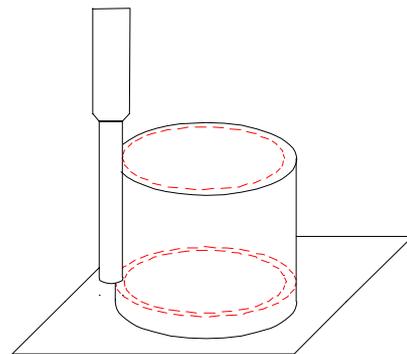


Abb. 2-22 : Schemazeichnung Feinbearbeitung

Nach der Feinbearbeitung wurde dann die Probe erneut vermessen. Erst nach Ende aller Präparationen in einer Ebene, wurden die Proben mittels einer selbst konstruierten Sägevorrichtung abgetrennt und die Oberfläche des Rohlings geglättet, um in der darunter liegenden Ebene entsprechend weitere Präparationen vornehmen zu können. Diese Sägevorrichtung erlaubt Trennschnitte von 0,4 mm Breite. (Abb. 2-23)

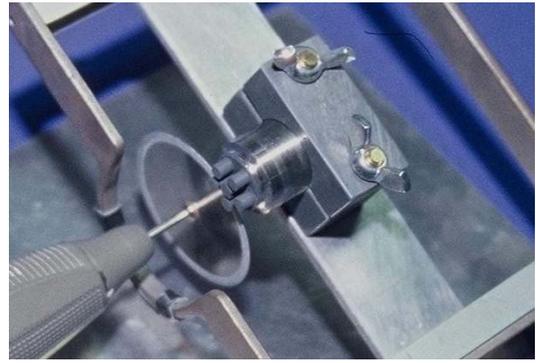


Abb. 2-23: Sägevorrichtung

2.5.3.1.1 Beschleifen der Zirkonoxid-Keramik

Dadurch, dass nur zehn Zirkonoxid-Rohlinge zur Verfügung standen, mussten möglichst viele Probenkörper pro Block erzeugt werden. Bei einem Durchmesser und einer Höhe der Rohlinge von 15 mm, waren insgesamt 15 Schleifvorgänge möglich. Dies bedeutet in drei Ebenen wurden jeweils fünf Zylinder mit einem Durchmesser und einer Höhe von 4 mm hergestellt. Dafür war es notwendig den



Abb. 2-24 : Bearbeitung der Zirkonoxidkeramik

Sockel nach erfolgter Präparation möglichst exakt um 72° weiterzudrehen, um bei der Präparation nicht den jeweils vorher präparierten Zylinder zu beschädigen. (Abb. 2-24 / 2-25)

Bei der Zirkonoxid-Keramik musste der Vortrieb auf die kleinste mögliche Geschwindigkeit ($64 \mu\text{m}/\text{sec}$) reduziert werden, um es der Spraykühlung des Winkelstücks zu ermöglichen, den anfallenden Schleifstaub abzutransportieren. Höhere Geschwindigkeiten führten durch das Zusetzen der Instrumente zur Beschädigung der Proben. Lediglich bei den Ausräumfunktionen, bei denen kleinere Frakturen des Materials tolerierbar waren, konnte mit einem Vortrieb von $100 \mu\text{m}/\text{sec}$ gearbeitet werden.

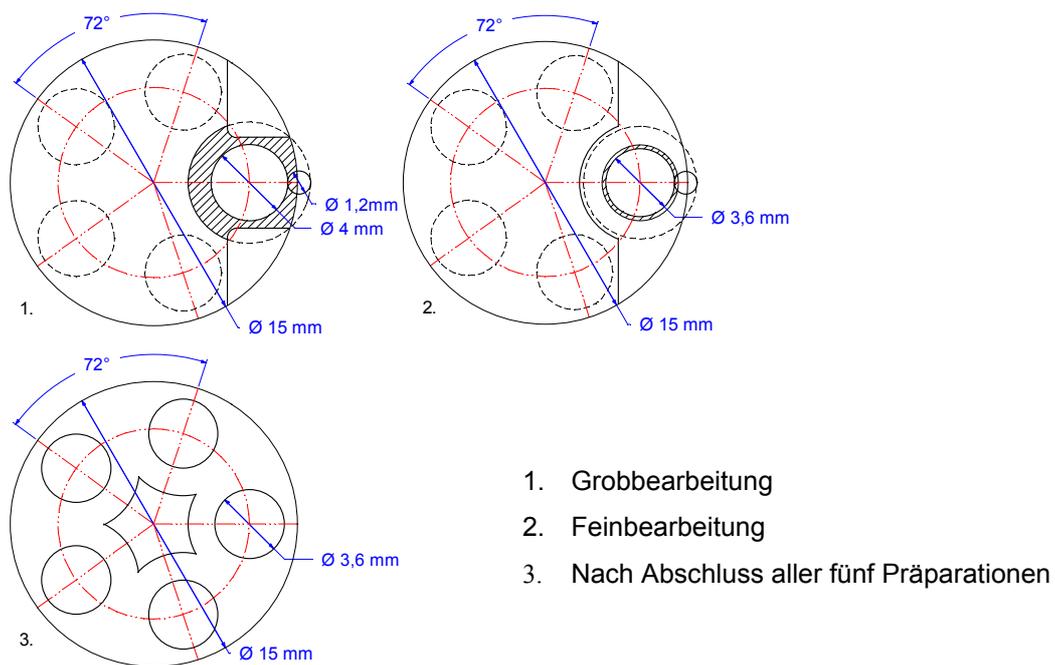


Abb. 2-25: Grob- und Feinbearbeitung der Zirkonoxidkeramik

2.5.3.1.2 Beschleifen der In-Ceram-Alumina-Blanks[®]

In einem Zusatzexperiment wurden mit einem Schleifkörperpaar In-Ceram-Alumina-Blanks[®] bearbeitet. Bei den In-Ceram[®]-Rohlingen konnten pro Block insgesamt 8 Probenkörper (jeweils vier in zwei Ebenen) hergestellt werden. Da diese Keramik aber auch in ihrer relativ porösen Grundform eine große Härte besitzt, kann sie nur mit diamantierten Schleifkörpern bearbeitet werden. Auch hier wurden zunächst die Anteile die bei der Vermessung stören durch Ausräumfunktionen entfernt. Die Präparation, das Vermessen und Abtrennen erfolgte dann wie bei der Zirkonoxid-Keramik beschrieben.



Abb. 2-26: In-Ceram[®]

Bei der In-Ceram[®]-Keramik war eine Zustellung des Instrumentes von 100 µm/sec bei der Präparation und 200 µm/sec bei den Ausräumfunktionen möglich.

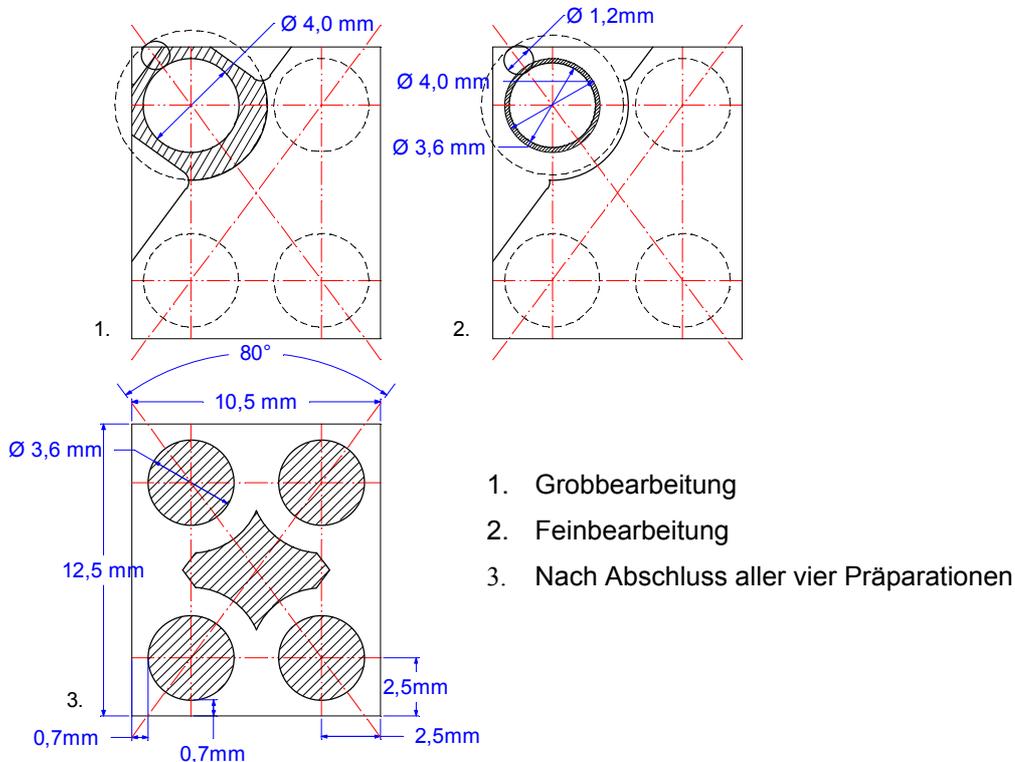


Abb. 2-27: Grob- und Feinbearbeitung der In-Ceram[®]-Keramik

2.5.3.2 Abtastung der Oberfläche der Probenkörper

Zur Bestimmung der Oberflächengeometrie der geschliffenen Probenkörper wurde ein Numerex Mehrkoordinaten-Messgerät[®] (CS 1518-12C) der Fa. Zeiss / Jena verwendet. (Abb. 2-28)

Insgesamt wurden 16 der 134 Zirkonoxid-Probenkörper vermessen und bei der Auswahl möglichst aus verschiedenen Ebenen der zehn Rohlinge ein Probenkörper zufällig ausgewählt. Das Gerät besteht aus einer massiven Grundplatte und einem, auf Luftlagern geführten, Messarm. Die erreichbare Auflösung der Abtas-

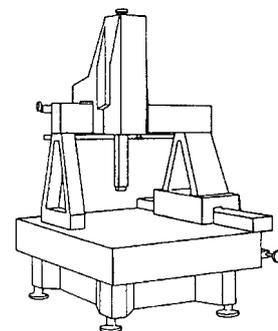


Abb. 2-28 : Schemazeichnung des Numerex Mehrkoordinaten-Messgerätes

tung wird mit $1\ \mu\text{m}$ bei konstanter Temperatur von 20°C ($\pm 3^\circ\text{C}$) angegeben. Bei der Messung wird der Tastarm, an dessen Ende sich eine Rubinkugel mit $1\ \text{mm}$ Durchmesser befindet, manuell an das Objekt herangeführt. Die Tastpunktaufnahme erfolgt über die Auslenkung des Tastkopfes. Dieser besitzt einen hochpräzisen, im μm -Bereich arbeitenden Mikroschalter. (Abb. 2-29) Im Auslösemoment werden die

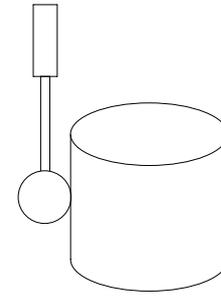


Abb. 2-29 : Schemazeichnung der Messung

Koordinaten sämtlicher Achsen eingelesen und zur Weiterverarbeitung an einen Rechner gesendet. Die Software arbeitet dann die gewonnenen Daten zum gewünschten Messergebnis auf. Das Messergebnis wird in Form einer Grafik als Abweichung der Messpunkte von der idealen Kreisform mit vorgegebenen Durchmesser angezeigt [96].

(Abb. 2-30) Als Grundform wurde ein Kreis mit $3,6\ \text{mm}$ angenommen, weil dies dem ideal zu erwartenden Querschnitt der Probenkörper nach der Feinbearbeitung entspricht. Die Messung erfolgte zirkulär etwa in der Mitte der Probenkörperhöhe. Dabei wurden 30 Messpunkte auf dem Umfang verteilt, was einem Abstand der Punkte von etwa $0,38\ \text{mm}$ entspricht.

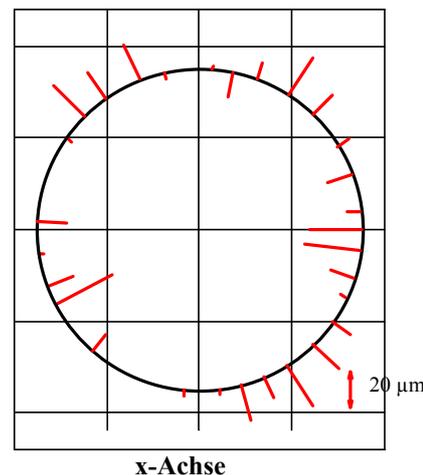


Abb. 2-30 : Beispielgrafik einer Messung (Die Länge der roten Linien gibt vergrößert die Abweichung des Durchmessers von einem angenommenen Wert von $3,6\ \text{mm}$ an)

2.6 Statistische Auswertungsmethoden

Die statistische Auswertung der Ergebnisse erfolgte mit Hilfe des Computerprogramms NCSS 2000[®] der Fa. Number Cruncher Statistical Systems / Kaysville (USA). Mit Hilfe dieses Programms wurden der Mittelwert, die Varianz, die Standardabweichung, der Pearsonsche Korrelationskoeffizient mit zugehörigem P-Wert, sowie die Perzentilwerte der Messreihen berechnet. Darüber hinaus

wurden die einzelnen Messreihen der Probendurchmesser (Zirkonoxid- und In-Ceram[®]-Keramik) auf Normalverteilung (Gaußsche Normalverteilung) überprüft, wobei folgende Normalverteilungstests zum Einsatz kamen :

- Shapiro-Wilk W
- Anderson-Darling
- Martinez-Iglewicz
- Kolmogorov-Smirnov
- D`Agostino-Skewness
- D`Agostino Kurtosis
- D`Agostino Omnibus

Folgende Messreihen wurden untersucht:

- für die Zirkonoxidkeramik:
 - die Datenreihen der drei verwendeten diamantierten Schleifkörperpaare Nr. 1, 2, 3 (Durchmesser der mit ihnen präparierten Probenkörper)
 - die absoluten Differenzen der Probendurchmesser zwischen zwei aufeinanderfolgenden Schleifdurchgängen des selben Schleifkörpers
- für die In-Ceram[®]-Keramik:
 - die Datenreihe des verwendeten Schleifkörperpaares Nr. 4 (Durchmesser der mit ihnen präparierten Probenkörper)
 - die absoluten Differenzen der Probendurchmesser zwischen zwei aufeinanderfolgenden Schleifdurchgängen des selben Schleifkörpers

Zur grafischen Darstellung der Abnutzung des jeweiligen Schleifkörpers wurde eine lineare Regressionsanalyse mit Berechnung des Bestimmtheitsmaßes für die einzelnen Messreihen durchgeführt. Die entstehende Regressionsgerade lässt sich durch die allgemeine Geradengleichung $y = mx + b$ mathematisch beschreiben, wobei die Steigung m der Geraden die durchschnittliche Dimensionsänderung zweier aufeinanderfolgend hergestellter Probenkörper darstellt. Dies kann dann als Maß für die Abnutzung des jeweiligen Instrumentes dienen.

3 Ergebnisse

Von der Zirkonoxid-Keramik wurden mit jedem der drei diamantierten Schleifkörperpaare 38 Proben hergestellt und diese jeweils nach der Grob- und der Feinbearbeitung an zwei Stellen vermessen. (Abb. 2-20) Insgesamt fanden also 228 Bearbeitungsdurchgänge mit 456 ermittelten Messwerten statt. Von der In-Ceram[®]-Keramik wurden mit einem Schleifkörperpaar 44 Proben hergestellt und wie bei der Zirkonoxidkeramik jeweils nach der Grob- und der Feinbearbeitung an zwei Stellen vermessen. Dies ergab 88 Schleifdurchgänge mit insgesamt 176 ermittelten Messwerten.

3.1 Bearbeitung der Zirkonoxid-Keramik mit:

3.1.1 Hartmetallfräsen

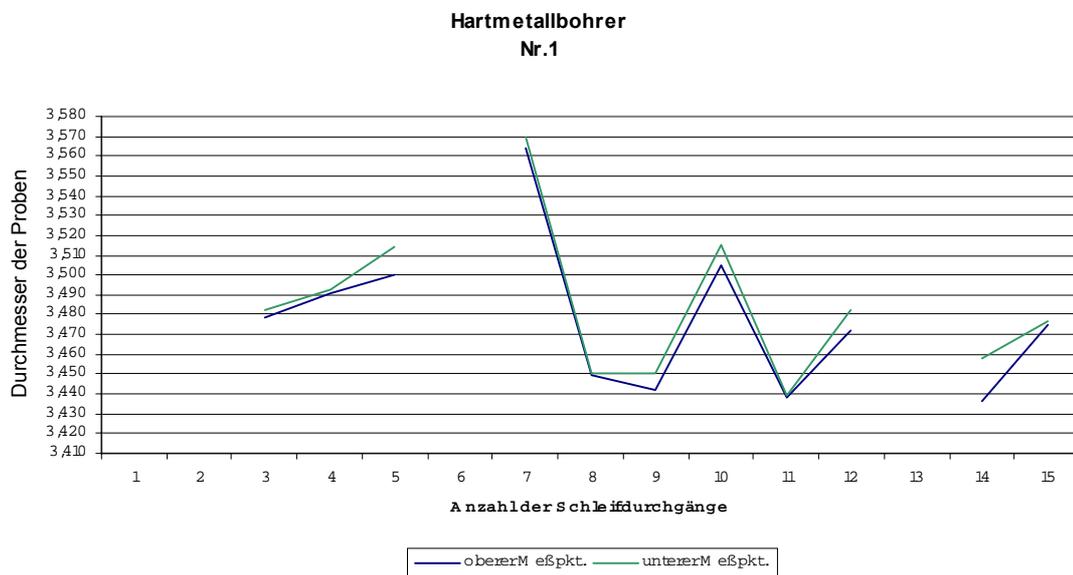
Bei der Bearbeitung der Zirkonoxid-Keramik mit Hartmetallinstrumenten traten, anders als zunächst vermutet große Probleme auf. Ganz im Gegensatz zu den Vorversuchen an Graphitblöcken, die recht erfolgversprechend verliefen, kam es bei der trockenen Bearbeitung der Zirkonoxidgrünkörper zum massiven Zusetzen der Spanräume der Hartmetaller, was sich durch Springen der Instrumente auf der Oberfläche der Proben äußerte. V.a. die Arbeit im Vollmaterial führte zu großflächigen Abplatzungen bis hin zur Fraktur des gesamten Probenzylinders. In einem Fall kam es sogar zum Verbiegen des Instrumentes. Auch die Reduzierung der Vorschubgeschwindigkeit auf 64 $\mu\text{m}/\text{sec}$ (geringste mögliche Geschwindigkeit) bzw. Zuschalten der Spraykühlung brachten keinen nennenswerten Erfolg.

Daraufhin wurde versucht, durch eine Kombination aus normalgekörnnten diamantierten Schleifkörpern für die Grobbearbeitung und Hartmetallfinierern für die Feinbearbeitung, die zu zerspanende Menge des Materials weiter zu reduzieren. Auch dieser Ansatz musste nach wenigen Durchgängen wieder verlassen werden, da es auch hierbei zu hörbaren Sprüngen der Hartmetallinstrumente auf der Materialoberfläche bis hin zur Fraktur der Proben und sehr starken Abweichungen der Messwerte von bis zu 230 μm vom erwarteten Wert kam.

Ein letzter Versuch die Nachbearbeitung mit den eigentlich für die Grobbearbeitung gedachten Hartmetallfräsen durchzuführen scheiterte wie die Versuche zuvor und führte dazu, diesen Ansatz komplett zu verlassen.

Die Beispielgrafik (Abb. 3-1) zeigt die große Abweichung der Messwerte vom erwarteten Wert (3,6 mm) und die häufigen Frakturen der Proben, die dann nicht vermessen werden konnten.

Abb. 3-1: Durchmesser der Zirkonoxidkeramikproben nach der Feinbearbeitung mit grobverzahnten Hartmetallinstrumenten



3.1.2 Diamantierte Schleifkörper

Anders als zunächst erwartet, ließen sich die Zirkonoxidgrünkörper mit den diamantierten Schleifkörpern besser bearbeiten als mit den Hartmetallinstrumenten. Eine Trockenbearbeitung war allerdings auch hier nicht möglich, da v.a. in den Bereichen, in denen das Instrument im Vollmaterial arbeiten musste, es wieder zum massiven Zusetzen des Schleifkörpers kam. Auffallend war allerdings die schlechte Oberflächengüte der präparierten Zylinder in Form von wellenförmigen Rauigkeiten senkrecht zur Präparationsrichtung, die sowohl nach der Grob-, als auch nach der Feinbearbeitung auftraten. (Abb. 3-2) Deutlich sind auch die z.T. ausgeprägten Randfrakturen, die während der Bearbeitung, aber auch danach, z.B. beim Abtrennen entstanden.

Durch Reduzierung des Vortriebs auf 100 $\mu\text{m}/\text{sec}$ wurden diese Rauigkeiten zwar etwas kleiner, ließen sich aber durch weitere Herabsetzung des Vortriebes nicht weiter beeinflussen. Die Messung des Durchmessers jeweils nach der Grob- und der Feinpräparation ergab die unten dargestellten Kurven (die einzelnen Messpunkte sind der Übersichtlichkeit wegen verbunden). (Abb. 3-3 a-f)

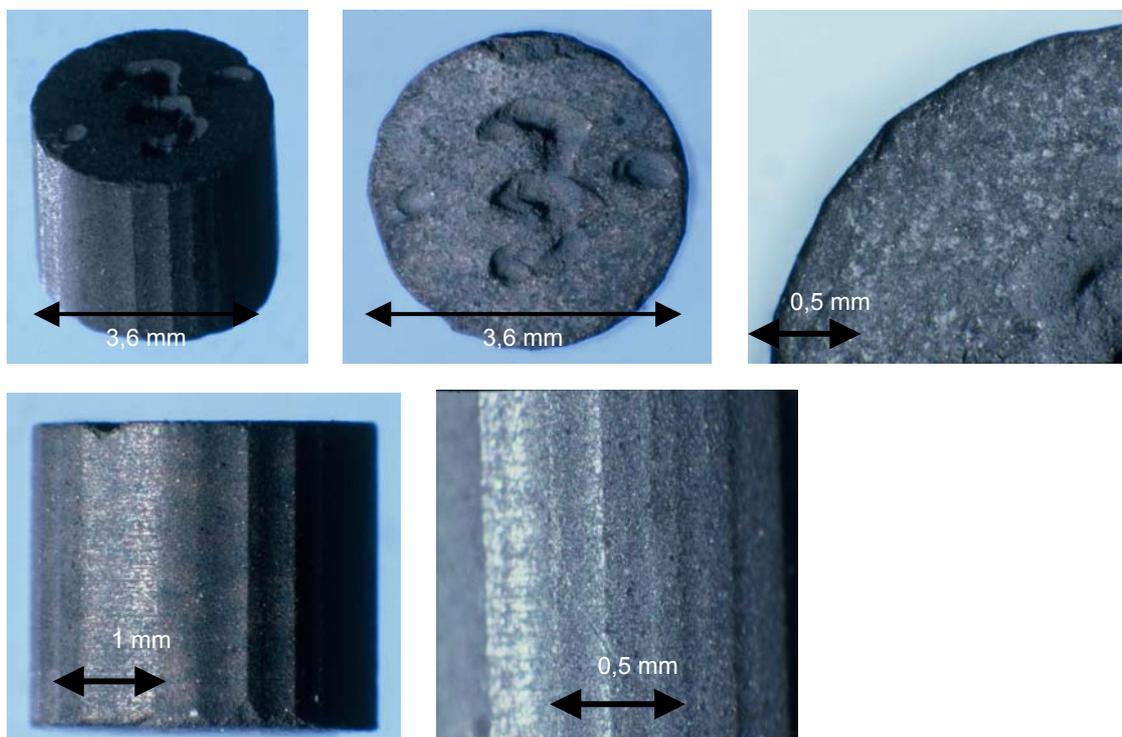
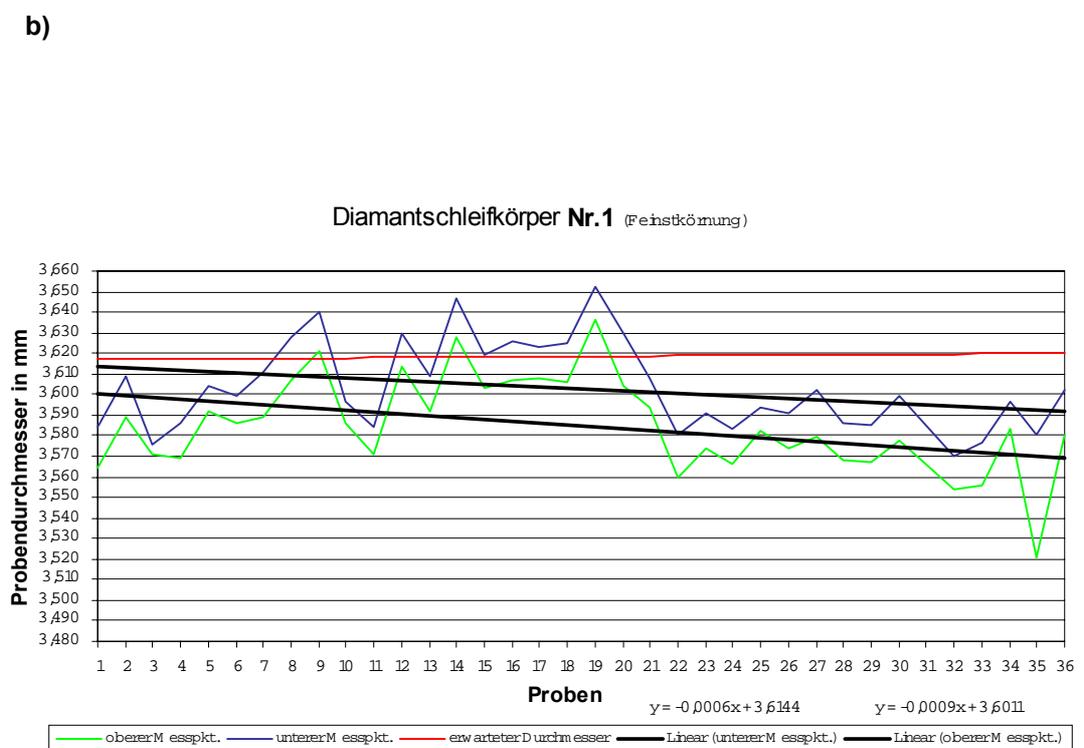
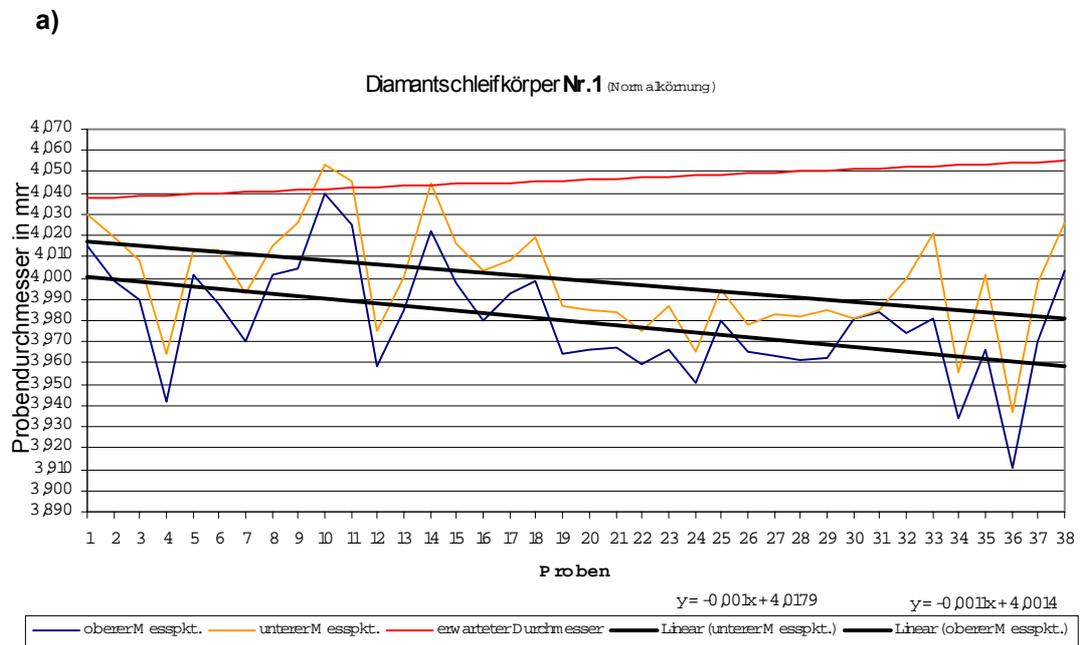
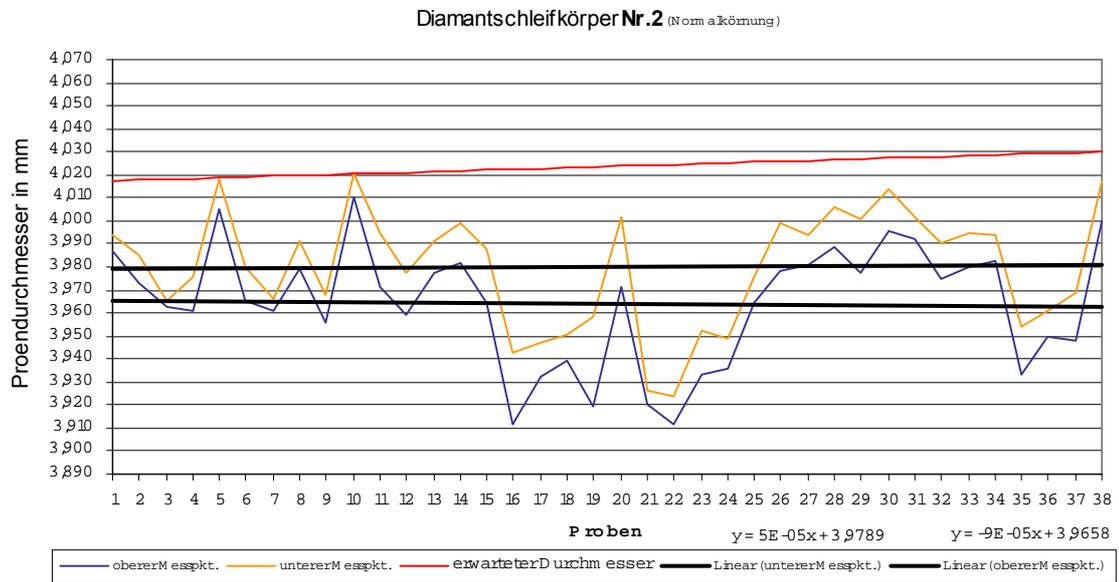


Abb. 3-2 : Zirkonoxidprobe (Makroskopische Aufnahmen: Makroskop M 420 / Fa. Wild)

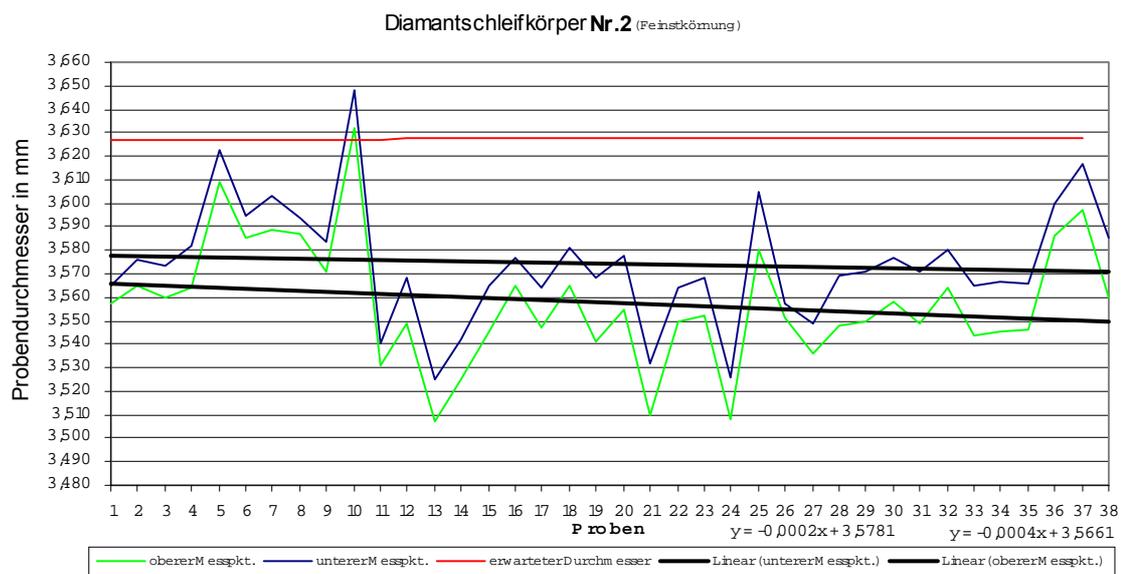
Abb. 3-3 a-f: Diagramme der Schleifdurchgänge (schwarze Geraden: Regressionsgeraden mit Geradengleichung und Bestimmtheitsmaß / rote Gerade: erwarteter Proben-durchmesser am oberen Messpunkt)



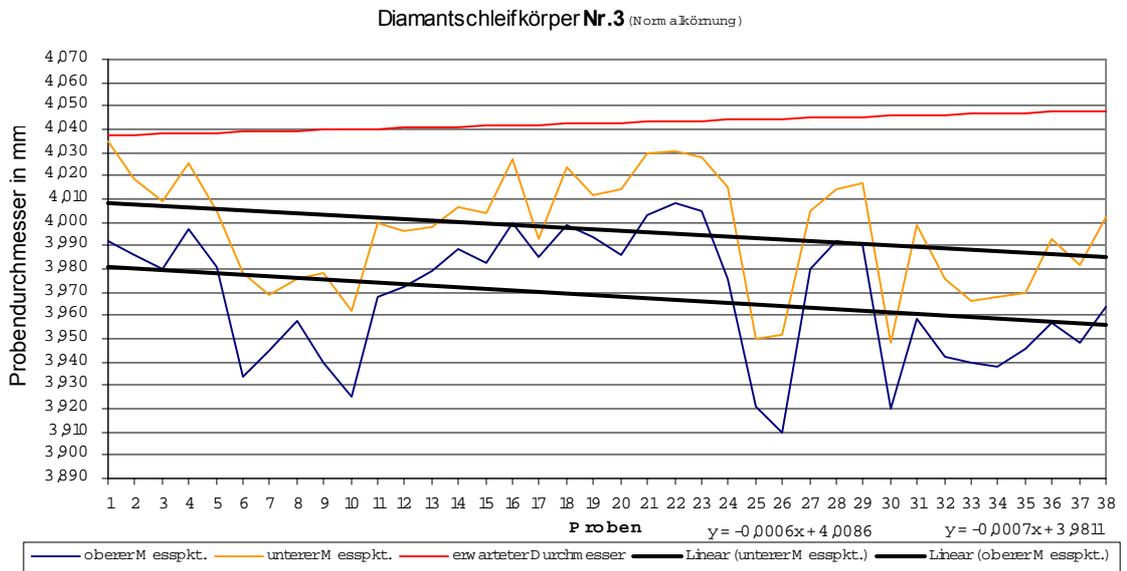
c)



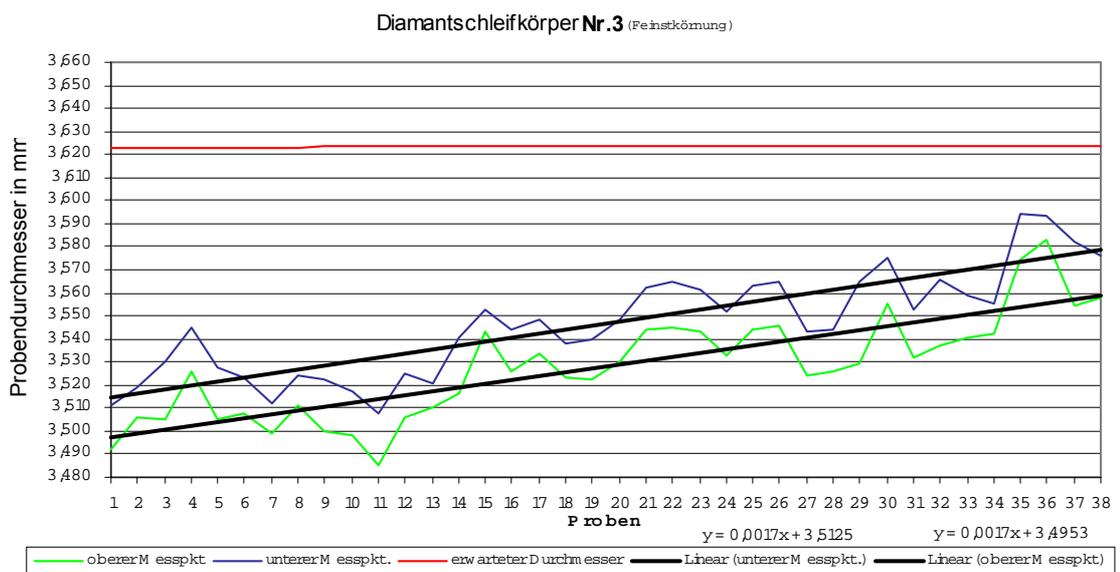
d)



e)



f)



Aufgrund der starken Welligkeit der Proben schwanken die Messwerte sehr stark, je nachdem, ob man gerade auf einem Wellenmaximum oder in einem -minimum misst. (Abb. 3-2)

Betrachtet man die einzelnen Kurven der drei Schleifkörperpaare, ist zunächst aufgrund der großen Schwankungen der Messwerte keine klare Tendenz der Probendurchmesser im Verlauf der jeweils 38 Präparationen zu erkennen, anhand derer ein Verschleiß der Instrumente ablesbar gewesen wäre. Erst die jeweiligen Regressionsgeraden (schwarze Geraden) lassen eine ungefähre Tendenz der Werte erahnen. Durch die lineare Regression wird eine den Messwerten optimal angepasste Gerade ermittelt.

Die größten Unterschiede im Verlauf der Kurven zeigen sich aber bei den Feinstkorndiamanten. Hier haben die Regressionsgeraden der Schleifkörper 1 und 2 eine fallende Tendenz, wohingegen der Schleifkörper 3 eine klar ansteigende Regressionsgerade besitzt.

Es fällt auf, dass im Durchschnitt bei der Grobbearbeitung es statt zu einer Zunahme der Probendurchmesser, (wie man es durch das Abnehmen des Schleifkörperdurchmessers aufgrund des Verschleißes erwartet hätte) zu einer Abnahme kam. D.h. der Schleifkörper muss mit zunehmender Anzahl an Schleifdurchgängen zumindest virtuell seinen Durchmesser vergrößert haben, z.B. durch die Bildung von Aufbauschneiden (Abb. 4-5) oder durch Verbiegungen des Metallträgers der Instrumente [12], d.h. Zunahme der Rundlaufabweichung.

Nimmt man nun an, dass die durchschnittliche Reduktion des Schleifkörperdurchmessers linear erfolgt wäre, müsste sich diese messbare Abnahme des Schleifkörpers direkt in einer Zunahme des Probendurchmessers widerspiegeln. Es sollten somit Probendurchmesser entstehen, die jeweils dem roten Graphen entsprächen.

Denn wenn die Achse eines Instrumentes von der Schleifeinheit auf einer Kreisbahn mit 5,2 mm Durchmesser geführt wird, müsste bei einem angenommenen Instrumentendurchmesser von 1,2 mm ein Probenkörper mit 4 mm Durchmesser resultieren. Da nun aber der Durchmesser z.B. des normalgekörnten Schleifkörpers Nr. 1 nur 1,163 mm (Tab. 3-2 / 3-3) betrug, müsste rein rechnerisch ein Probenkörper mit 4,037 mm Durchmesser entstehen. Bei allen

Schleifkörpern kommt es zu diesen mehr oder weniger großen Abweichungen zwischen dem aufgrund des Schleifkörperdurchmessers erwarteten und dem letztlich gemessenen Probendurchmesser. Die Probendurchmesser liegen bei der Grobbearbeitung schon zu Beginn im Mittel etwa 50 μm unter dem aufgrund des Schleifkörperdurchmessers erwarteten Wert, gegen Ende sogar etwa 85 μm . (Tab. 3-1)

Bei der Feinbearbeitung verhalten sich die drei verwendeten Finierer sehr unterschiedlich. Während die Schleifkörper 1 und 2 über die 38 Präparationen eine fallende Tendenz der Probendurchmesser zeigen (Abb. 3-3 b, d), weist das Instrument 3 eine klar steigende Tendenz der Werte auf (Abb. 3-3 f). Auch liegen beim Schleifkörper 3 die Anfangsdurchmesser der Proben zu Beginn fast doppelt so weit unter den erwarteten Werten, wie bei 1 und 2. (Tab. 3-1)

Die Abnahme der Schleifkörper wurde jeweils bestimmt durch die Vermessung mit Hilfe der Mikrometerschraube vor und nach Abschluss aller Schleifdurchgänge. (Tab. 3-2 / 3-3)

Tab. 3-1 : Mittelwerte der Durchmesser der 38 Proben in mm / Differenz der gemessenen zu den erwarteten Durchmessern (es wurde jeweils nur der obere Messpunkt in der Tabelle aufgeführt / *Beginn* = Bearbeitung erfolgte mit einem vorgealterten Schleifkörper / *Ende* = Werte gegen Ende der Einsatzzeit des Schleifkörpers)

	Normalkörnung					
	Schleifkörper 1		Schleifkörper 2		Schleifkörper 3	
	Beginn	Ende	Beginn	Ende	Beginn	Ende
Wert in mm (gemessen)	4,001	3,960	3,966	3,962	3,981	3,955
Wert in mm (erwartet)	4,037	4,055	4,017	4,030	4,037	4,048
Differenz in μm (gemess./erw.)	-36	-95	-51	-68	-56	-93
	Feinstkörnung					
	Schleifkörper 1		Schleifkörper 2		Schleifkörper 3	
	Beginn	Ende	Beginn	Ende	Beginn	Ende
Wert in mm (gemessen)	3,601	3,569	3,566	3,551	3,495	3,560
Wert in mm (erwartet)	3,617	3,620	3,627	3,628	3,623	3,624
Differenz in μm (gemess./erw.)	-16	-51	-61	-77	-128	-64

Tab. 3-2: Schleifkörperdurchmesser (Normalkörnung) (Werte in mm)

Nr.	Spitze (1mm)			Mitte (3mm)		
	Beginn	Ende	Abnahme	Beginn	Ende	Abnahme
1	1,124	1,116	-0,008	1,163	1,145	-0,018
2	1,150	1,147	-0,003	1,183	1,170	-0,013
3	1,120	1,117	-0,003	1,163	1,152	-0,011
Mittelwert:			-0,005			-0,014

Tab. 3-3: Schleifkörperdurchmesser (Feinstkörnung) (Werte in mm)

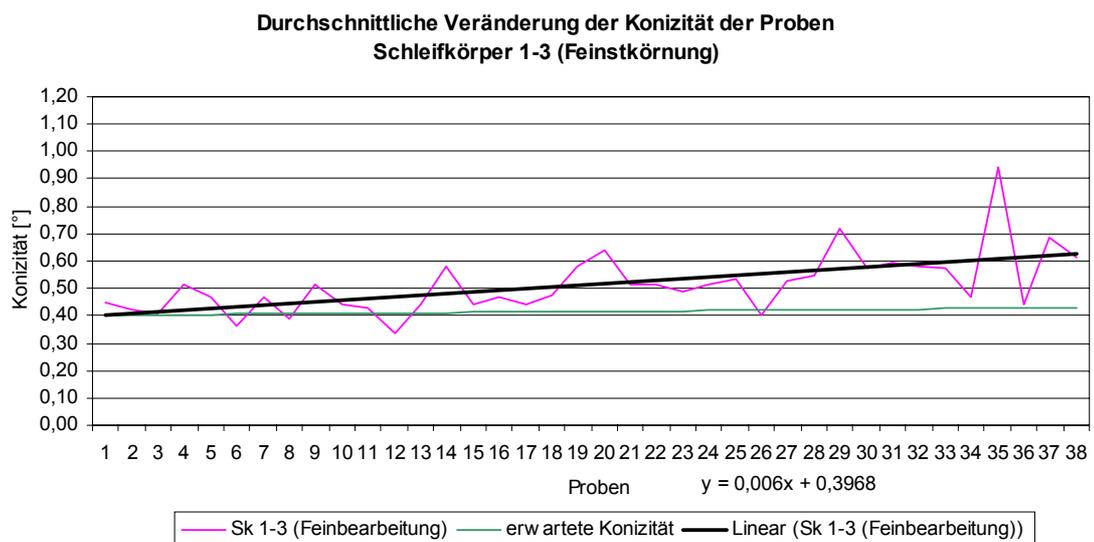
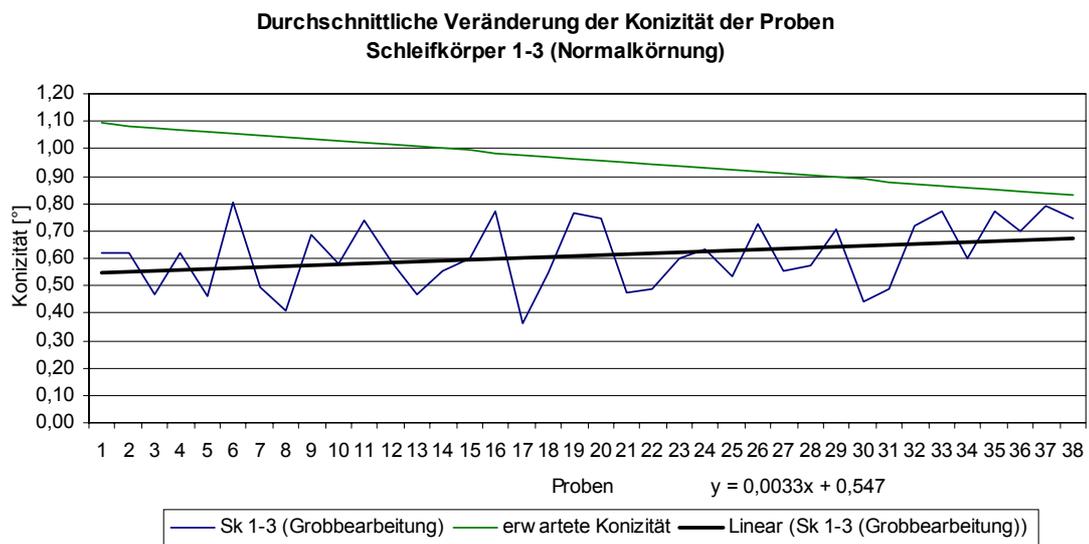
Nr.	Spitze (1mm)			Mitte (3mm)		
	Beginn	Ende	Abnahme	Beginn	Ende	Abnahme
1	1,175	1,174	-0,001	1,183	1,180	-0,003
2	1,154	1,150	-0,004	1,173	1,172	-0,001
3	1,161	1,160	-0,001	1,177	1,176	-0,001
Mittelwert:			-0,002			-0,002

Tab. 3-4: Konizität der Schleifkörper und der Proben

Nr	Grobbearbeitung				Feinbearbeitung			
	Schleifkörperkonizität		Probenkonizität		Schleifkörperkonizität		Probenkonizität	
	Beginn	Ende	Beginn	Ende	Beginn	Ende	Beginn	Ende
1	1,12°	0,83°	0,47°	0,69°	0,23°	0,17°	0,38°	0,71°
2	0,95°	0,66°	0,37°	0,48°	0,54°	0,63°	0,34°	0,66°
3	1,23°	1,00°	0,79°	0,84°	0,46°	0,46°	0,49°	0,58°
Mittelwert	1,10°	0,83°	0,54°	0,67°	0,41°	0,42°	0,40°	0,63°
Differenz	-0,27°		0,13°		0,01°		0,23°	

Betrachtet man die Konizität der Schleifkörper und der Proben, so sieht man, dass sich die Konizität der Instrumente nicht direkt auf die Proben überträgt. Es entstanden bei der Grobbearbeitung Proben, die eine deutlich geringere Konizität aufwiesen als die Schleifkörper. Die Normalkorndiamanten besitzen nach der Voralterung eine durchschnittliche Konizität von ca. 1,10° zwischen Schaft und Spitze, wohingegen die zu Beginn von ihnen erzeugten Proben lediglich eine durchschnittliche Konizität von 0,54° aufwiesen. Die Vermessung der Schleifkörper nach Ende der 38 Präparationen ergab eine durchschnittliche Konizität von ca. 0,83°, wohingegen die gegen Ende mit diesem Instrument hergestellten Proben eine Konizität von 0,67° zeigen. Somit nahm die Probenkonizität im Laufe der 38 Präparationen leicht um durchschnittlich 0,13° zu, wohingegen die Schleifkörperkonizität um 0,27° abnahm.

Abb. 3-4 / 3-5: Durchschnittliche Veränderung der Probenkonizität



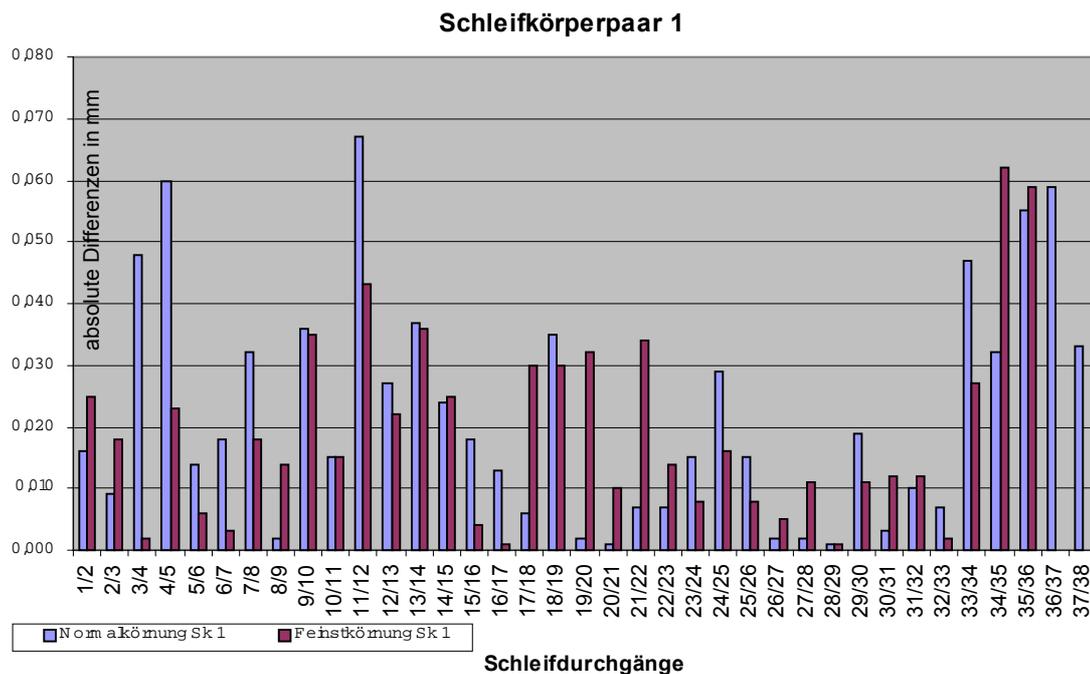
D.h. obwohl die Konizität der Instrumente während der Bearbeitung abnimmt, vergrößert sich bei der Grobbearbeitung die Konizität der Proben.

Anders bei der Feinbearbeitung. Hier entstanden Proben, die eine höhere Konizität besitzen als die Schleifkörper (außer zu Beginn bei Schleifkörper Nr.2). Betrachtet man aber die Veränderung der Konizität, so fällt auf, dass sich die Instrumentenkonizität kaum messbar verändert, die Probenkonizität aber deutlich stärker als bei der Grobbearbeitung (um $0,23^\circ$) zunimmt. (Tab. 3-4)

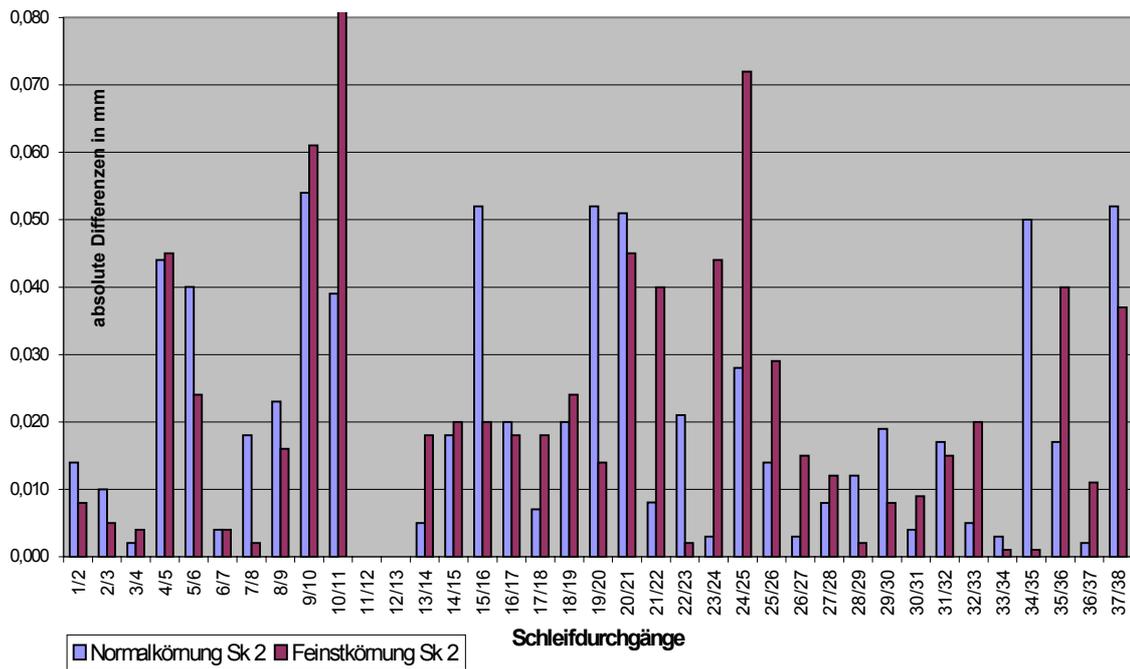
Die grüne Gerade in Abb. 3-4 / 3-5 zeigt den aufgrund der Veränderung der Schleifkörperkonizität erwarteten Verlauf der Probenkonizität, wenn die Konizität der Instrumente linear abgenommen und sich dies direkt auf die Proben übertragen hätte.

Um zu überprüfen, ob es im Verlauf der 38 Präparationen Bereiche stärkerer oder schwächerer Dimensionsänderungen gibt, wurden die absoluten Differenzen der Probendurchmesser zwischen zwei aufeinanderfolgenden Schleifdurchgängen grafisch aufgetragen, d.h. man subtrahiert den jeweils folgenden Messwert von dem davor ermittelten. (Abb. 3-6)

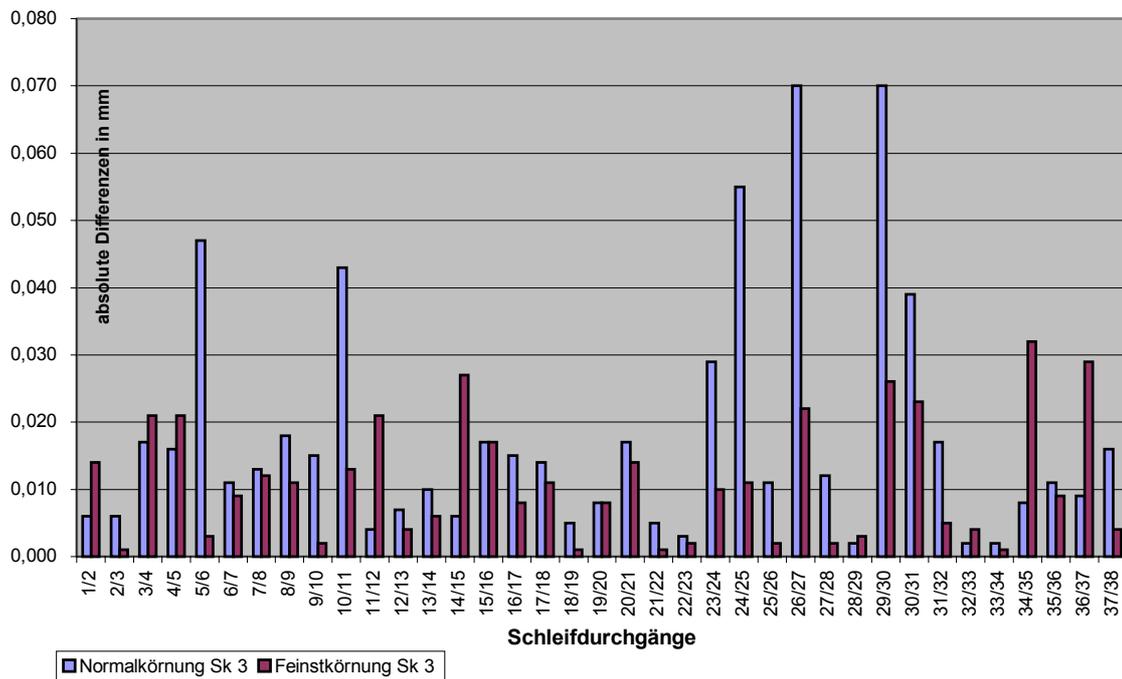
Abb. 3-6: Absolute Differenz der Durchmesser zweier aufeinanderfolgend hergestellter Proben (jeweils die Werte der Grob- und der Feinbearbeitung sind hier nebeneinander dargestellt)



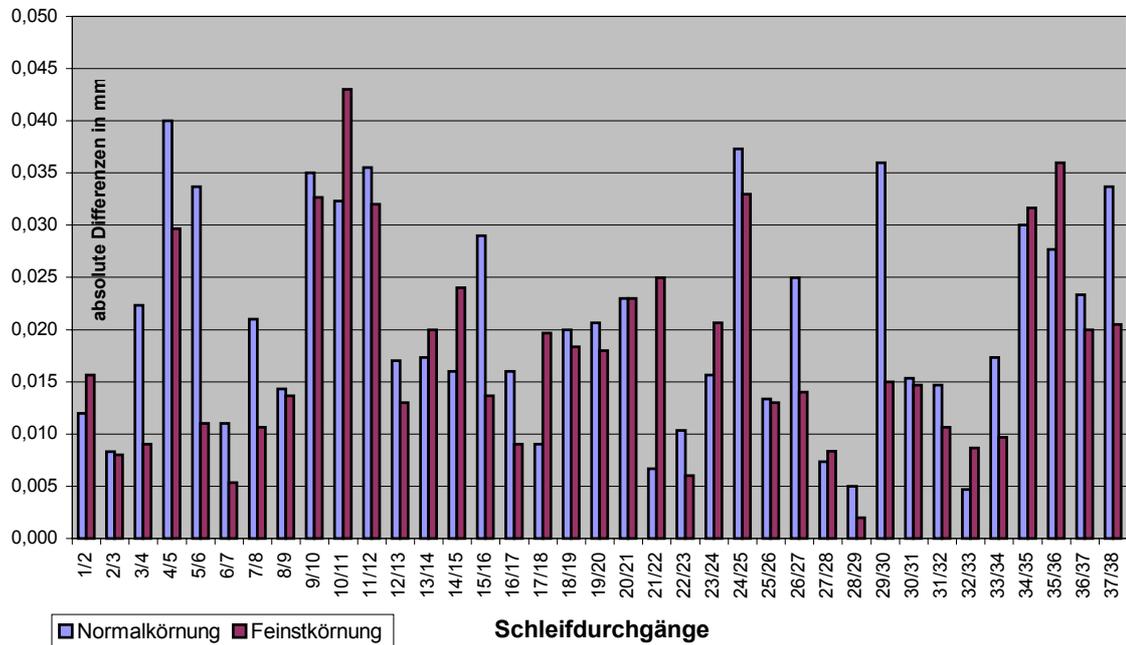
Schleifkörperpaar 2



Schleifkörperpaar 3



Schleifkörperpaare Nr. 1-3



Tab. 3-5: Mittelwerte der absoluten Differenzen zwischen zwei aufeinanderfolgenden Schleifdurchgängen (Werte in mm)

Schleifkörper 1	Schleifkörper 2	Schleifkörper 3	Schleifkörper 1-3
grob	grob	grob	grob
0,022	0,021	0,018	0,020
Schleifkörper 1	Schleifkörper 2	Schleifkörper 3	Schleifkörper 1-3
fein	fein	fein	fein
0,019	0,023	0,011	0,018

Man sieht, dass bei der Grobbearbeitung die Werte durchschnittlich um 20 μm , bei der Feinbearbeitung um 18 μm zwischen zwei Schleifdurchgängen differieren. (Tab. 3-5) Dabei fällt zwar auf, dass es keinen Abschnitt gibt, in dem die Durchmesser über einen größeren Bereich von einem zum nächsten Schleifdurchgang kontinuierlich ansteigen oder abfallen, jedoch zeigen die Graphen der Grob- und der Feinbearbeitung auffallende Ähnlichkeiten in deren Verlauf. Diese Ähnlichkeit wird durch einen signifikanten Korrelationskoeffizienten bestätigt. (Tab. 3-16)

Das insgesamt zerspannte Volumen beträgt pro Ebene ca. 349 mm^3 für die Grobbearbeitung bzw. 48 mm^3 für die Feinbearbeitung von fünf Proben, d.h. bei 38 hergestellten Probenzylindern beträgt das zu zerspannende Volumen für die normalgekörnten Instrumente etwa 2650 mm^3 und für die Feinstkorndiamanten 365 mm^3 . (Abb. 3-7)

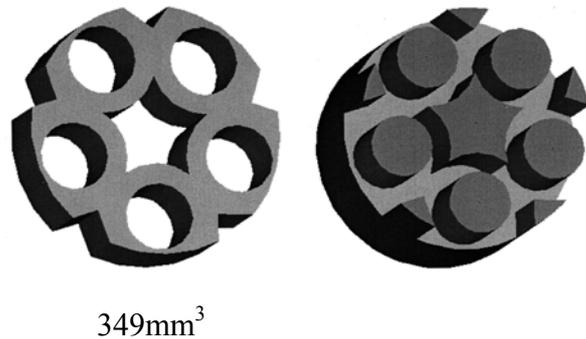


Abb. 3-7: Zerspantes Volumen in einer Ebene (Grobbearbeitung)

3.2 Bearbeitung der In-Ceram[®]-Keramik

Die Bearbeitung erfolgte mit dem Schleifkörperpaar Nr. 4. Im Gegensatz zu der Zirkonoxid-Keramik ließ sich die In-Ceram[®]-Keramik erwartungsgemäß recht unproblematisch mit den diamantierten Schleifkörpern bearbeiten. Auffallend war aber auch hier die starke Welligkeit der Probenoberflächen (Abb. 3-8). Man erkennt ähnlich große Amplituden der Rauigkeiten wie bei der Zirkonoxid-Keramik, allerdings fehlen die auffälligen Randfrakturen. Bei der Messung der Probendurchmesser nehmen diese zwar erwartungsgemäß über die 44 durchgeführten Schleifdurchgänge kontinuierlich zu, die Werte zeigen aber eine recht große Schwankungsbreite von bis zu $100 \mu\text{m}$. Zu Beginn der Grobbearbeitung liegen die ersten gemessenen Durchmesser etwa $56 \mu\text{m}$ unter den aufgrund des Schleifkörperdurchmessers eigentlich zu erwartenden Werte, gegen Ende, so etwa ab der 33. Präparation liegen sie etwas darüber ($6 \mu\text{m}$). (Abb. 3-9 / Tab. 3-6)

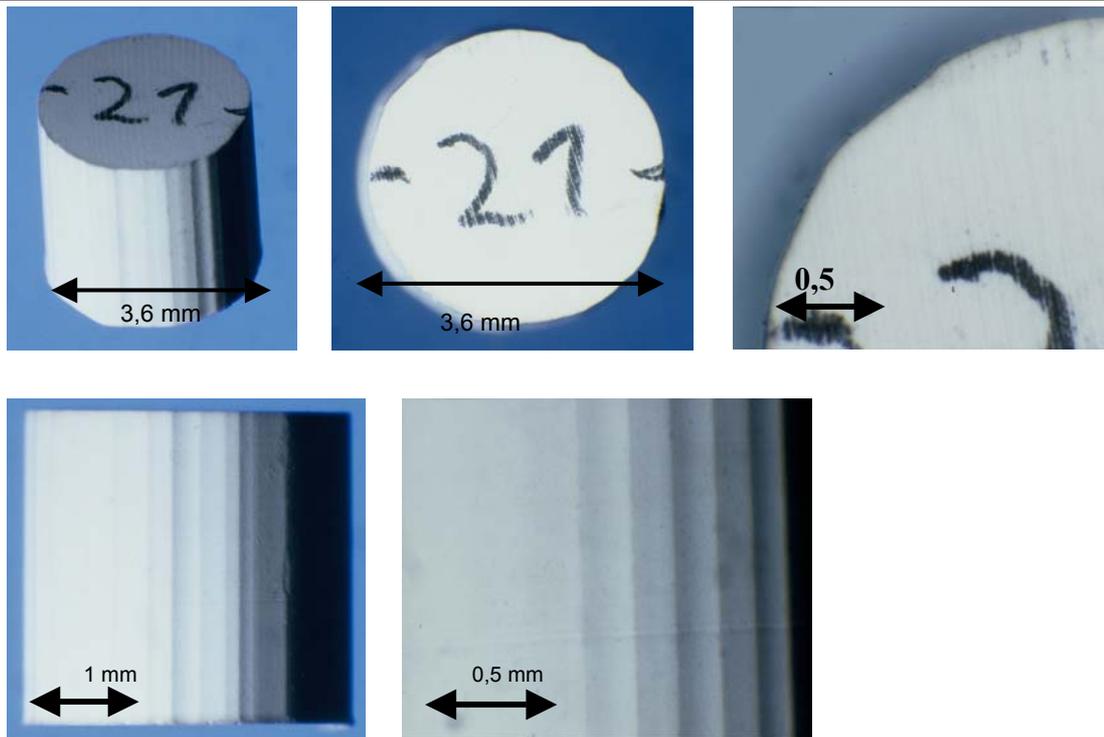


Abb. 3-8: In-Ceram®-Probenkörper (Makroskopische Aufnahmen: Makroskop M 420 / Fa. Wild)

Bei der Feinbearbeitung ist dies nicht so deutlich ausgeprägt. Zu Beginn liegen die Probendurchmesser nur um 33 μm , gegen Ende noch 13 μm unter dem erwarteten Wert. (Abb. 3-10 / Tab. 3-6)

Tab. 3-6: Mittelwerte der Probendurchmesser / Differenz der gemessenen zu den erwarteten Werten (Schleifkörperpaar Nr. 4) (es wurde jeweils nur der obere Messpunkt in der Tabelle aufgeführt / *Beginn* = Bearbeitung erfolgte mit einem vorgealterten Schleifkörper / *Ende* = Werte gegen Ende der Einsatzzeit des Schleifkörpers)

	Normalkörnung		Feinstkörnung	
	Beginn	Ende	Beginn	Ende
Mittelwert in mm (gemessen)	3,963	4,046	3,567	3,589
Mittelwert in mm (erwartet)	4,019	4,040	3,600	3,602
Differenz in μm (gemess./erw.)	-56	6	-33	-13

Wie erwartet kommt es bei der Grob-, wie der Feinbearbeitung über alle Schleifdurchgänge betrachtet zu einer Zunahme der Probendurchmesser. Diese ist allerdings in beiden Fällen stärker als die Abnahme des Schleifkörperdurchmessers. Die rote Kurve beschreibt jeweils auch hier, den erwarteten Durchmesser der Proben, wenn die messbare Durchmesserabnahme des Schleifkörpers während seiner Einsatzzeit linear erfolgt wäre und sich der Schleifkörperdurchmesser direkt auf den Probendurchmesser übertragen hätte.

Anders als bei der Zirkonoxid-Keramik ist hier eher eine Tendenz der Werte erkennbar.

Abb. 3-9: Verlauf der Durchmesser der In-Ceram[®]-Proben / (schwarze Geraden: Regressionsgeraden mit Geradengleichung und Bestimmtheitsmaß / rote Gerade: erwarteter Probendurchmesser)

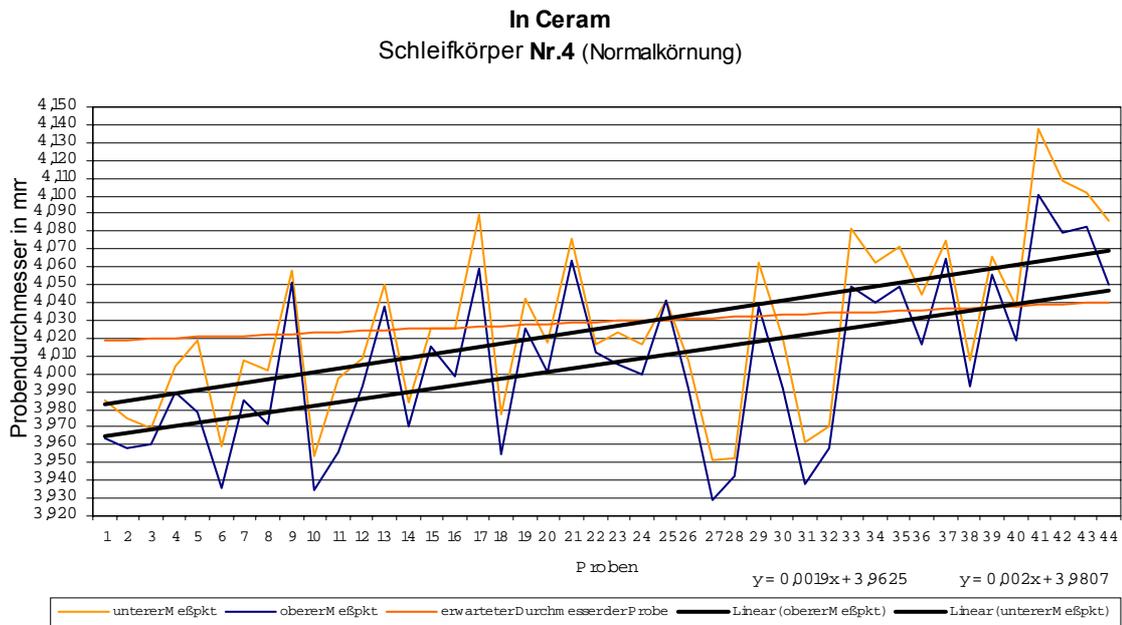


Abb. 3-10: Verlauf der Durchmesser der In-Ceram[®]-Proben

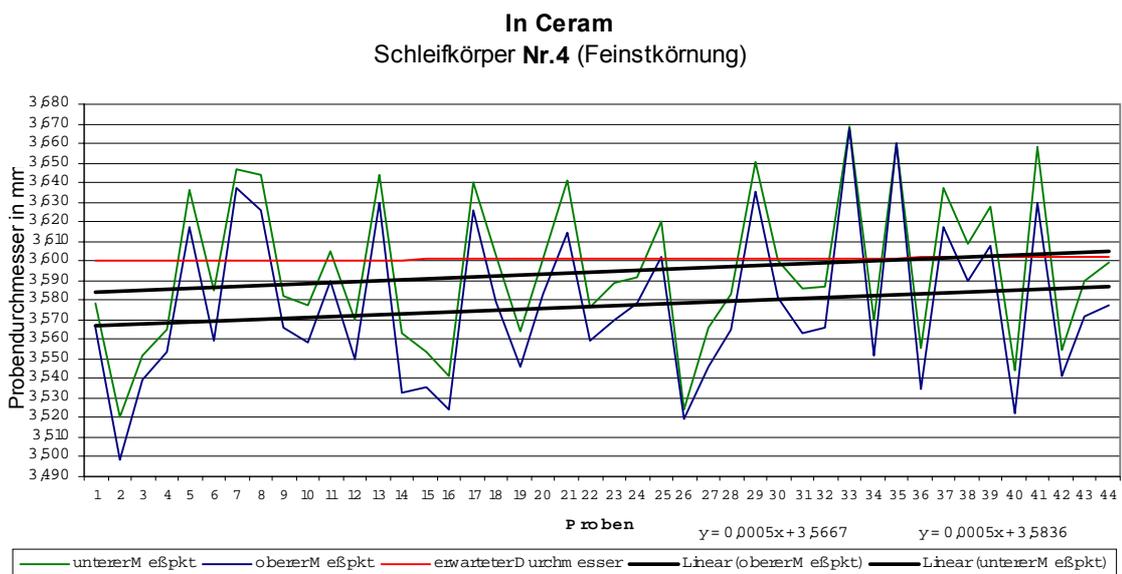
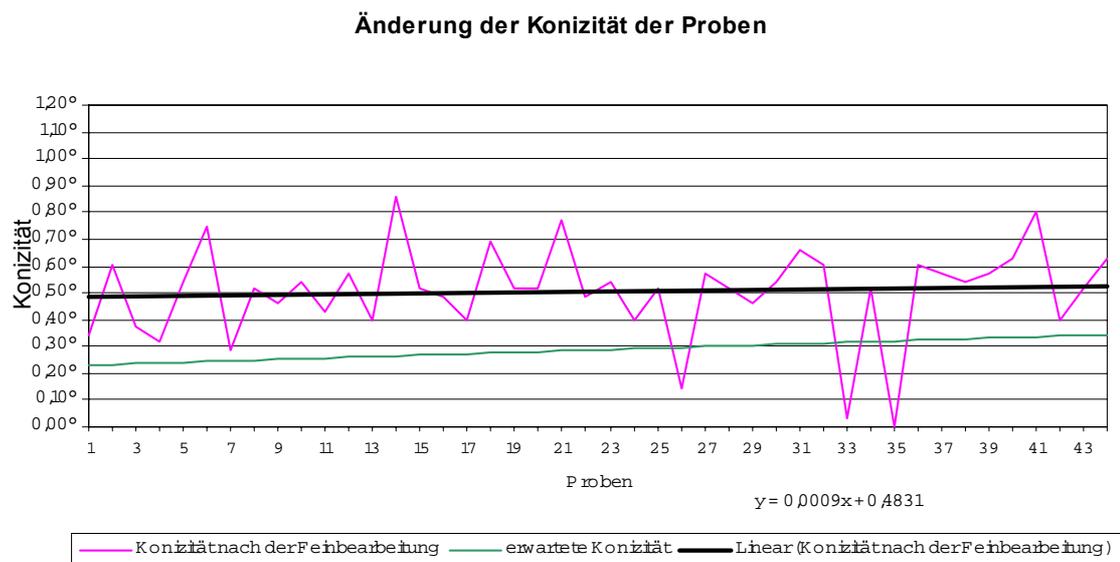
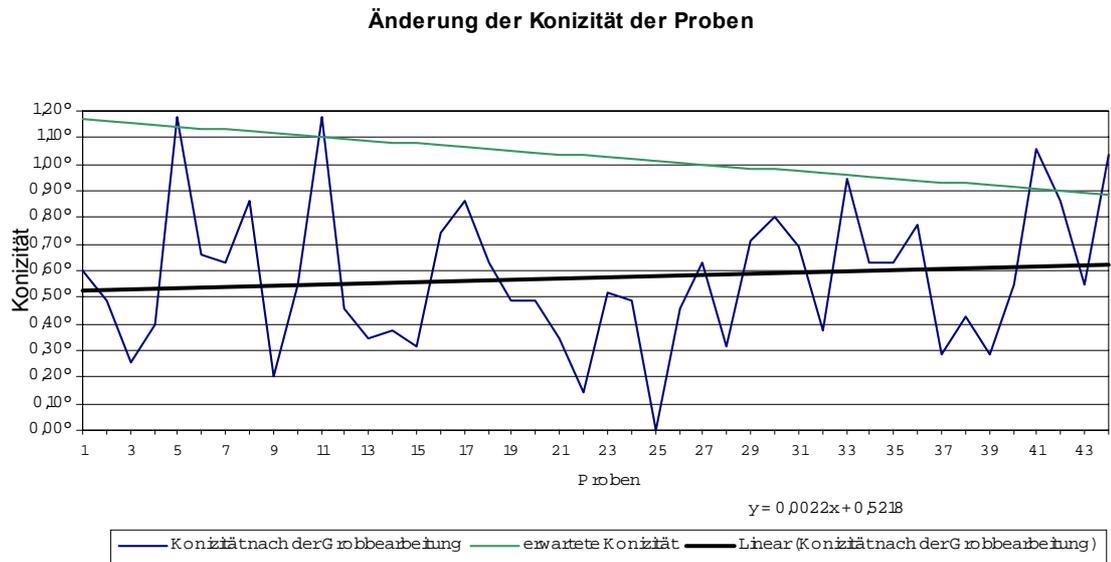


Abb. 3-11 a+b: Veränderung der Konizität bei den In-Ceram®-Proben



Betrachtet man die Konizität der Proben, kommt es wie schon bei der Zirkonoxidkeramik beobachtet, zu einer leichten Zunahme im Verlauf der Bearbeitungsdurchgänge. Bei der Grobbearbeitung nahm die Konizität der Proben um ca. $0,10^\circ$ zu, beim Feinstgekörnten um lediglich $0,04^\circ$. (Tab. 3-8)

Die grüne Gerade in Abb. 3-11 a+b beschreibt den erwarteten Verlauf der Probenkonizität, wenn die Konizität der Instrumente linear abgenommen und sich

dies direkt auf die Proben übertragen hätte. Anstatt der erwarteten Abnahme der Probenkonizität, kam es eher im Schnitt zu deren Zunahme.

Anders verhält es sich bei der Feinbearbeitung. Hier steigt mit zunehmender Konizität des Schleifkörpers auch die der Proben gleichsinnig an, wobei sie bei den Proben etwas weniger zunimmt als beim Instrument.

Tab. 3-7: Schleifkörperdurchmesser jeweils zu Beginn und nach Ende der 44 Präparationen (Werte in mm)

Grobbearbeitung						
Spitze (1mm)			Mitte (3mm)			
Nr.	Beginn	Ende	Abnahme	Beginn	Ende	Abnahme
4	1,141	1,129	0,012	1,182	1,160	0,022
Feinbearbeitung						
Spitze (1mm)			Mitte (3mm)			
Nr.	Beginn	Ende	Abnahme	Beginn	Ende	Abnahme
4	1,192	1,186	0,006	1,200	1,198	0,002

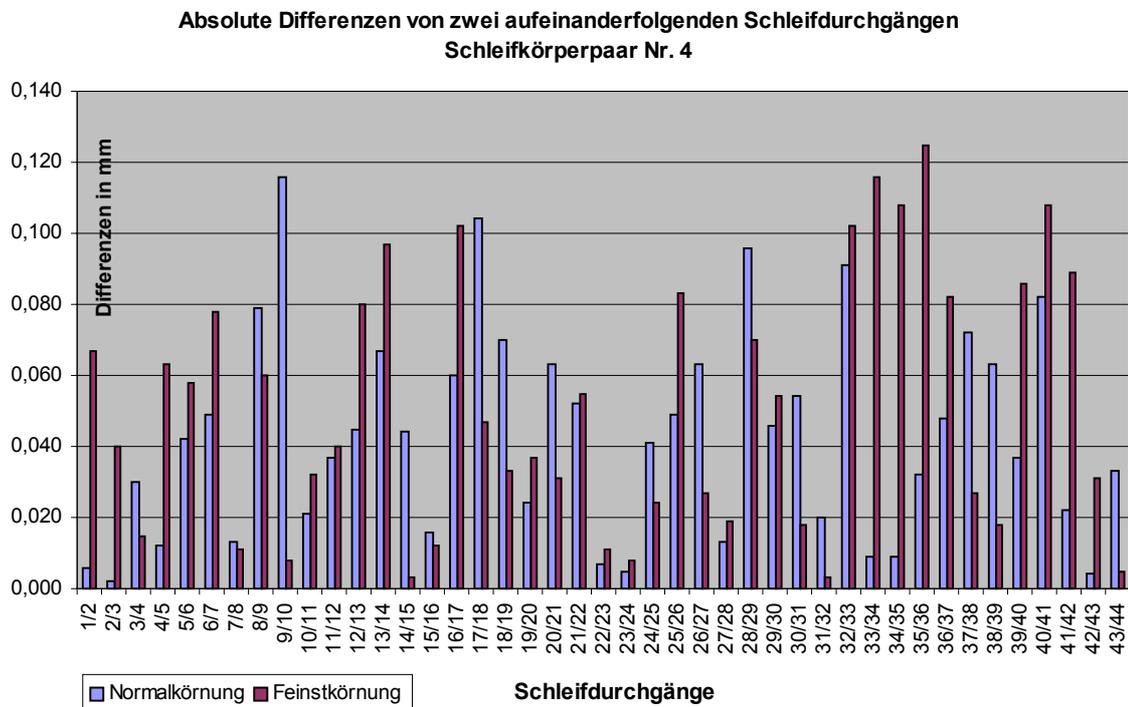
Tab. 3-8: Konizität des Schleifkörpers und der Proben

Nr.	Grobbearbeitung				Feinbearbeitung			
	Schleifkörperkonizität		Probenkonizität		Schleifkörperkonizität		Probenkonizität	
	Beginn	Ende	Beginn	Ende	Beginn	Ende	Beginn	Ende
4	1,18°	0,89°	0,52°	0,62°	0,23°	0,34°	0,48°	0,52°
Differenz:	-0,29°		0,10°		0,11°		0,04°	

Wiederum wurde auch hier anhand der absoluten Differenzen der Messwerte zweier aufeinander folgender Schleifdurchgänge nach auffälligen Bereichen gesucht, in denen die Werte konstante Verläufe zeigen. (Abb. 3-12)

Man sieht, dass bei der Grobbearbeitung zwei aufeinanderfolgende Werte durchschnittlich um 41 μm , bei der Feinbearbeitung um 49 μm differieren. Auch hier fällt auf, dass es keinen Abschnitt gibt, in dem die Durchmesser über einen größeren Bereich von einem zum nächsten Schleifdurchgang kontinuierlich ansteigen oder abfallen, jedoch obwohl die Graphen der Grob- und der Feinbearbeitung gewisse Ähnlichkeiten in deren Verlauf zeigen, haben die Messreihen anders als bei der Zirkonoxidkeramik nur eine sehr schwache Korrelation. (Tab. 3-20)

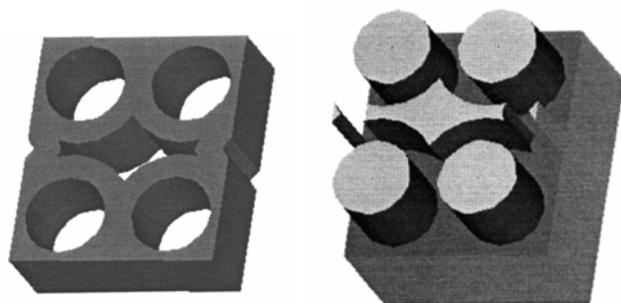
Abb. 3-12: Absolute Differenz der Durchmesser zweier aufeinanderfolgend hergestellter Proben (jeweils die Werte der Grob- und der Feinbearbeitung sind hier nebeneinander dargestellt)



Tab. 3-9: Mittelwerte der absoluten Differenzen zwischen zwei aufeinanderfolgenden Schleifdurchgängen (Werte in mm)

Schleifkörper Nr. 4 grob	Schleifkörper Nr. 4 fein
0,041	0,049

Das insgesamt zerspannte Volumen beträgt hier beim normalgekörntem Schleifkörper bei 44 hergestellten Probenzylindern etwa 2865 mm^3 und für den Feinstkorndiamanten ca. 422 mm^3 . In einer Ebene mit vier Präparationen entspräche das etwa 260 mm^3 für die Grobbearbeitung, bzw. 38 mm^3 für die Feinbearbeitung. (Abb. 3-13)



Zerspantes Volumen pro Ebene ca. 260 mm^3

Abb. 3-13: Zerspantes Volumen in einer Ebene (Grobbearbeitung)

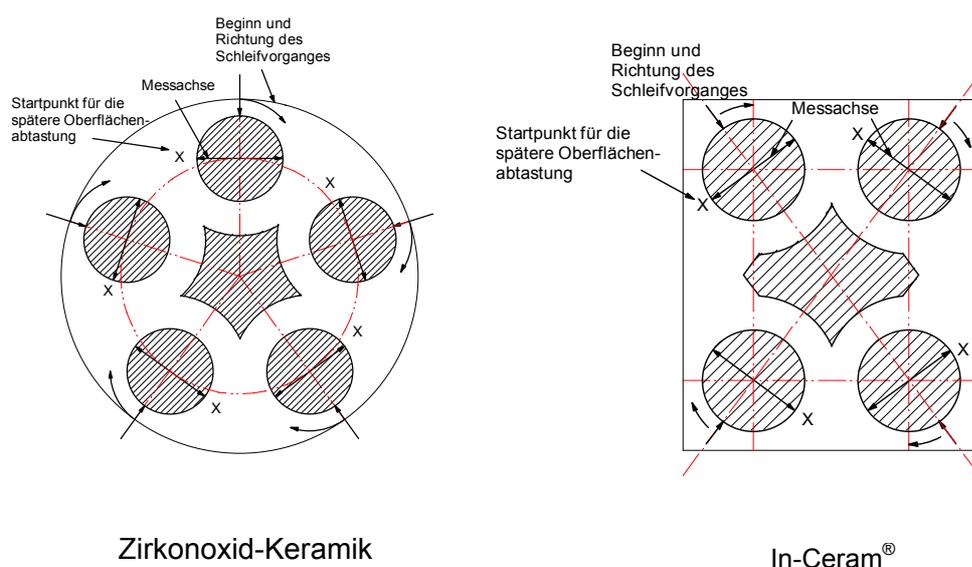
3.3 Ergebnisse der Oberflächenabtastung

Bei der Vermessung der nur etwa 3,6 mm x 4 mm großen Proben mit Hilfe des Numerex Mehrkoordinaten-Messgeräts® (Fa. Zeiss / Jena) entstanden Schwierigkeiten beim Einspannen der Prüfkörper, wodurch nur in einer Höhe, etwa in der Mitte der Probe, vermessen werden konnte. Auch war durch die wellige Oberfläche das Anfahren der Messpunkte sehr schwierig und zeitaufwendig, so dass nur 16 Proben exemplarisch vermessen werden konnten.

Durch den relativ großen Durchmesser der verwendeten Messkugel von 1 mm (es wurde die kleinste Kugel verwendet), sind keine Aussagen über die Rauigkeit der Probenoberfläche möglich, sondern es können nur die Abweichung der Außergeometrie der Proben von einem idealen Zylinder mit 3,6 mm Durchmesser dargestellt werden.

Der Beginn der Messung erfolgte an jedem Probenkörper möglichst immer an der selben Stelle, um Vergleiche zwischen den einzelnen Ergebnissen zuzulassen. Dafür wurden vor dem Abtrennen der Proben Markierungen an den in Abb. 3-14 dargestellten Stellen gesetzt.

Abb. 3-14: Festlegung der Startpunkte für die Oberflächenabtastung vor dem Abtrennen der Proben



3.3.1 Zirkonoxid-Probenkörper

Bei der ersten Betrachtung der Auswertungen fällt bereits ein sich wiederholendes Schema der Durchmesserschwankungen auf. Alle 16 Abtastungen zeigen ein weitgehend konstantes Auftreten von Maxima und Minima in bestimmten Bereichen der Oberfläche. An der Probe selbst ist dies mit dem bloßen Auge gar nicht erkennbar. Durch arithmetische Mittelung jeweils der Amplituden der Maxima bzw. Minima und deren zugehörigen Lage auf dem Probenumfang (bezogen auf die Fertigungsrichtung), ergibt sich ein Aussehen der Prüfkörper wie es in Abb. 3-15 dargestellt ist. In Abb. 3-16 werden die entsprechenden Werte als Abweichung von den erwarteten Durchmesser von 3,6 mm, sowie der zugehörige Winkel aufgetragen.

Auffällig ist, dass die Maxima und Minima in der Nähe der Umkehrpunkte der Drehrichtungen der Schrittmotoren liegen. Die Bahn des Schleifkörpers beginnt bei der 90°-Markierung in Abb. 3-15 und beschreibt dann im Uhrzeigersinn einen Kreis. Die entstehende Außengeometrie der Probenkörper zeigt aber eher eine ovale Form mit einer Kippung der Längsachse um etwa 30°.

Abb. 3-15: Durchschnittliche Form der Zirkonoxid-Proben (Amplituden zur Verdeutlichung 10 fach vergrößert)

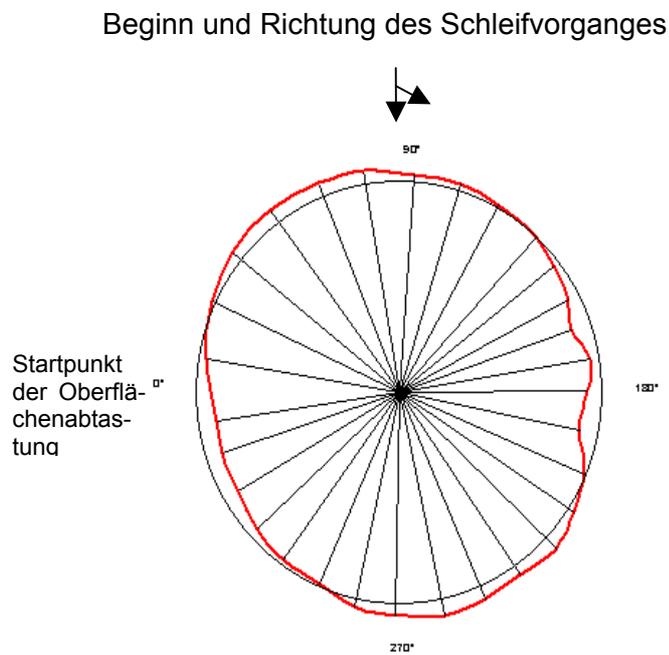
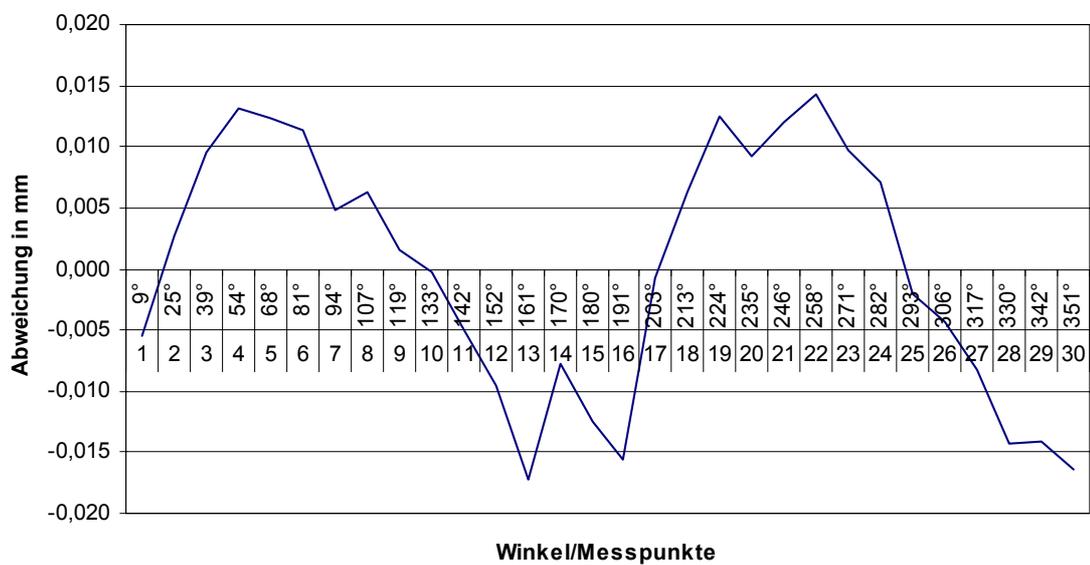


Abb. 3-16: Durchschnittliche Amplitudenhöhe bei der Zirkonoxid-Keramik



3.3.2 In-Ceram[®] - Probenkörper

Von den In-Ceram[®]-Probenkörpern konnten nur drei, aus Gründen der Verfügbarkeit der Messmaschine, vermessen werden. Auch wurden nur 23 statt 30 Messpunkte ermittelt. Bei der In-Ceram[®]-Keramik treten die Maxima und Minima, ähnlich wie bei der Zirkonoxid-Keramik, ungefähr in den selben Bereichen der Oberfläche auf. Durch die geringe Anzahl der vermessenen Proben zeigen sich bei der Bildung des arithmetischen Mittels, die Maxima und Minima nicht ganz so deutlich. Eine gewisse Ähnlichkeit der Abbildungen ist trotz der Mittelwertbildung aus nur drei Proben erkennbar.

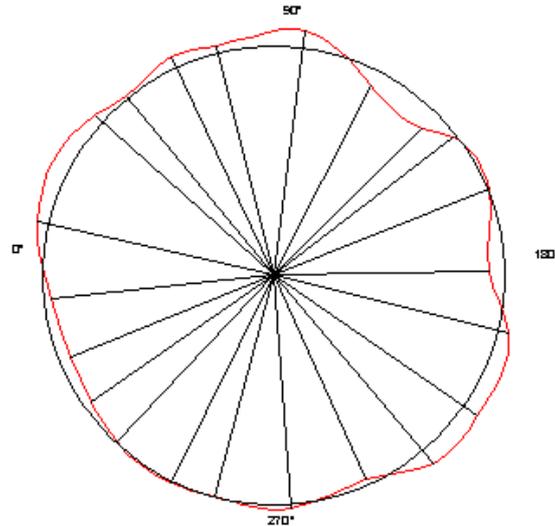
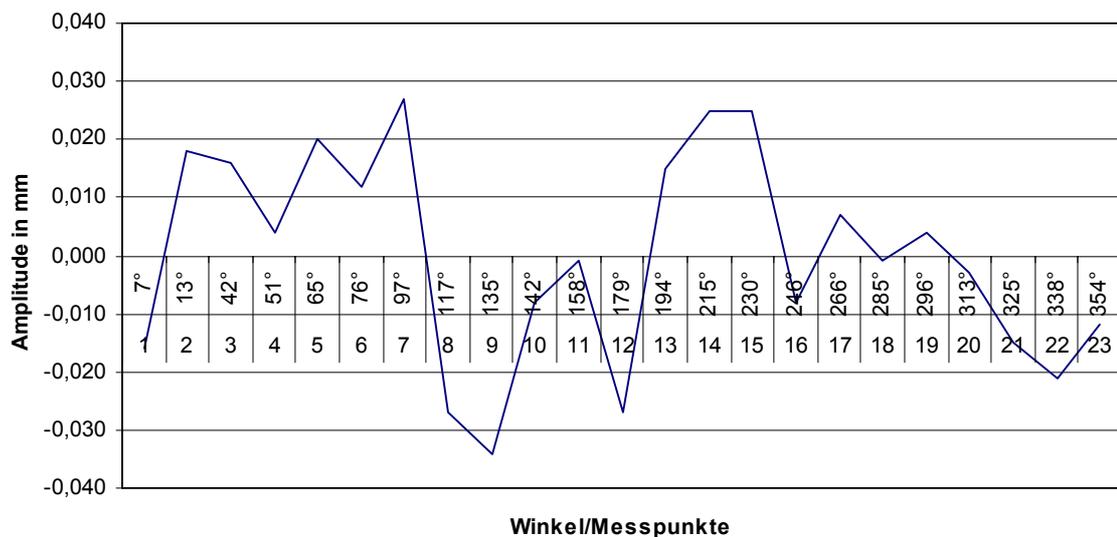


Abb. 3-17: Durchschnittliche Form der In-Ceram[®]-Proben (Amplituden 5 fach vergrößert)

Abb. 3-18: Durchschnittliche Amplitudenhöhe bei der In-Ceram[®]-Keramik



3.3.3 Vita Mk II[®]-Probenkörper

Die drei in den Vorversuchen hergestellten Proben Vita Mk II[®]-Keramik, wurde ebenfalls zu Vergleichszwecken vermessen. Auch hier zeigen sich wieder die charakteristischen Maxima und Minima in der Nähe eben jener oben beschriebener Umkehrpunkte der Schrittmotoren. Obwohl die Vita Mk II[®]-Proben, im Gegensatz zu den Zirkonoxid- und In-Ceram-Proben eine deutlich glattere Oberfläche aufwies, lag die Höhe der Maxima und Minima aber auf vergleichbarem Niveau. (Abb. 3-21) Im Vergleich zu der Abb. 3-15 / 3-17 sind Ähnlichkeiten vorhanden.

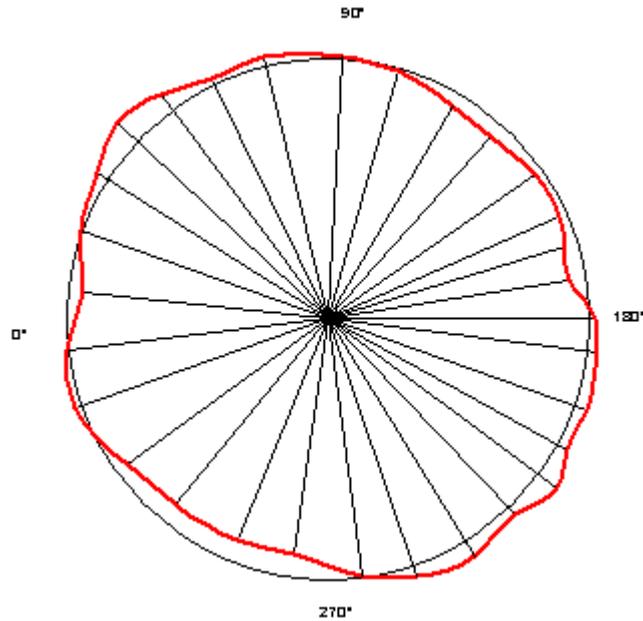
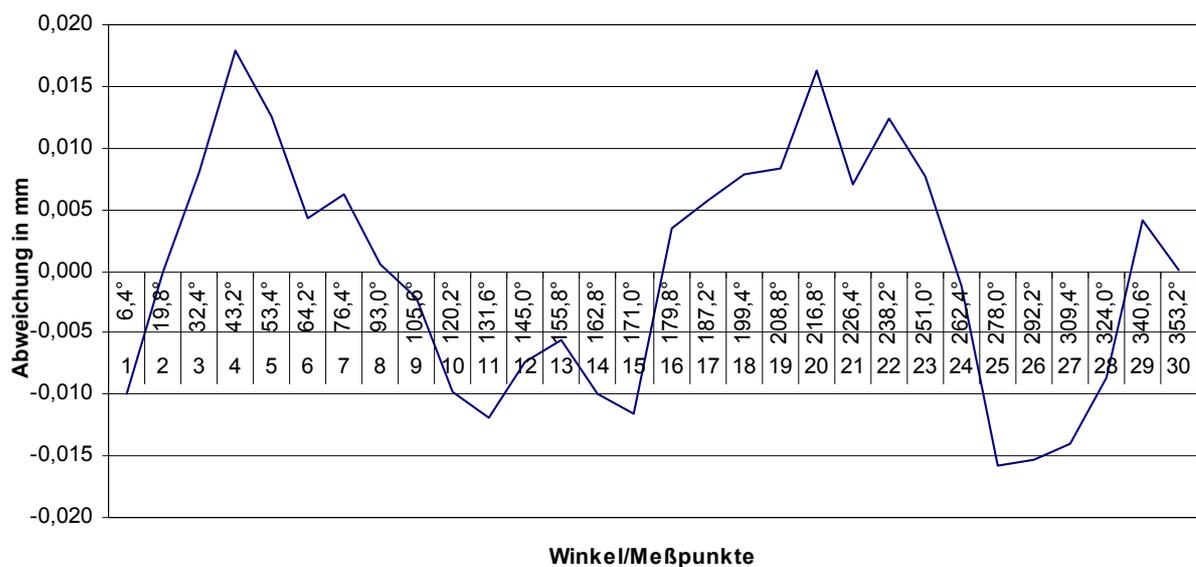


Abb. 3-19: Durchschnittliche Form der Vita Mk II-Proben (Amplituden 10 fach vergrößert)

Abb. 3-20 : Durchschnittliche Amplitudenhöhe bei der Vita Mk II-Keramik



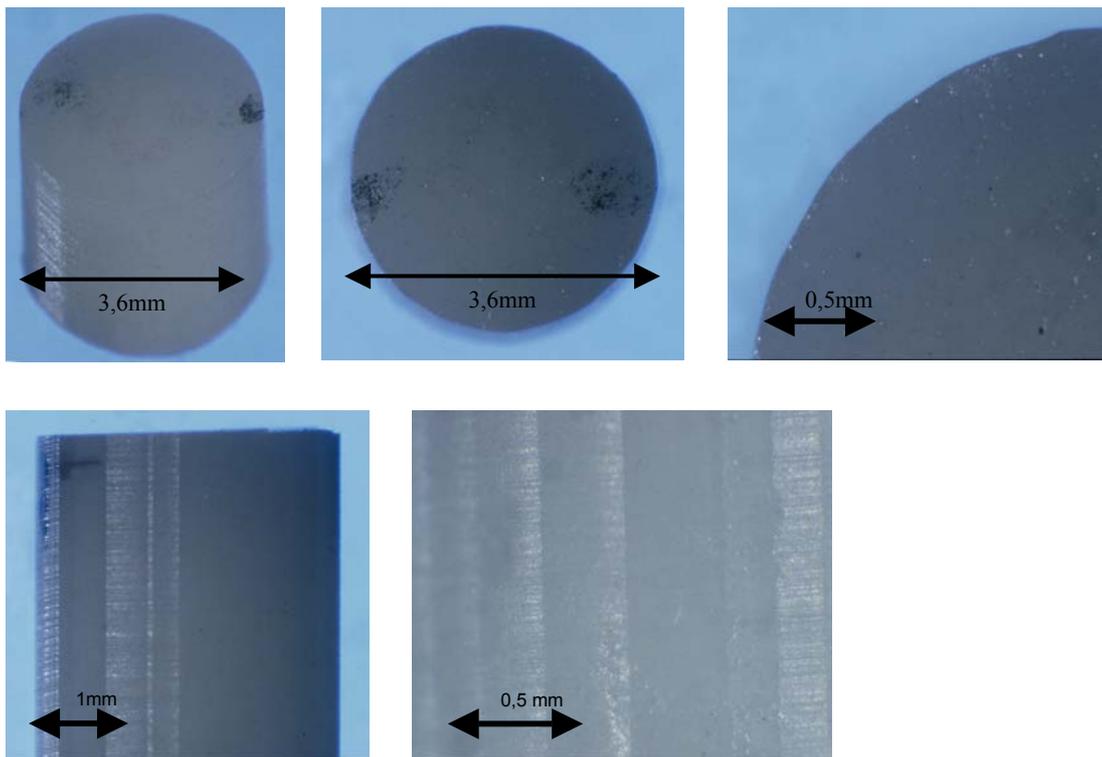


Abb. 3-21: Vita Mk II®-Keramik Probenkörper (Makroskopische Aufnahmen: Makroskop M 420 / Fa. Wild)

3.4 Schleifkörperverschleiß

Wie durch frühere Untersuchungen [72, 113, 129] bekannt, müssen die Diamantschleifkörper vor ihrem Einsatz vorgealtert werden, um den am Anfang erhöhten Verschleiß zunächst ablaufen zu lassen, bevor die eigentlichen Präparationen durchgeführt werden.

Anhand der, nach Vollendung der jeweils 38 Schleifdurchgänge, durchgeführten erneuten Vermessung des Schleifkörperdurchmessers (Abb. 2-11) zeigte sich, dass eine messbare Abnutzung stattgefunden hat. (Tab. 3-10 / 3-11)

Der Verschleiß läuft aber nicht in allen Bereichen des Schleifkörpers gleichmäßig ab. So nimmt bei den Normalkorndiamanten Nr.1, 2, 3 der obere Bereich durchschnittlich um 14 µm ab, also etwa dreimal mehr als an der Spitze (5 µm). Beim Schleifkörper Nr. 4 nimmt die Spitze nur etwa halb so stark ab wie der obere Bereich. (Tab. 3-10)

Anders bei den feinstgekörnten Diamanten Nr. 1, 2, 3. Hier gibt es keinen deutlich messbaren Unterschied zwischen den beiden Messpunkten. Die Schleifkörper nehmen über die gesamte Länge um ca. 2 μm ab. (Tab. 3-11)

Tab. 3-10: Durchmesser der diamantierten Schleifkörper (Normalkörnung) (fabrikneu, nach der Voralterung, nach Ende ihres Einsatzes / die Abnahme wurde nach Ende der Präparationen bestimmt / Angaben in mm)

Nr.	Spitze (1mm)			Mitte (3mm)			Konizität			Abnahme	
	neu	voralt	nach	neu	voralt	nach	neu	voralt	nach	Spitze (1mm)	Mitte (3mm)
1	1,152	1,124	1,116	1,199	1,163	1,145	1,35°	1,12°	0,83°	-0,008	-0,018
2	1,159	1,150	1,147	1,194	1,183	1,170	1,00°	0,95°	0,66°	-0,003	-0,013
3	1,154	1,120	1,117	1,199	1,163	1,152	1,29°	1,23°	1,00°	-0,003	-0,011
				<i>Mittelwert:</i>			1,21°	1,10°	0,83°	-0,005	-0,014
4	1,164	1,141	1,129	1,217	1,182	1,160	1,52°	1,18°	0,89°	-0,012	-0,022

Tab. 3-11: Diamantierte Schleifkörper (Feinstkörnung)

Nr.	Spitze (1mm)			Mitte (3mm)			Konizität			Abnahme	
	neu	voralt	nach	neu	voralt	nach	neu	voralt	nach	Spitze (1mm)	Mitte (3mm)
1	1,176	1,175	1,174	1,188	1,183	1,180	0,34°	0,23°	0,17°	-0,001	-0,003
2	1,160	1,154	1,150	1,175	1,173	1,172	0,43°	0,54°	0,63°	-0,004	-0,001
3	1,169	1,161	1,160	1,184	1,177	1,176	0,43°	0,46°	0,46°	-0,001	-0,001
				<i>Mittelwert:</i>			0,40°	0,41°	0,42°	-0,002	-0,002
4	1,198	1,192	1,186	1,208	1,200	1,198	0,29°	0,23°	0,34°	-0,006	-0,002

Der Verlauf dieser Abnutzung, d.h. ob diese nun linear erfolgte oder im Verlauf der 38 Präparationen stärker oder weniger stark auftrat, war aus den Ergebnissen aber nicht ablesbar.

3.5 Statistische Auswertung

3.5.1 Zirkonoxidkeramik

Betrachtet man die Standardabweichungen der Messreihen, so bewegen sich die Werte der Grob- wie der Feinbearbeitung zwischen 0,021 und 0,027. (Tab. 3-12)

Tab. 3-12: Standardabweichung der Schleifkörperpaare 1, 2, 3

	Normalkörnung			Feinstkörnung		
	Sk 1	Sk 2	Sk 3	Sk 1	Sk 2	Sk 3
Standardabweichung	0,0262	0,0257	0,0277	0,0231	0,0259	0,0219

Mit Hilfe der Perzentilwerte der einzelnen Messreihen kann man einen Blick auf die ungefähren Bereiche werfen, in denen sich die Messwerte bewegen. Streicht man die 10% höchsten und 10% niedrigsten Werte jeder Messreihe, streuen die restlichen 80% in einem Bereich zwischen 50 und 65 μm . (Tab. 3-13) So bewegen sich z.B. 80% der Durchmesserwerte der mit dem Schleifkörper 1 hergestellten Proben über die 38 Durchgänge in einem Bereich von 3,959 mm bis 4,016 mm.

Tab. 3-13: Größe des Bereiches in dem sich 80% der Messwerte bewegen

	Normalkörnung		
	Sk 1	Sk 2	Sk 3
Höchstwert in mm	4,016	3,996	4,000
Kleinstwert in mm	3,959	3,933	3,937
80% der Werte im Bereich (in μm)	57	63	63

	Feinstkörnung		
	Sk 1	Sk 2	Sk 3
Höchstwert in mm	3,616	3,590	3,555
Kleinstwert in mm	3,565	3,535	3,504
80% der Werte im Bereich (in μm)	51	55	51

Die Normalverteilungstests ergaben bei allen Datenreihen, dass von einer Gaußschen Normalverteilung ausgegangen werden kann.

Um einen eventuellen Zusammenhang zwischen der Anzahl der durchgeführten Schleifdurchgänge und dem jeweils zugehörigen Messwert zu ermitteln, wurden

für jede Messreihe eines Schleifkörpers der Pearsonsche Korrelationskoeffizient r und der zugehörige P-Wert errechnet. D.h. man wollte wissen, ob z.B. die Zu- oder Abnahme der Probendurchmesser mit der zunehmenden Anzahl an Schleifdurchgängen einen signifikanten Zusammenhang zeigt.

Dabei fanden sich sehr große Unterschiede zwischen den einzelnen Messreihen. (Tab. 3-14) So liegt z.B. bei der mit dem normalgekörnnten Schleifkörper 1 ermittelten Messreihe ein Korrelationskoeffizient von $r = -0,427$ (bei $\pm 0,3 < r < \pm 0,6$ spricht man von einem mäßigen Zusammenhang) und ein P-Wert von 0,02 vor (ein P-Wert $< 0,05$ ist signifikant, d.h. die Irrtumswahrscheinlichkeit ist $< 5\%$). Auch beim feinstgekörnnten Schleifkörper Nr. 1 liegt eine signifikante Korrelation vor.

Ganz anders verhält es sich beim Schleifkörper Nr. 2, bei dem bei der Grob- wie Feinbearbeitung keine signifikante Korrelation feststellbar war. Beim grobkörnigen Schleifkörper Nr. 3 ist die Korrelation zwar nur schwach ($r = -0,27$), beim Feinstkörnigen hingegen mit $r = +0,83$ ungewöhnlich stark und v.a. mit einem positiven Vorzeichen d.h. hier verhalten sich im Gegensatz zu allen anderen Messreihen die Anzahl der Durchgänge zu dem entsprechenden Durchmessern gleichsinnig. D.h., wie eigentlich erwartet, mit steigender Anzahl der Durchgänge steigt auch der Durchmesser der hergestellten Proben.

Tab. 3-14: Korrelation zwischen Anzahl der Durchgänge mit den zugehörigen Messwerten (Rot: signifikante Korrelationen)

	Normalkörnung		
	Sk 1	Sk 2	Sk 3
Korrelationskoeffizient r	-0,4269	0,0213	-0,2739
P-Wert	0,0075	0,8990	0,0961

	Feinstkörnung		
	Sk 1	Sk 2	Sk 3
Korrelationskoeffizient r	-0,3040	-0,0914	0,8583
P-Wert	0,0714	0,5852	0,0000

Tab. 3-15: Korrelation der Messreihen untereinander (Rot: signifikante Korrelationen)

	Sk 2 normal		Sk 3 normal	
	r	P-Wert	r	P-Wert
Sk 1 normal	0,2985	0,0687	-0,0506	0,7629
Sk 2 normal			-0,3573	0,0276

	Sk 2 fein		Sk 3 fein	
	r	P-Wert	r	P-Wert
Sk 1 fein	0,0654	0,7047	-0,3561	0,0330
Sk 2 fein			-0,0296	0,8602

Die Betrachtung der Korrelationen der einzelnen Messreihen untereinander, ergab erwartungsgemäß ein uneinheitliches Bild. (Tab. 3-15) Nur in einem Fall, zwischen den beiden normalgekörnnten Schleifkörpern 1 und 2 gab es eine positive Korrelation der Messwerte. In allen anderen Fällen gab es keine oder nur negative Korrelationswerte, die aber bei dieser Untersuchung keine zusätzlichen Informationen liefern.

Der in Kap. 3.1.2 / Abb. 3-6 bereits geäußerte Verdacht des Zusammenhangs des Kurvenverlaufs der absoluten Differenzen zweier aufeinanderfolgender Schleifdurchgänge zwischen Grob- und Feinbearbeitung bestätigt sich durch die Bestimmung des Pearsonschen Korrelationskoeffizienten. (Tab. 3-16)

Da die Messreihen der Grob- und der Feinbearbeitung fast identische Standardabweichungen aufweisen, war dieser Zusammenhang aber zu erwarten. (Tab. 3-12)

Untersucht man aber den Zusammenhang zwischen der Anzahl der durchgeführten Schleifdurchgänge mit den Messwerten der absoluten Differenzen zweier aufeinanderfolgender Schleifdurchgänge, lässt sich kein signifikanter Zusammenhang feststellen.

Tab. 3-16: Korrelationen der absoluten Differenzen zweier Durchgänge der Schleifkörper 1-3

	AnzSD		Sk 1 normal		Sk 2 normal		Sk 3 normal	
	R	P-Wert	R	P-Wert	R	P-Wert	R	P-Wert
Sk 1 normal	-0,0337	0,8433						
Sk 1 fein	0,1288	0,4609	0,5210	0,0080				
Sk 2 normal	-0,1095	0,5189						
Sk 2 fein	-0,0729	0,6680			0,4152	0,0106		
Sk 3 normal	0,0704	0,6788						
Sk 3 fein	0,0541	0,7505					0,3245	0,0500

3.5.2 In-Ceram®

Betrachtet man die Standardabweichung der Messreihen beträgt sie im Durchschnitt 0,040. Die beiden Messreihen (Normal- und Feinstkörnung) weisen zwar wie bei der Zirkonoxidkeramik etwa identische Werte auf, diese sind aber im Vergleich zur Grünkeramik fast doppelt so hoch. (Tab. 3-17)

Tab. 3-17: Standardabweichung (Schleifkörper Nr. 4)

	Normalkörnung	Feinstkörnung
Standardabweichung	0,0394	0,0386

Auch der Bereich in dem 80% der Messwerte streuen (nach Streichung der 10% höchsten und niedrigsten Werte), ist mit 117 µm bei der Grobbearbeitung und 96 µm bei der Feinbearbeitung im Vergleich mit der Zirkonoxidkeramik ebenso fast doppelt so groß. (Tab. 3-18)

Tab. 3-18: Größe des Bereiches in dem sich 80% der Messwerte bewegen (Schleifkörper Nr. 4)

	Normalkörnung	Feinstkörnung
Höchstwert (in mm)	4,078	3,644
Kleinstwert (in mm)	3,961	3,548
80% der Werte im Bereich (in µm)	117	96

Die Normalverteilungstests ergaben bei beiden Datenreihen, dass von einer Gaußschen Normalverteilung ausgegangen werden kann.

Bei der Bestimmung des Pearsonschen Korrelationskoeffizienten zeigt sich bei der Grobbearbeitung eine mit $r = 0,55$ und $P = 0,0001$ signifikante Korrelation der jeweiligen Probendurchmesser mit der Anzahl der Schleifdurchgänge. Dagegen liegt bei der Feinbearbeitung nur eine sehr schwache Korrelation vor. (Tab. 3-19)

Tab. 3-19: Korrelation zwischen Anzahl der Schleifdurchgänge mit dem zugehörigen Messwert (Schleifkörper Nr. 4 / Rot: signifikante Korrelationen)

	Normalkörnung	Feinstkörnung
Korrelationskoeffizient r	0,5538	0,1637
P-Wert	0,0001	0,2885

Anders als bei der Zirkonoxid-Keramik liegt hier nur ein schwacher Zusammenhang der absoluten Differenzen zweier aufeinanderfolgender Schleifdurchgänge zwischen Grob- und Feinbearbeitung vor. (Tab. 3-21) Auch zeigt sich wie bei der Zirkonoxidkeramik kein signifikanter Zusammenhang mit der Anzahl der Schleifdurchgänge.

Tab. 3-20: Korrelation der absoluten Differenzen zwischen zwei aufeinanderfolgenden Durchgängen (Schleifkörper Nr. 4)

	Normalkörnung		Feinstkörnung	
	r	P-Wert	r	P-Wert
Anzahl SD	0,0384	0,8069	0,2413	0,1191
Normalkörnung			0,2321	0,1341

4 Diskussion

Die vorliegende Arbeit zeigt, dass die neue Grünkörper-Keramik in ihrem derzeitigen Zustand mit dem Prototypen der CAC-Schleifeinheit und den verwendeten handelsüblichen Instrumenten nicht befriedigend zu bearbeiten war. Dabei war festzustellen, dass eine Bearbeitung mit den Hartmetallinstrumenten nicht möglich ist. Mit den diamantierten Schleifkörpern war sie, hauptsächlich aufgrund des schlechten Abtransports der Schleifspäne und der mangelnden dynamischen Steifigkeit der Schleifeinheit, nur unzureichend durchführbar.

Im Folgenden wird erläutert, warum die Bestimmung des Verschleiß- und Dimensionsverhaltens der diamantierten Schleifkörper und Hartmetallinstrumente anhand der Änderung der Außengeometrie hergestellter Proben nicht möglich war.

Dabei wird auf generelle Probleme der Bearbeitung vorliegender Keramik, sowie spezifische Probleme der Instrumente und der Schleifeinheit eingegangen. Einzelne Ursachen, die für die schlechte Bearbeitbarkeit der Keramik verantwortlich sind, werden gezielt beleuchtet und Verbesserungsvorschläge gemacht. Ein Vergleich zu den Ergebnissen aus dem Zusatzexperiment an der In-Ceram[®]-Keramik soll helfen Fehlerquellen auch im Zusammenhang mit einer anderen Keramik zu betrachten.

Abschließend erfolgt noch eine Einordnung der Grünbearbeitung der neuen Zirkonoxid-Keramik in aktuell angewendete Verfahren.

4.1 Generelle Probleme der Bearbeitung vorliegender Zirkonoxid-Keramik

Durch die weiche Struktur der Grünlinge entstanden spezielle Probleme, die sonst bei der Keramikhartbearbeitung keine Rolle spielen. Auf das Problem der Verwendung eines Kühlmittels wurde bereits hingewiesen (Kap. 2.5.2.1). Aufgrund der Bauweise der Schleifeinheit konnte durch die Staubentwicklung und dem Zusetzen der verwendeten Instrumente nicht auf die Spraykühlung des Winkelstücks verzichtet werden. Generell bleibt die Frage zu klären, ob bei der Bearbeitung vorliegender Grünkörper überhaupt der Einsatz eines Kühlmittels erlaubt ist, ohne die mechanischen Eigenschaften der Keramik nach dem Reaktionsintern dadurch zu verschlechtern. In diesen Versuchen wurde als Kühlmittel zwar nur normales Leitungswasser aus der Behandlungseinheit, an die die Schleifeinheit angeschlossen war, verwendet, trotzdem könnten mit dem Kühlmittel Fremdstoffe in die poröse Struktur der Grünlinge eingeschwemmt werden, die durch das anschließende Trocknen nicht wieder zu entfernen sind. Auch Wasser selbst scheint nicht unproblematisch zu sein, weil manche in der Industrie eingesetzten Grünkörper eingeschweißt geliefert werden, um sie vor Luftfeuchtigkeit zu schützen. In wie weit dies auch für die vorliegenden Grünkörper gilt, bleibt weiteren Untersuchungen vorbehalten.

Druckluft anstelle der Kühlflüssigkeit würde das Problem eventuell umgehen. Zum einen kann sich durch die Mischung aus Luft und den feinen Keramikpartikeln kein Schleifschlamm bilden, der gut an den Instrumenten und ungeschützten Teilen der Bearbeitungseinheit haftet, zum anderen dringt keine Flüssigkeit in die poröse Grünkörperstruktur ein.

Ohne spezielle Schutzvorrichtungen der mechanischen Teile und der Umgebung ist der Einsatz von Druckluft, aufgrund der zu erwartenden erheblichen Staubbelastung nicht möglich. Die extrem feinen, abrasiven und gesundheitschädlichen Stäube würden ein Kapseln der mechanischen Teile der Schleifeinheit und eine sehr wirksame Absaugung mit Feinstaubfiltern erfordern. Auch die Zufuhr genau in den Bearbeitungsbereich ist durch die beengten

Platzverhältnisse während der Präparation ohne grundlegenden Umbau der Schleifeinheit unmöglich.

Die weiche, kreideartige Struktur der Grünkörper macht das Handling sehr schwierig. Es kommt leicht zur Fraktur dünn auslaufender Ränder oder zum Brechen des gesamten Körpers, wenn der auf ihn einwirkende Schleifdruck zu hoch wird. Das zu bearbeitende Teil muss stets möglichst breitflächig mit dem Grundkörper verbunden bleiben, da es sonst abbricht und eine weitere Bearbeitung somit unmöglich wird. Auch beim Vermessen oder Abtrennen der Proben kam es leicht zu Beschädigungen.

Aus Kostengründen standen für ausgiebige Vorversuche nicht genügend Zirkonoxid-Rohlinge zur Verfügung, wodurch eingehende Untersuchungen zur Prozessoptimierung nicht möglich waren.

4.2 Problematik der Hartmetallfräsen an der Zirkonoxid-Keramik

Anders als zunächst vermutet, scheiterte die Bearbeitung der Zirkonoxid-Keramik mit Hartmetallfräsen völlig. Schuld daran war einerseits die ungünstige Kühlmittelzufuhr durch das Rotring-Winkelstück, die aufgrund der Richtung und Menge nicht in der Lage war die Spanräume der Instrumente genügend frei zu spülen. Aber auch konstruktionsbedingte Gründe, wie die insgesamt sehr kleinen Dimensionen der Instrumente und deren Verzahnung mit zu kleinen Spanräumen behinderte den Abtransport der Späne, was zum Zusetzen der Hartmetaller führte.

Das Design der Instrumente ermöglichte es nicht die Späne schnell aus dem Zerspanungsbereich abzutransportieren. Man müsste folglich Instrumente mit sehr großen Spanräumen wählen. Die Rotation der Schneiden sollte dabei die Späne gezielt in eine Richtung aus dem Kontaktbereich herausschleudern. So nutzt beispielsweise das auf der IDS 2001 vorgestellte Cercon-System® (Fa. Degussa / Hanau) für die Weißbearbeitung Instrumente mit nur wenigen Schneiden aber einem großen Drallwinkel. Dies scheint den gerichteten Abtransport der Späne zu erleichtern. (Abb. 4-1)

Begünstigend für das schnelle Zusetzen der Instrumente ist darüber hinaus, dass anders als beim manuellen Einsatz, bei dem mehr intermittierend gearbeitet wird, die Hartmetaller hier ständig mit dem Material in Kontakt waren.

Im Gegensatz zu diamantierten Schleifkörpern lassen sich bei Hartmetall-Instrumenten die Wirkwinkel gezielt verändern und speziell auf die Einsatzbedingungen abstimmen. (s. Kap. 1.3.1.1) Wie sich zeigt, sind die handelsüblichen Hartmetall-Instrumente ungeeignet, bei

den vorliegenden Bedingungen die Grünkeramik zu bearbeiten. Eine gezielte Untersuchung zur Ermittlung eines geeigneten Instrumenten-Designs wäre dazu nötig.

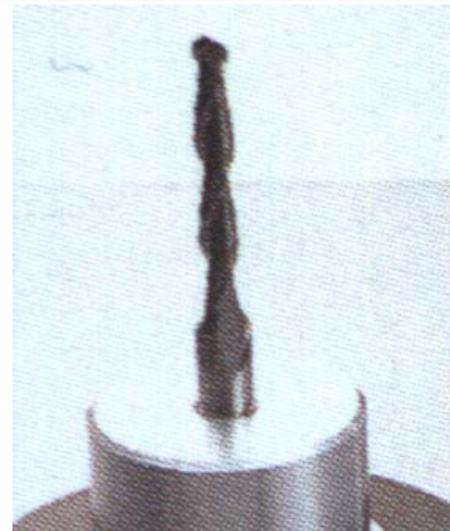


Abb. 4-1: Bearbeitungsinstrument des Cercon-Systems® [aus: 30]

4.3 Bearbeitung mit diamantierten Schleifkörpern

Aufgrund der nur sehr geringen Stückzahl an Zirkonoxidrohlingen konnten nur drei Schleifkörperpaare untersucht werden. Wie an den Grafiken (Abb. 3-3 a-f) ersichtlich, schwanken die Messwerte z.T. erheblich zwischen den einzelnen Messungen. Anders als erwartet sind die Schwankungen der gesamten Messreihe so groß, dass durch die lineare Regression keine klare Tendenz der Werte darstellbar ist.

Gerade bei den Diamantfinierern kam es darüber hinaus z.T. zu widersinnigen Ergebnissen. Der Schleifkörper 3 zeigt im Gegensatz zu allen anderen Messreihen eine klar steigende Tendenz der Probendurchmesser. Dies entspräche zwar der ursprünglichen Überlegung, dass bei durch den Verschleiß abnehmendem Instrumentendurchmesser der Probendurchmesser steigen müsste. Allerdings zeigen die anderen fünf Schleifkörper, Normal- wie Feinstkörnung, von einzelnen ansteigenden Kurvenabschnitten abgesehen, eine eher fallende

Tendenz.

Einerseits könnte man den feinstgekörnten Schleifkörper Nr. 3 als Ausreißer betrachten, denn zu Beginn besteht schon eine im Vergleich mit den anderen Messreihen ungewöhnlich große Abweichung der gemessenen Probendurchmesser zu den aufgrund des Instrumentendurchmessers erwarteten Werten. Dies könnte auf eine erhöhte Rundlaufabweichung hinweisen. Andererseits sprechen die sehr geringen Schwankungen zwischen den einzelnen Messwerten und die sehr gleichmäßige Steigung nicht für ein rein zufällig entstandenes Ergebnis. Auch besitzt diese Messreihe eine hohe Korrelation mit der Anzahl der durchgeführten Schleifdurchgänge (Tab. 3-14). Veränderungen an der Schleifeinheit oder dem Material, die eventuell diese Abweichende Messreihe hervorgerufen haben, konnten nicht festgestellt werden. Weitere Messreihen mit deutlich mehr Schleifkörpern wären nötig, um diese Ergebnisse besser bewerten zu können.

Eine Erklärung für die bessere Bearbeitbarkeit der Zirkonoxid-Keramik mit den diamantierten Schleifkörpern als mit den Hartmetallinstrumenten könnte darin zu sehen sein, dass die unzähligen kleinen „Spanräume“ zwischen den Diamantkörnern durch die hohe Umfangsgeschwindigkeit weniger Verklebungsmöglichkeit für den Schleifschlamm bietet, als es die klar definierten Spanräume der Hartmetallinstrumente tun. Hier könnten sich die Keramikpartikel zu größeren und festeren Einheiten verkleben. Trotzdem ist auch bei den diamantierten Instrumenten die Spraykühlung nicht in der Lage den Kontaktbereich zwischen Instrument und Material optimal frei zu spülen.

4.4 Wahl der Instrumentengeometrie

Da zylindrische Proben hergestellt werden sollten, lag es nahe auch zylindrische Instrumente zu verwenden. Bei der Wahl der Form der Spitze musste die beabsichtigte Präparationsbahn berücksichtigt werden, was in vorliegendem Fall nur eine plane Form zuließ. Eine andere Geometrie, z.B. spitz, rund oder torpedoförmig, würde durch die geringere Abtragsleistung im Vergleich zum Umfang zu Auslenkungen des Instrumentes führen. Die durchgeführten Schleifbahnen der Grobpräparation erforderten nämlich, dass durch die Arbeit im Vollmaterial auch die Instrumentenspitze ausreichend Material abtragen kann.

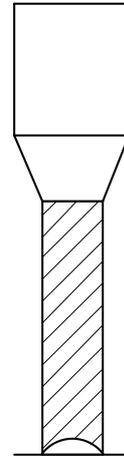


Abb. 4-2

Allerdings ist auch die gewählte plane Fläche an der Spitze nicht die ideale Form, weil sie eine geringere Abtragsleistung besitzt und so dem Vortrieb einen Widerstand entgegensetzt. Optimal wäre eine an der Spitze konkave Form. Hier müssten nur die Randbereiche Material abtragen, an denen dieselbe Umfangsgeschwindigkeit herrscht wie am Rest des Arbeitsteils. (Abb. 4-2)

4.5 Bearbeitungsbahnen

Die Präparationsbahnen wurden so gewählt, dass das Instrument, nach den entsprechenden Ausräumfunktionen, eine Kreisbahn abfährt und dabei in einem Zug den Keramikzylinder aus dem Rohling herausschleift. Dies bedeutet, dass ein kontinuierlicher und großflächiger Kontakt zwischen Arbeitsteil und Keramik besteht. Darüber hinaus war die Menge des abzutragenden Materials bei der Grobbearbeitung sehr groß und vor allem in den Bereichen, in denen das Instrument im Vollmaterial arbeiten musste, der Abtransport der Späne zusätzlich erschwert. (Abb. 4-3) In den schmale Spalt, den der Schleifkörper bei der Präparation hinterließ konnte die Spülflüssigkeit nur in unzureichender Menge eindringen.

Bei der Feinbearbeitung wird zwar nur noch eine kleine Materialmenge abgetragen, allerdings läuft der Schleifkörper in einem Teil der Kreisbahn in einem Spalt, welcher nur um 0,2 mm größer ist als der Instrumentendurchmesser. (Abb. 4-4) Dadurch wurde auch hier der Abtransport der Späne behindert. Um dies zu vermeiden, müssten die Ausräumfunktionen verän-

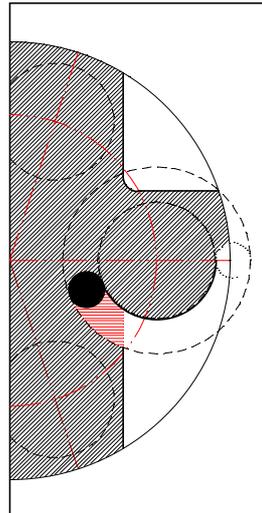


Abb. 4-3: Grobbearbeitung im Vollmaterial

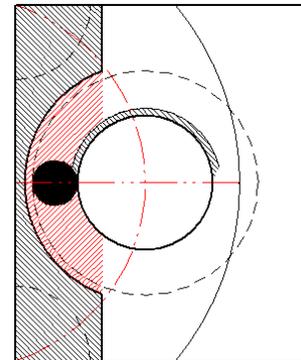


Abb. 4-4: Feinbearbeitung

ndert werden, um in allen Bereichen der Präparation dem Spülmedium genügend Angriffsmöglichkeit zu geben.

Auch bei der Feinbearbeitung war der Bearbeitungsbereich, d.h. der Kontaktbereich zwischen Instrument und Material, zu groß.

Verkleinern könnte man diesen Bearbeitungsbereich z.B. indem das Instrument mehrere übereinanderliegende Kreisbahnen beschreibt, d.h. den Probenzylinder Stück für Stück von oben nach unten entstehen ließe. Somit wäre der Abtransport der Späne weniger behindert. Dies erfordert aber eine vertikale Bewegungsmöglichkeit der Schleifeinheit, die bei dem Prototypen noch nicht vorgesehen ist.

Bei anderen CAD/CAM-Systeme, wie z.B. dem Cercon[®]-System (Fa. Degussa / Hanau) berechnet die Software die Schleifbahnen so, dass bei der Bearbeitung der Bereich am Instrument der gerade Material abträgt nur so groß ist, dass ein Abtransport der Späne ungehindert stattfinden kann. Allerdings benötigt man dafür eine mehrachsige Schleifeinheit.

4.6 Ursachen der makroskopischen Unebenheiten und Formabweichungen der Keramikproben

Für die deutliche Welligkeit der Probenoberflächen sind mehrere Ursachen verantwortlich:

- Eine der Hauptursachen liegt im Zusetzen der Instrumente aufgrund der Struktur der Zirkonoxid-Grünlinge. Wie bereits erwähnt, kommt es durch die sehr feinen Stäube, auch bei den diamantierten Schleifkörpern, zur Bildung eines recht schwer entfernbaren Schleifschlammes, der, wie bei den Hartmetallen, zum Zusetzen der Spanräume zwischen den Diamantkörnern führte.
- Ferner könnte auch der für die Stabilität der Grünlinge verwendete Binder das Verschmieren der Instrumente gefördert haben. Diese Vermutung ergibt sich aus den Vorversuchen. Bei den dabei verwendeten Graphitblöcken kam es weniger zum Zusetzen der Instrumente, obwohl es sich auch hier um ein gepresstes Material, allerdings ohne den Zusatz von Bindemitteln, handelte.
- Eine Beeinflussung der Ergebnisse durch Inhomogenitäten innerhalb der Rohlinge ist ebenfalls nicht auszuschließen. Solche Inhomogenitäten können zu schwankenden Prozesskräften und so zu unterschiedlichen Auslenkungen der Schleifkörper führen. Durch das experimentelle Stadium, und die somit noch fehlende industrielle Herstellung, kann noch nicht von standardisierten Arbeitsabläufen bei der Herstellung ausgegangen werden. So könnte es z.B. durch das uniaxiale Pressen bei der Herstellung der Grünkörper zu Dichteunterschieden zwischen der Ober- und der Unterseite kommen. Der Pressdruck nimmt aufgrund der Reibung zwischen der Wand der Pressform und dem Grünling, sowie wegen der inneren Reibung im Pulver, in Pressrichtung ab. Da aber den Rohzylindern nach der Herstellung nicht mehr anzusehen ist, welche Seite beim Pressen oben oder unten war und auch das Umsortieren der Messwerte nach den Ebenen der Rohlinge keine besonders auffälligen Abweichungen der Ergebnisse aufzeigte, wurde diesen Überlegungen nicht weiter nachgegangen. Eine eigene Untersuchung auf Dichteunterschiede in den Rohlingen wäre hierzu nötig.

- Die Zuführung des Kühlmittels über das Winkelstück erfolgt unter einem zu flachen Winkel längs der Schleifkörperachse, so dass vor allem die Bereiche der Schleifkörperspitze nicht richtig freigespült werden konnten. Eine seitliche Zufuhr direkt in den Zerspanungsbereich wäre hier besser gewesen, war aber wegen der geringen Platzverhältnisse während des Schleifvorgangs nicht zu realisieren. Durch dieses Zusetzen kann es zu Auslenkungen des Instrumentes durch den sich anstauenden Schleifstaub kommen, was wiederum zum Springen des Instrumentes auf der Werkstoffoberfläche führen würde.
- Oberflächenrauigkeiten waren nach der Grobbearbeitung eigentlich zu erwarten, da zunächst große Materialmengen abgetragen wurden, wobei der Schleifkörper einen großen Teil der Bahn immer auch in Vollmaterial zurücklegen musste. Gerade in diesem Bereich kann die Kühlflüssigkeit besonders schwer den notwendigen Abtransport der Schleifpartikel gewährleisten, da in die nur 1,2 mm breite Bahn, die der Schleifkörper im Vollmaterial hinterlässt, die Spülflüssigkeit kaum hineinkommt. Dazu kommt, dass bei der Vorpräparation auch die Stirnfläche des Instrumentes immer im Material arbeitet, was durch die dort verminderte Abtragsleistung, zwangsläufig zu Ablenkungen des Instrumentes führen musste. Aus diesem Grund wurde auch ein Feinbearbeitungsschritt mit einem Feinstkorndiamanten angeschlossen. Dieser brauchte nur noch eine kleine Schichtstärke abzutragen und vor allem seine Stirnfläche musste nie im Vollmaterial arbeiten. Trotzdem reichte anscheinend auch hier die Spülleistung nicht aus, ein Zusetzen zu verhindern.
- Die Behinderung des Abtransportes der Partikel führte darüber hinaus wahrscheinlich zur Bildung von Aufbauschneiden (Abb. 4-5), welche den Durchmesser des Schleifkörpers scheinbar vergrößerten, wodurch mehr Material abgetragen wurde, als es der Instrumentendurchmesser bei gegebener Kreisbahn eigentlich erwarten ließ (Tab. 3-1). Diese Aufbauschneidenbildung ist in der Zerspanungstechnik schon lange bekannt und wurde auch schon bei der Zahnhartsubstanzbearbeitung untersucht [42, 91]. Zur Bildung

von Aufbauschneiden kommt es dadurch, dass sich während der Spanbildung die Spanunterseite durch die Erwärmung, Verformung und Trennung in einem aktivierten Zustand befindet. Deswegen kann es zu Verklebungen des Materials mit dem Werkzeug, bis hin zu Pressverschweißungen kommen. Die

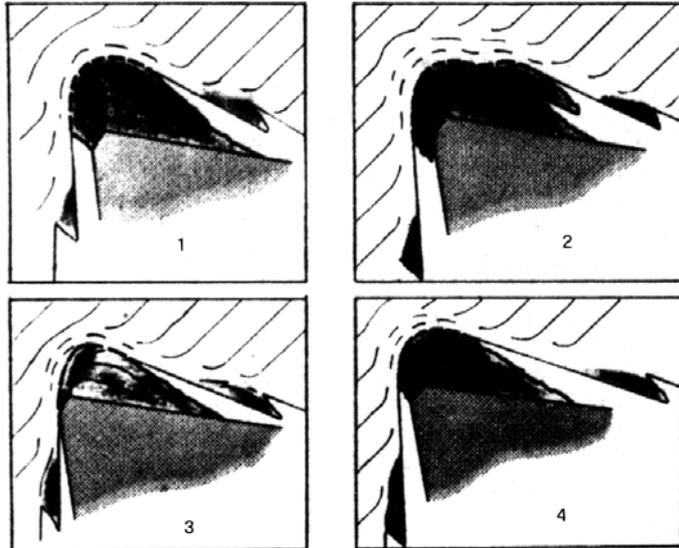


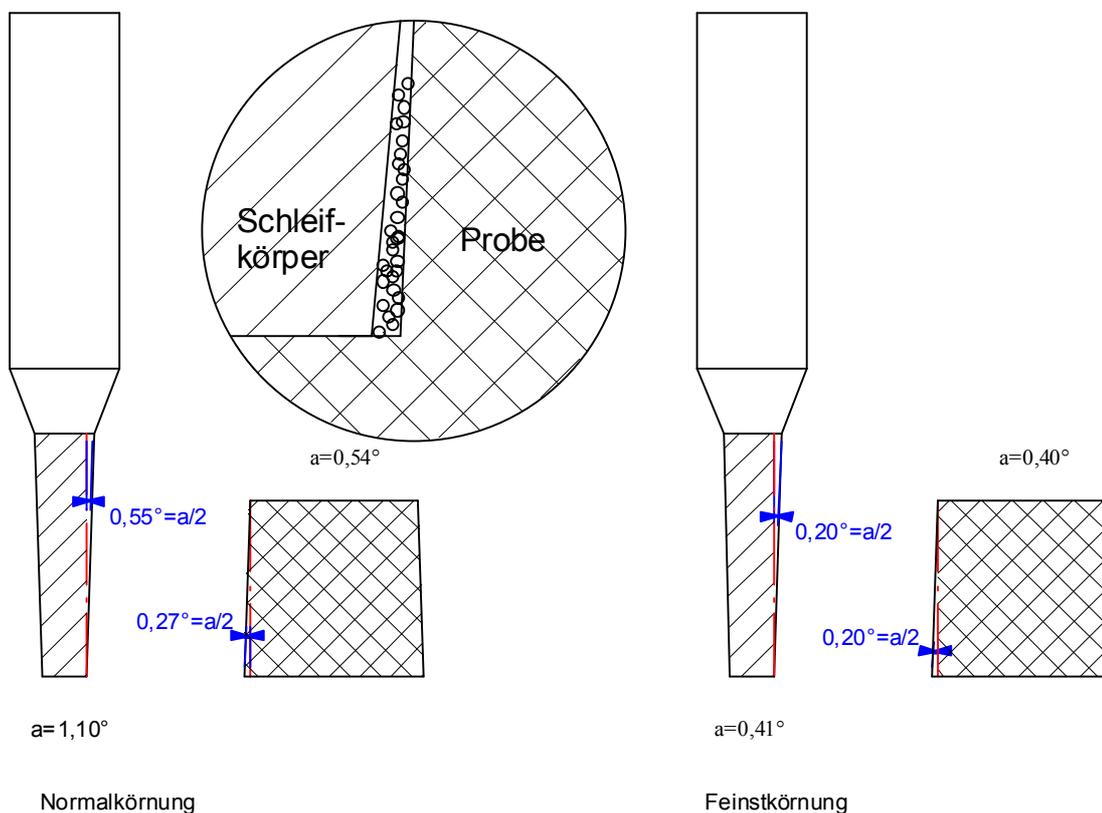
Abb. 4-5: Schema der periodischen Aufbauschneidbildung (aus: [121])

entstehenden Aufbauschneiden, gleiten in zeitlichen Abständen zwischen Frei- und Schnittfläche ab und verschlechtern so die Oberflächengüte erheblich.

- Zum anderen kann ein zugeschmiertes Instrument bei gegebenem Vortrieb der Maschine nur eine verminderte Schleifleistung erbringen, was immer zu einem Ansteigen des Schneiddruckes und dadurch bedingt zu Ausweichbewegungen des Schleifkörpers führt. In der Zerspanungstechnik werden verschiedene Vorschläge zur Vermeidung des Zuschmierens gemacht (z.B. Hochdruckspülung, Ultraschall zum Lockern der Späne oder die Wahl eines größeren Vorschubs, damit der Werkstoff selbst die Zusetzungen wegdrückt) [91]. Vermutlich kam es bei dieser Untersuchung ab einem bestimmten Schleifdruck von selbst zum Ablösen der Auflagerungen und der Schleifkörper „springt“ um den Betrag der Ausweichbewegung wieder zurück, was die recht regelmäßige Anordnung der Wellen erklären könnte.

- Bei der Grobbearbeitung fällt weiterhin auf, dass die Keramikzylinder eine geringere Konizität aufweisen als die Instrumente. D.h., dass die Spitze des Schleifkörpers mehr Material abgetragen haben muss, als die anderen Bereiche. (Tab. 3-4) Eine Erklärung dafür wäre, dass sich mehr Schleifschlamm zwischen der Spitze des Instrumentes und den basalen Teilen der Keramikprobe ansammelt. Dadurch dass die Spraykühlung, nur von oben aus Richtung des Instrumentenschaftes auftrifft, werden die weiter unten gelegenen Bereiche kaum erreicht. Dies wiederum kann zu einer Vergrößerung des wirksamen Instrumentendurchmessers durch Aufbauschneidenbildung führen. Ein solch weiches Material wie die Zirkonoxid-Grünkörper wird sich auch durch die Abrasivität des aufgestauten Schleifschlammes an der Instrumentenspitze abtragen lassen. (Ausschnitt in Abb. 4-6)
Dieser Effekt tritt aber nur bei der Grobpräparation auf.
Bei der Feinbearbeitung entstehen zu Beginn der Bearbeitung im Schnitt Proben die eine fast identische Konizität wie die Schleifkörper besitzen. Mit zunehmendem Verschleiß steigt die Probenkonizität, so dass im weiteren

Abb. 4-6: Differenz der Konizität zwischen Schleifkörpern und Proben



Verlauf Proben mit einer größeren Konizität als die Instrumente hergestellt werden. Dies ließe sich mit dem durch den Verschleiß erhöhten Schleifdruck und der damit verbundenen Ausweichbewegung des Schleifkörpers erklären.

- Begünstigend für Ausweichbewegungen des Schleifkörpers ist das Lagerpiel des Spannfutters im Winkelstück. Bei einer manuellen Präparation hat dieses kaum einen Einfluss, wohingegen bei einer computergeführten Bahnkurve sich eine solche horizontale und vertikale Beweglichkeit der Instrumente sicher in der Präparation widerspiegelt. Der Schleifkörper hat so die Möglichkeit, bei steigendem Schleifdruck oder sich zwischen Instrument und Probe anstauendem Schleifschlamm, ausweichen. (Abb. 4-7)

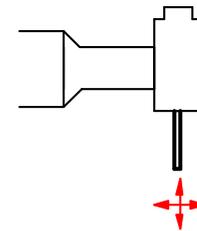


Abb. 4-7: Bewegungsmöglichkeit des Instrumentes im Winkelstück

Neben den bereits beschriebenen Ursachen, spielt auch die Rundlaufabweichung und eine Unwucht der Instrumente eine entscheidende Rolle für den scheinbar vergrößerten Durchmesser der Instrumente, als auch für die abweichende Konizität der Proben (Abb. 4-8). So wird sich bei einem Instrument, welches eine Rundlaufabweichung und eine Unwucht besitzt, dies besonders an der Spitze bemerkbar machen. D.h. praktisch kompensiert die Rundlaufabweichung während der Rotation z.T. die Konizität des Arbeitsteils. Dadurch trägt v.a. die Spitze des Instrumentes mehr Material ab, als man aufgrund ihres Durchmessers erwarten sollte. So entstehen Proben, die nicht nur einen geringeren Durchmesser, sondern die auch eine geringere Konizität aufweisen, als es das Arbeitsteil erwarten ließe. Die Rundlaufabweichung ist bei den Finierern deutlich geringer [72]. Dies bestätigt sich dadurch, dass die Konizität der Proben nach der Feinbearbeitung stets größer ist als die der Instrumente. (Tab. 3-4)

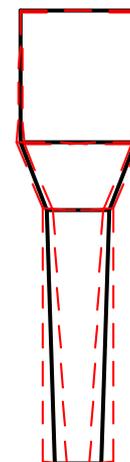


Abb. 4-8: Rundlaufabweichung

Eine zunehmende Rundlaufabweichung kann durch Verbiegungen des Metallträgers der Schleifkörper, aufgrund von Ermüdungserscheinungen wegen der hohen Umdrehungszahlen und hoher Schleifkräfte entstehen.

Darüber hinaus führen Unwuchten an schnell rotierenden Teilen zu Schwingungen der gesamten Bearbeitungseinheit. Gerade bei Maschinen mit geringer dynamischer Steifigkeit kommt es durch Rattererscheinungen zu schlechteren Oberflächenqualitäten. Nicht umsonst haben professionelle Bearbeitungsmaschinen einen sehr robusten Aufbau. So wiegt z.B. die Schleifeinheit des Cad.esthetics®-Systems (Fa. Ivoclar, Schaan /Lichtenstein) rund 1,5 Tonnen.

- Entscheidend für die Oberflächengüte ist auch die Drehrichtung der Instrumente bei der Bearbeitung. Wie schon von Linke und anderen Autoren [23, 74, 129, 135], beobachtet, muss man bei Präparationen zwischen Ein- und Auslauftrand unterscheiden. (Abb. 4-9) Gerade bei einem so weichen Material wie

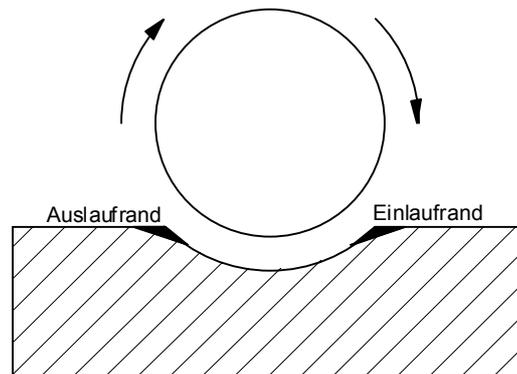


Abb. 4-9: Ein- und Auslauftrand

dem Zirkonoxidgrünkörper führen Kräfte, die durch die Rotationsbewegung vom Körper weg weisen, zu Ausrissen der am Rand nur wenig gestützten Materialanteile. Am Einlauftrand hingegen wird das Material gegen das darunter liegende stabilisiert und es kommt so weniger zu Aussprengungen. Ein Grund, der für die Bearbeitung dieses weichen Materials durch „Gleichlaufschleifen“ spricht, d.h. die Drehrichtung des Instrumentes ist mit der Vorschubrichtung identisch. (Abb. 1-2)

- Die annähernd ovale Außengeometrie der Proben (Abb. 3-15 / 3-17 / 3-19), mit je zwei ausgeprägten Maxima und Minima und einer Amplitude von durchschnittlich 15 µm, entsteht wohl größtenteils durch Bewegungsmöglichkeiten des Ankers im Schrittmotor in Achsrichtung (Abb. 4-10). Auch das

Spiel der Gewindestange in der Gewindebohrung am Schlitten zur Übertragung der Rotation der Welle in eine Translation des Schlittens (Abb. 2-7) spielt eine Rolle. Diese Maxima treten nicht genau an den Umkehrpunkten der Kreisbahn auf, son-

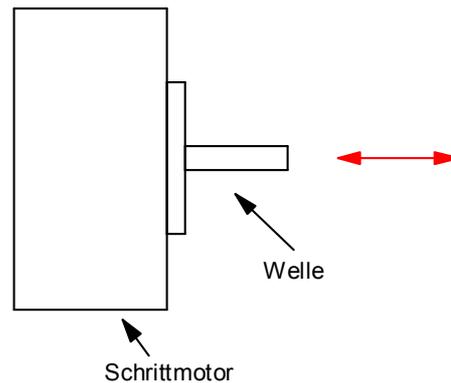
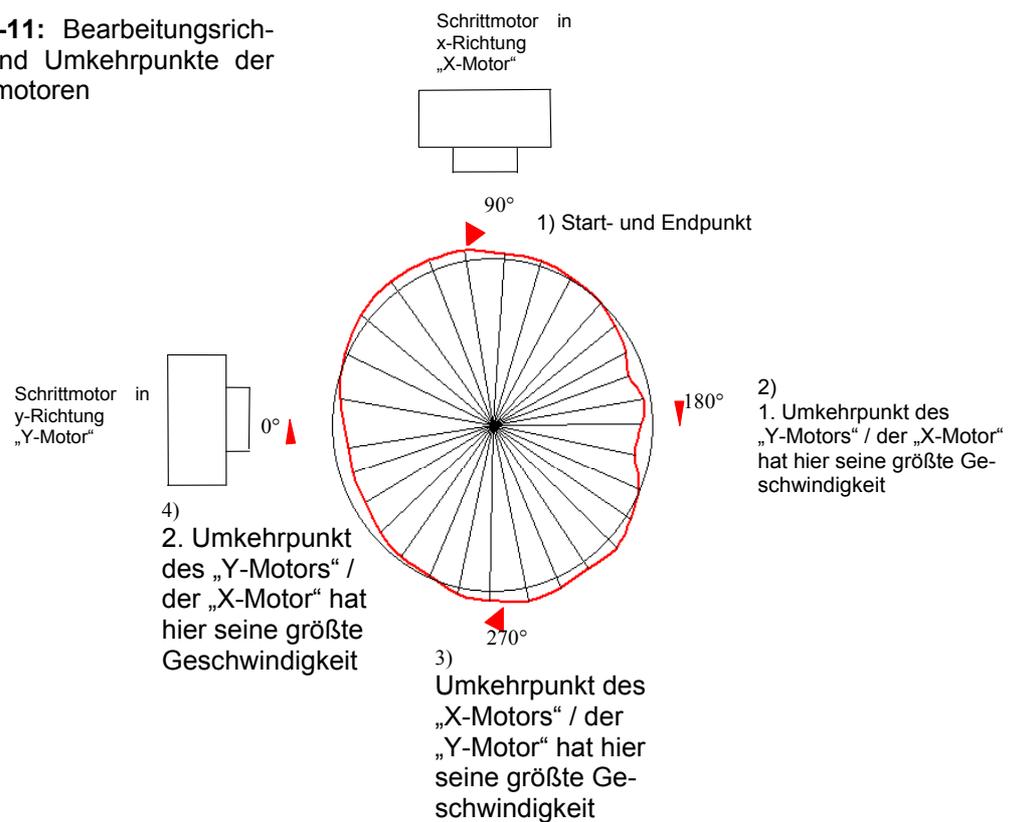


Abb. 4-10: Lagerspiel der Schrittmotoren

dern um einige Grad versetzt dahinter. Dies resultiert daraus, dass der Schlitten der gewünschten Bewegung immer etwas hinterherläuft. Ändert sich nämlich die Drehrichtung, folgt der Schlitten nicht gleich der nun entgegengesetzten Richtung, da die ersten Schritte des Motors erst die Strecke des Lagerspiels der Antriebswelle und des Gewindespiels am Schlitten abfahren müssen. An der Außengeometrie des Probenkörpers macht sich diese verzögerte Änderung der Bewegungsrichtung durch die Ausbildung von Maxima bemerkbar, die den eigentlich zu erwartenden Durchmesser an dieser Stelle überschreiten. Betrachtet man den Präparationsvorgang im einzelnen, sieht man, dass die Motorwelle je nach Position des Schleifkörpers auf Druck oder auf Zug belastet wird. Zu Beginn wird der Schlitten mit dem Winkelstück bei stehendem Instrument bis zum Kontakt mit dem Keramikblock herangefahren (Abb. 4-11 Punkt 1). Das bedeutet, dass die Welle des in x-Richtung bewegenden Motors, durch das Heranfahren des Schlittens in das Motorgehäuse gedrückt wird und auch das Gewindenspiel am Schlitten Richtung Schrittmotor gestaucht ist. Während der ersten Hälfte der Kreisbahn muss der Motor bis zum Punkt 2 mit zunächst zunehmender, vom Punkt 2 bis zum Punkt 3 mit wieder abnehmender Geschwindigkeit in der selben Richtung drehen, den Schlitten also schieben. Am Umkehrpunkt (Punkt 3) kehrt sich die Drehrichtung des Motors um, damit der Schlitten nun in die entgegengesetzte Richtung bewegt und so die Kreisbewegung abgeschlossen wird. Dabei bleibt der Schlitten in der Bewegung etwas zurück. Die ersten Schritte des Motors müssen erst das Lager- und Gewindenspiel überbrücken, bevor der Schlitten die Bewegungsrichtung ändert. Für den in

y-Richtung arbeitenden Schrittmotor gilt das gleiche, nur hat dieser zweimal einen Wechsel der Drehrichtung, nämlich bei Punkt 2 und 4. Am Umkehrpunkt des x-Motors ist dieses Maximum geringer ausgeprägt als bei den Umkehrpunkten des y-Motors, was für ein größeres Lagerpiel von Motor und Gewindestange am y-Motor spricht. Die seitlichen Minima lassen sich u. a. dadurch erklären, dass bei der Vermessung mit der Mikrometerschraube, durch die Drehung der Messbacke es zum Abrieb von Material kam. (s.a. Kap. 4.8.1)

Abb. 4-11: Bearbeitungsrichtung und Umkehrpunkte der Schrittmotoren



-
- Weitere Beeinträchtigungen des Schleifvorganges können auch durch die Laufunruhe des Schlittens entstehen. Der auf zwei Schienen, mit umlaufender Kugellagerführung, gelagerte Kreuztisch besitzt ein gewisses Lagerspiel. Man merkt bei der manuellen Bewegung des Kreuztisches ein leichtes Ruckeln, wenn eine neue Kugel im Lager auf die Schiene trifft.
 - Eine Positionierungskontrolle, z. B. über lineare Wegaufnehmer, erfolgt bei diesem Prototyp der Schleifeinheit noch nicht, so dass keine Korrektur der Bahnkurve durch die Steuereinheit erfolgen kann.
 - Auch die hohe Beanspruchung der hier verwendeten Schleifeinheit durch eine Vielzahl von Untersuchungen, die mit ihr bereits durchgeführt wurden, hat sicher zu Abnutzungserscheinungen an den Lagern geführt. Bei den für den Prototypen verwendeten Bauteilen kam es zunächst mehr auf eine leichte und preiswerte Verfügbarkeit, als auf hohe Verschleißfestigkeit an. Gerade die Spindelschrauben unterliegen einer hohen mechanischen Belastung und müssen regelmäßig von Schmutz und Abrieb gereinigt und neu geschmiert werden.
 - Eine eher untergeordnete Rolle bei der Entstehung der welligen Oberfläche spielen auch Schrittfehler und Motorschwingungen der Schrittmotoren. Diese Ausschwingvorgänge durch die Trägheit des Rotors können zu unkontrollierten Schrittfolgen und Sprüngen des Motors führen, was aber, wie unter Kap.2.5.2.1 beschrieben, durch das Einstellen einer Vorlast weitestgehend beseitigt wurde. Außerdem würde sich dieses Phänomen durch die geringe Steigung der zum Vortrieb verwendeten Spindel mit einem M5-Feingewinde (0,5 mm pro Umdrehung) sowieso nur wenig auf die Bewegung des Schlittens auswirken.

Keine der genannten möglichen Ursachen ist allein für die schlechte Oberflächenqualität und die Formabweichungen der Proben verantwortlich, da sich aber Fehlerquellen addieren, beeinträchtigen sie in ihrer Gesamtheit das Ergebnis doch deutlich.

Betrachtet man mit Hilfe der perzentilen Verteilung (Tab. 3-13) den Bereich in dem sich, trotz der schlechten Oberflächenqualität, die Durchmesserwerte der Zirkonoxidproben bewegen, fällt auf, dass schon jetzt bereits 80% der Proben in einem Toleranzbereich von 50-60 µm liegen. D.h. durch Minimierung oben genannter Fehlerquellen könnte man diesen Wert sicher noch deutlich verbessern.

Ließen sich diese Werte als Randspalten bei Restaurationen erreichen, wäre dies ein durchaus akzeptables Ergebnis.

4.7 Vergleich zu den Ergebnissen der Bearbeitung der In-Ceram[®]-Keramik

Die in dem Zusatzexperiment hergestellten In-Ceram[®]-Proben wiesen ebenso wie die Zirkonoxidproben eine wellige Oberfläche auf. Die Amplituden dieser Wellen fielen insgesamt sogar noch stärker aus als bei der Zirkonoxid-Keramik. Dies war einerseits schon makroskopisch zu sehen, andererseits wurde es durch die stärker schwankenden Messwerte und die deutlich höhere Standardabweichung bestätigt. (Tab. 3-9 / 3-17)

Ursache ist auch hier neben dem schlechten Abtransport der Schleifpartikel die geringe mechanische Steifigkeit der Schleifeinheit, da bei der härteren In-Ceram[®]-Keramik die Prozesskräfte während des Schleifvorganges deutlich größer sind und somit auch höhere Anforderungen an die Maschine gestellt werden.

Der in Gegensatz zu der Zirkonoxidkeramik ansteigende Verlauf der Messwerte (Abb. 3-9 / 3-10) entspricht den ursprünglichen Erwartungen und wird durch den hohen Korrelationskoeffizienten zur Anzahl der Schleifdurchgänge des normalgekornten Diamanten bestätigt. Bei den feinstgekornten Diamanten fällt diese Korrelation aber deutlich schwächer aus. (Tab. 3-19) Dadurch, dass der Anstieg der Probendurchmesser deutlich stärker ausfällt als die Abnahme des Schleifkörperdurchmessers, muss es durch die höheren Prozesskräfte zu Ausweich-

bewegungen des Instrumentes gekommen sein. Die gleichzeitige leichte Zunahme der Probenkonizität bestätigt diese Vermutung.

Diese Ergebnisse lassen aber keine repräsentative Aussage zu, da lediglich eine kleine Serie von Proben mit nur einem Schleifkörperpaar hergestellt wurde.

4.8 Systembedingte Messungenauigkeiten

4.8.1 Messfehler durch die Mikrometerschraube

Messungenauigkeiten der Mikrometerschraube beeinflussen die Messreihen. Zwar ist die Messgenauigkeit werksseitig mit $\pm 2 \mu\text{m}$ angegeben, wobei aber zu beachten ist, dass eine solche Genauigkeit eigentlich schon einen klimatisierten Raum voraussetzt, so dass eine Messgenauigkeit von maximal $\pm 5 \mu\text{m}$ eher realistisch erscheint. D.h. gemessene Veränderungen unter $\pm 2 \mu\text{m}$, v.a. bei den Veränderungen des Schleifkörperdurchmessers, sind sehr kritisch zu betrachten.

Auch kommt es durch die sich beim Schließen drehenden Messbacken zu einem merklichen Abrieb und zur Einebnung feiner Rauigkeiten der Oberfläche der Zirkonoxidkörper. Da die erwartete Rautiefe nach der Grobbearbeitung mit normalgekornten Diamanten etwa $30\text{-}50 \mu\text{m}$ beträgt, ist vorstellbar, dass die Oberfläche der Proben etwas aufgelockert ist und nachfolgend durch den Druck der sich beim Schließen drehenden Messbacken abgerieben wird. Nach der Feinbearbeitung müsste dieser Effekt eigentlich weniger ins Gewicht fallen, weil der aufgelockerte Bereich geringer ist. Bei der Vermessung der Grünkörper wäre die Verwendung einer Mikrometerschraube ohne drehende Messbacken besser gewesen, um den Abrieb zumindest zu verkleinern.

Obwohl die Mikrometerschraube durch eine Drehmomentratsche den Druck, den die Messbacken auf die Probe ausüben, konstant hält, kam es gelegentlich zu kleinen Randfrakturen, die eine erneute Messung an etwas versetzter Stelle nötig machten.

Auch die Messung der Schleifkörperdurchmesser wird durch die Mikrometer-

schraube beeinflusst. Durch die beim Schließen drehende Messbacke, kann sich der diamantierte Schleifkörper durch ein weiter hervorstehendes Diamantkorn beim Messen leicht wegdrehen. Durch die spezielle Halterung (Abb. 2-10) wurde versucht, diesen Messfehler möglichst zu vermeiden.

4.8.2 Probleme bei der Oberflächenabtastung

Obwohl es sich bei dem genutzten Numerex Mehrkoordinaten-Messgerät® (CS 1518-12C) der Fa. Zeiss / Jena um ein hoch präzises Gerät zur Oberflächenabtastung handelt, muss einschränkend gesagt werden, dass sich das Einsatzgebiet eher auf größere Bauteile erstreckt. Durch die relativ große Rubinkugel (\varnothing 1 mm), die zur Vermessung genutzt wurde, können nur Formabweichungen, in diesem Fall Abweichungen von der idealen Zylinderform, dargestellt werden. Eine Aussage über die Größe der Amplituden einzelner Wellenberge und -täler ist leider nicht möglich.

Das Einspannen und das Anfahren der einzelnen Messpunkte gestaltete sich aufgrund der kleinen Proben als sehr schwierig. Die Proben mussten so fest in ein Dreibackenfutter eingespannt werden, dass sie während des Messvorganges nicht verrutschten. Dabei durften sie aber nicht beschädigt werden.

Des Weiteren machte die starke Welligkeit der Oberfläche Probleme beim Anfahren der sehr eng nebeneinander liegenden Messpunkte. Trifft die Rubinkugel nämlich nicht auf eine ebene Fläche, wird dies als Fehlmessung interpretiert und muss wiederholt werden.

4.9 Instrumentenverschleiß / Instrumentengeometrie

Der Verschleiß der diamantierten Instrumente entsteht durch eine ständige Abnutzung des Diamantbelages durch die abrasive Wirkung des zu zerspanenden Werkstoffs. Einerseits verringert sich der Durchmesser der Schleifkörper durch den Verlust ganzer Diamantkörner, sowie durch die Abnutzung der in der Oberfläche fest eingesinterten Diamantkörner. Andererseits kommt es durch diese Abnutzung auch zur Verkleinerung der Spanräume und dadurch zu einem verminderten Abtransport der Werkstoffpartikel. Dies wiederum führt zu Ausweichbewegungen des Schleifkörpers. Beide Effekte spiegeln sich in der Außengeometrie hergestellter Werkstücke wieder. Gerade die Stirnfläche der Instrumente unterliegt einem erhöhten Verschleiß, da die Abtragseffektivität hier viel geringer ist als am Umfang. Ein Verschleiß hier, wird stets zu Ablenkungen des Schleifkörpers führen, da durch den geringeren Abtrag an der Spitze sich diese der konstanten Vorschubbewegung mehr widersetzen wird.

Die ursprüngliche Idee, aus der Außengeometrie der Probenkörper direkte Rückschlüsse auf den Verschleiß der Schleifkörper zu ziehen, scheiterte aus in Kapitel 4.6 beschriebenen Gründen. Die daraus resultierenden schlechten Oberflächenqualitäten und Formdefekte führten zu sehr großen Schwankungen der Messwerte, je nachdem ob man auf einem Wellenmaximum oder in einem Wellenminimum mit der Mikrometerschraube gemessen hat. Die ermittelten Werte weisen somit keine klar bestimmbare Tendenz auf. Dadurch sind auch keine Aussagen über die Standzeiten der Instrumente zu treffen, die interessant für die Bewertung der Grünbearbeitung wären.

Bei den diamantierten Schleifkörpern wird in computergesteuerten Schleifanlagen immer ein Unterschied zwischen der gemessenen Außengeometrie des Schleifkörpers und dem durch ihn erzeugten Präparationsprofil bestehen, sofern nicht Korrekturgrößen die verschleißbedingten Veränderungen und die von vornherein leicht unterschiedlichen herstellungsbedingten Außengeometrien bei der Präparation berücksichtigen. So muss z.B. bei jeder Präparation die leichte Konizität des eigentlich zylindrischen Instrumentes beachtet werden, die aber

von anderen Parametern, wie z.B. der Rundlaufabweichung, dem Zusetzen der Spanräume oder den Lagerspielen der Bearbeitungseinheit modifiziert wird. (Abb. 4-12)

Die Tab. 3-4 / 3-10 / 3-11 und die Betrachtungen aus Kap. 4.6 machen deutlich wie komplex das Zusammenspiel der einzelnen Einflussgrößen auf die entstehende Probengeometrie ist. Es besteht nicht der anfangs vermutete einfache Zusammenhang zwischen dem durch den Verschleiß abnehmenden Instrumentendurchmesser und einem analog dazu ansteigenden Proben-
 durchmesser. Durch den Instrumentenverschleiß treten weitere Faktoren, v.a. seitens der Schleifeinheit hinzu, deren Einflüsse auf die Probengeometrie sich im einzelnen nicht mehr nachvollziehen lassen. Die Ermittlung von Korrekturgrößen wird somit neben den Instrumenten und dem Material auch stark von der jeweiligen Bearbeitungseinheit abhängen.

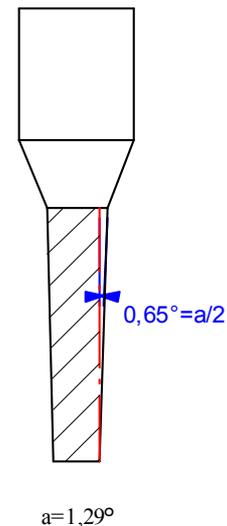


Abb. 4-12 : Durchschnittliche Konizität der fabrikneuen Schleifkörper (Normalkörnung)

4.10 Grünbearbeitung im Vergleich zu anderen Bearbeitungsverfahren

Mit der Bearbeitung von Keramiken im Grünzustand betritt man weitgehend Neuland v.a. bei der Anwendung im zahnmedizinischen Bereich. Nur wenige Publikationen, auch in der industriellen Keramikbearbeitung, behandeln die Grünbearbeitung, so dass man kaum auf Erfahrungen in diesem Themenbereich zurückgreifen kann. Auch das Computer-Aided-Design / Computer-Aided-Manufacturing (CAD/CAM) ist in der Zahnmedizin ein Gebiet aktueller Forschung.

Keramische Restaurationen durch Hartbearbeitung gesinterter Rohlinge herzustellen bedingt einen hohen Zeit- und Kostenaufwand. Die somit wenig wirtschaftliche Hartbearbeitung sollte sich möglichst auf die Erzeugung der gefor-

dernten Oberflächenqualitäten und Maßtoleranzen beschränken, die durch bisherige Sinterverfahren nicht zu erreichen sind.

Die Grünbearbeitung wird schon seit einiger Zeit in der Medizintechnik eingesetzt. So werden z.B. Gelenkkugeln für Hüftgelenksimplantate als Grünkörper hergestellt und im grünen Zustand spanend bearbeitet. Nach dem Dichtsintern erfolgt dann die Feinbearbeitung durch Schleifen und Polieren. Normalerweise schrumpft ein Grünkörper beim Sintern um linear bis zu 20%, wodurch ein gewünschtes Formteil entsprechend größer dimensioniert werden muss, was wiederum voraussetzt, dass die Schrumpfung beim Sintern isotrop erfolgt. Findet keine isotrope Schrumpfung statt, ist eine Nachbearbeitung für eine präzise Passung, wie sie in der Mikromechanik oder in der Zahnmedizin benötigt werden, unumgänglich. Beispielsweise wird dieses Verfahren vom Cercon-System[®] der Fa. Degussa / Hanau oder beim DCM-Verfahren (Direct Ceramic Machining / ETH Zürich) [128] angewendet, welche allerdings die Zirkonoxid-Keramik nicht als echten Grünkörper, sondern in einem vorgesinterten Zustand (Weißkörper) verwenden. Bei dieser sogenannten Weißbearbeitung entstehen Restaurationen, die eine deutlich höhere Kantenstabilität aufweisen und so ein einfacheres Handling ermöglichen. Ein Material, welches beim Dichtsintern nicht mehr schrumpft, würde dies umgehen. Allerdings ist bisher noch keine Keramik auf dem Markt, die als Weißkörper geliefert wird und später beim Sintern nicht mehr schrumpft.

Eine Lösung für das Problem der Sinterschrumpfung bietet die hier vorgestellte Zirkonoxid-Keramik. Durch das sogenannte Reaktionssinterverfahren wird die Schrumpfung kompensiert. Im Bereich der Nichtoxidkeramiken ist diese Technik bereits seit längerem bekannt, im Bereich der Oxidkeramiken existieren bislang aber nur wenige Ansätze.

Wie bei den anderen Bearbeitungsverfahren, geht es auch bei der Grünbearbeitung darum die optimalen mechanischen Werte einer Hochleistungskeramik zu erhalten. Dazu muss die Keramikherstellung unter industriellen Bedingungen erfolgen, um eine konstante und perfekte Gefügequalität zu erreichen. Für die Bearbeitung müssen dann geeignete Verfahren zu Anwendung kommen.

Aus den in dieser Untersuchung gesammelten Erfahrungen mit der Grünbearbeitung vorliegender Keramik zeigt sich, dass im Gegensatz zur Hartbearbei-

tung noch höhere Anforderungen an die Instrumente und die Bearbeitungseinheit gestellt werden. Um ein Verschmieren der Instrumente zu vermeiden, muss ein guter Abtransport der Schleifspäne erfolgen. Die weiche Struktur und die damit verbundene geringe Kantenstabilität erfordern eine sehr vorsichtige Behandlung, um Beschädigungen v.a. dünn auslaufender Strukturen zu vermeiden.

Die Grünkörper sind in dieser Form noch zu weich, um daraus z.B. scharf auslaufende Kronen- oder Inlayränder zu fertigen.

Eine alternative Verarbeitungstechnik für die neue Zirkonoxidkeramik stellt, neben der zerspanenden Bearbeitung, das Prägen von Formkörpern dar. Dabei könnte man eventuell auch in der Zahnmedizin das „Prinzip der verlorenen Form“ anwenden. Dabei wird eine der gewünschten Restauration entsprechende Hohlform aus PMMA (Polymethylmethacrylat) hergestellt. Nach dem Pressen des Pulvers in die Form, wird der Grünling nicht mehr entformt, sondern die Hohlform pyrolysiert während des Reaktionssinterverfahrens. Somit würde die Gefahr der Beschädigung des Grünkörpers während der Bearbeitung entfallen.

Die Weiterentwicklung des Materials vor allem im Hinblick auf die Grünkörperhärte wäre nötig oder man versucht durch eine Vorsinterung kantenstabilere Rohlinge (Weißkörper) zu erzeugen. Durch die Weiterentwicklung könnte diese Keramik wegen ihrer praktisch schrumpfungsfreien Sinterung durchaus eine Alternative zu der momentanen Hart- und Weißbearbeitung darstellen.

4.11 Schlussfolgerung

- Die neue Zirkonoxid-Keramik lässt sich im vorliegenden Zustand als Grünkörper nicht mit Hartmetallinstrumenten in dem Prototypen der CAC-Schleifeinheit bearbeiten.
- Die Bearbeitung mittels diamantierter Schleifkörper ist möglich aber nicht zufriedenstellend.
- Auf den Einsatz eines Kühlmittels konnte nicht verzichtet werden.
- Um die Grünbearbeitung in der CAC-Schleifeinheit zu verbessern, müssten umfangreiche Veränderungen an der Maschine (v.a. im Bezug auf den Abtransport des Schleifstaubs und die dynamische Steifigkeit), als auch dem Bearbeitungsablauf durchgeführt werden.
- Aufgrund der welligen Probenoberfläche und den entstandenen Formabweichungen konnte anhand der Änderung der Außengeometrie der Keramikproben nicht auf den Verschleiß der Instrumente geschlossen werden.
- Aussagen über die Standzeiten der Instrumente bei der Grünbearbeitung konnten aufgrund der erzielten Ergebnisse nicht gemacht werden.
- Die Weiterentwicklung der Grünkörper, v.a. in Bezug auf ihre Grünhärte ist notwendig, um das generelle Handling zu verbessern.

5 Zusammenfassung

Ziel der vorliegenden Untersuchung war es das Verschleiß- und Dimensionsverhalten zylindrischer diamantierter Schleifkörper und Hartmetallfräsen während der Bearbeitung einer Zirkonoxidkeramik im Grünzustand und der Vita-In-Ceram-Alumina-Keramik® (Fa. Vita / Bad Säckingen) zu bestimmen. Gleichzeitig sollte die Bearbeitbarkeit der Grünkeramik mit der verwendeten Schleifeinheit überprüft werden.

Bei der Herstellung vollkeramischer Restaurationen mit Hilfe von CAD/CAM-Systemen (Computer-Aided-Design / Computer-Aided-Manufacturing) spielt das Verschleiß- und Dimensionsverhalten der eingesetzten Instrumente eine entscheidende Rolle. Durch die Steuerung der Rotationsachse der Bearbeitungsinstrumente mittels eines Computers muss zu jeder Zeit die exakte Form des Instrumentes bekannt sein. Verändert sich diese im Laufe der Bearbeitung, ändert sich bei gleichbleibender Bahnkurve auch sein Präparationsprofil, was sich in der Außengeometrie der hergestellten Restauration bemerkbar macht. Durch Berücksichtigung der Verschleißdaten der Instrumente und der dadurch ermittelten Standzeit kann erreicht werden, dass die Bearbeitungsanlage stets optimale Ergebnisse liefert. Eine höhere Präzision, würde folglich den CAD/CAM-Systemen eine zunehmende wissenschaftliche und klinische Akzeptanz verschaffen.

CAD/CAM-Systeme erschließen neue Materialien für die Anfertigung von Zahnersatz. Vor allem bei den Hochleistungskeramiken, die die maschinelle Bearbeitung industriell gefertigter Rohlinge erfordern, eröffnen sich neue Möglichkeiten. So stellen die Zirkonoxidkeramiken aufgrund ihrer hohen Risszähigkeit und Biegefestigkeit in der aktuellen Forschung einen der wichtigsten Werkstoffe zur Herstellung von Hartkerngerüsten vollkeramischer Restaurationen dar.

Bisher werden von aktuellen Systemen Zirkonoxidkeramiken nur im gesinterten (Hartbearbeitung), bzw. im vorgesinterten Zustand (Weißbearbeitung) verarbeitet. Die Grünbearbeitung von Zirkonoxidkeramik stellt damit einen neuen inte-

ressanten Ansatz dar. Durch die sie ergeben sich verschiedene Vorteile, von denen auch CAD/CAM-Anwendungen in der Zahnmedizin profitieren könnten. Bei der hier untersuchten Zirkonoxidkeramik handelt es sich um eine neuartigen, vom Institut für Materialforschung III des Forschungszentrums Karlsruhe entwickelten Keramik im „Grünzustand“. Als Grünkörper bezeichnet man kreideähnliche Formkörper aus hoch verdichteten sinteraktiven Pulvern, die erst in einem anschließenden speziellen Sinterverfahren zum festen Sinterkörper umgesetzt werden. Diese neuartige Zirkonoxidkeramik soll den Vorteil haben, dass sie im Gegensatz zu herkömmlichen Keramiken, die vom Grün- in den Endzustand überführt werden, durch das Reaktionssinterverfahren nicht mehr schrumpft. Dadurch ist man beispielsweise nicht, wie bei der Weißbearbeitung, auf eine manuelle Nachbearbeitung zur Korrektur von Schrumpfung Fehlern angewiesen.

Aufgrund der hohen Härte gesinterter Keramiken können bei der Hartbearbeitung nur diamantierte Schleifkörper verwendet werden. Bei der Weiß- und Grünbearbeitung wird durch die deutlich weicheren Weiß- bzw. Grünkörper auch der Einsatz von Hartmetallinstrumenten möglich. Im Gegensatz zu diamantierten Schleifkörpern haben sie den Vorteil eine definiertere Außengeometrie zu besitzen und diese bis zu ihrer Abstumpfung auch kaum zu verändern. Aus diesem Grund schien die neue Zirkonoxidkeramik geeignet für die Bearbeitung mit Hartmetallwerkzeugen.

Außerdem erhoffte man durch die Grünbearbeitung im Vergleich zur verschleißintensiveren Hart- bzw. Weißbearbeitung, durch die weichere Struktur der Rohlinge, eventuell auch die Standzeiten der Bearbeitungsinstrumente erhöhen.

Bei den untersuchten Instrumenten handelt es sich um zylindrische normalgekörrnte diamantierte Schleifkörper (100 µm) bzw. grobverzahnte Hartmetallinstrumente und die dazugehörigen Finierinstrumente (Feinstgekörrnte Diamanten (15 µm) bzw. Hartmetallfinierer).

Mittels eines Rotring-Winkelstücks (Fa. KaVo / Leutkirch), welches in einer zweiachsigen computergesteuerten Schleifeinheit nach Becker [12] eingespannt ist, wurden mit jedem Instrumentenpaar kreisförmige Präparationen mit einer gleichbleibenden Arbeitstiefe von 4 mm an Keramik-Rohlingen (Zirkonoxid- bzw. In-Ceram-Alumina[®]-Rohlinge) durchgeführt. Durch die Messungen

der Durchmesser der daraus resultierenden zylindrischen Keramikproben, jeweils nach der Grob- und Feinbearbeitung, sollten Rückschlüsse auf Veränderungen der Bearbeitungsinstrumente getroffen werden. Ferner erfolgte die Vermessung der Instrumente vor und nach ihrem Einsatz um zusätzliche Informationen über den Verschleiß zu erhalten.

Die Untersuchung zeigte anders als erwartet, dass die Bearbeitung der Grünkörper mit den Hartmetallinstrumenten gar nicht, mit den diamantierten Instrumenten zwar besser, aber auch nicht befriedigend möglich war. Bei den Hartmetallinstrumenten kam es durch den Schleifstaub zum sofortigen Zusetzen der Spanräume, was sich auch durch Zuschaltung der Spraykühlung und maximaler Reduzierung des Vortriebs nicht vermeiden ließ. Das Zusetzen führte zur Beschädigung der Probe oder des Instrumentes. Bei den diamantierten Schleifkörpern kam es zwar auch zum Zusetzen der Instrumente, jedoch war trotzdem eine Bearbeitung möglich. Es traten aber hier durch den mangelhaften Abtransport der Schleifspäne Probleme auf. Allein anhand der Probendurchmesser konnten keine Rückschlüsse auf die Veränderung der Schleifkörpergeometrie getroffen werden, da die Proben eine zu starke Welligkeit an der Oberfläche und Formabweichungen in ihrer Außengeometrie aufwiesen. Dadurch kam es zu so großen Messwertschwankungen, dass Aussagen über den Instrumentenverschleiß, der sich in einer Vergrößerung der Probendurchmesser zeigen sollte, nicht zu machen waren.

Die in einem Zusatzexperiment mit nur einem Schleifkörperpaar hergestellten In-Ceram[®]-Proben wiesen ebenso wie die Zirkonoxidproben eine wellige Oberfläche auf. Die Amplituden dieser Wellen fielen insgesamt sogar noch stärker aus als bei der Zirkonoxid-Keramik.

Die Hauptursachen für die welligen Probenoberflächen und die entstandenen Formabweichungen sind zum einen v.a. in der sehr weichen, kreideartigen Struktur der Grünkörper zu sehen, die zum Verschmieren der Instrumente führte. Zum anderen ist auch die verwendete Schleifeinheit durch ihre geringe mechanische Steifigkeit (Lagerspiele der Schrittmotoren, des Winkelstücks usw.), der mangelhafte Abtransport der Schleifspäne aus dem Kontaktbereich Instrument-Keramik und das Instrumentendesign verantwortlich.

Aus den in dieser Untersuchung gesammelten Erfahrungen mit der Grünbearbeitung zeigt sich, dass das Bearbeiten der sehr weichen Rohlinge äußerst schwierig ist. Um Beschädigungen, vor allem dünn auslaufender Strukturen, zu vermeiden, werden hohe Anforderungen v.a. in Bezug auf die Steifigkeit der eingesetzten Schleifeinheit und dem gezielten Abtransport der Schleifspäne, sowie dem generellen Handling gestellt. Gerade durch seine geringe Kantenfestigkeit ist das Material im Moment herkömmlichen, in CAD/CAM-Systemen verwendeten, Materialien noch deutlich unterlegen. Auch bleibt noch abzuwarten, ob für diese Keramik eine geeignete Verblendkeramik zu finden ist, die den heutigen ästhetischen Standards entspricht. Bei einer Weiterentwicklung des Materials vor allem im Hinblick auf die Grünkörperhärte, könnte es durch seine praktisch schrumpfungsfreie Sinterung, durchaus eine Alternative zu der momentanen Hart- und Weißbearbeitung darstellen.

6 Summary

The aim of this study was to determine the wear of cylindrical diamond and carbide burs used in processing a new type of Zirconia ceramic in a non-sintered (green) state and in addition the Vita-In-Ceram-Alumina-Keramik® (Firma Vita / Bad Säckingen). Furthermore, the machinability of the new ceramic with the milling unit was to be investigated.

The degree of wear experienced by the instruments used plays a crucial role in the production of all-ceramic restorations. In CAD/CAM-systems (**C**omputer-**A**ided-**D**esign / **C**omputer-**A**ided-**M**anufacturing), the exact shape of the burs must be known as a computer controls the movement of their rotational axis. When processing happens at a constant trajectory, resulting changes in its shape lead to changes in its preparation profile. Correction factors need to be established for computer driven units based on data describing the wear of the burs. Furthermore, it is necessary to know the lifespan of a bur, i.e. to know how long it will deliver accurate results.

CAD/CAM-Systems make the use of new kinds of materials in the manufacture of dental restorations possible. New possibilities are arising, particularly with regard to high-performance ceramics, which require the mechanical processing of standardized industrially made preforms. Zirconia Ceramics constitute, one of the most important materials in the fabrication of all-ceramic crown cores or bridge frameworks in contemporary research due to their high fracture toughness and bending strength. The use of Zirconia ceramics in a non-sintered state is a novel and interesting approach, aside from currently applied techniques. Several advantages arise from the use of ceramic blanks in a green-state, which could also be of benefit to CAD/CAM-applications.

The present study looks at the processing procedures of a new kind of Zirconia ceramics in a non-sintered (green) state developed at the Institute of Material Research at the Research Centre Karlsruhe. Non-sintered ceramics refer to chalky bodies made from highly compacted sinter active powders, which are

transformed into Sinter bodies through the subsequent process of reaction sintering. In contrast to conventionally used non-sintered ceramics, this new kind of Zirconia ceramic is said to experience no shrinkage during the sintering process. Unlike pre-sintered materials, there is no need for secondary finishing due to defects resulting from shrinkage.

As sintered ceramics have a high degree of hardness only diamond burs can be used. The use of carbide burs becomes possible in processing of non- or pre-sintered ceramics as the blanks are much softer. Unlike diamond burs, carbide burs have the advantage of possessing a clearly-defined shape which does not change substantially until worn. A softer, non-sintered material could potentially increase the lifespan of drilling devices.

This study tested medium-grit diamond and carbide burs and their matching finishing instruments. A contra-angle hand piece (1:1) (Firma KaVo / Leutkirch) was attached to a double axial, computer-driven milling machine [Becker, 1997]. Ceramics cylinders with a height of 4 mm were produced. Measuring the resulting diameters of the samples should determine the extent of the wear of the instruments. In order to obtain further information on the wear of the burs, their diameters at the start and after the completion of the investigation were calculated.

The results of this study did not support the initial assumption. Processing of non-sintered blanks with carbide burs was impossible and processing with diamond burs was partially successful, but not satisfactory. The carbide burs were immediately clogged up with ceramic dust. This could not be avoided by the additional use of an air-water spray cooling and maximal reduction of the feed rate. The diamond burs also became clogged up; however, processing was possible. Despite this, there were still problems due to inadequate clearance of ceramic dust. Conclusions about the changes in the shape of the burs could not be made on the basis of the observed diameters of the probes. The measurements of the probes varied greatly due to their uneven surfaces and, therefore, the expected results did not occur. An additional experiment on manufacturing In-Ceram samples shows an even higher degree of unevenness.

The main reasons for the unevenness of the samples were the soft structure of the non-sintered material, the rigidity of the mechanical parts (e.g. slackness of the hand piece), the clearance of ceramic dust from the instruments and the design of the burs.

The investigation showed that the processing of non-sintered material requires highly-sophisticated milling machines due to its softness. The softness of this material makes it inferior to other materials used by CAD / CAM- systems on the market at present. Several characteristics of this non-sintered ceramic need to be improved, especially its hardness, in order to make it a viable alternative to presently used pre-sintered and sintered materials.

7 Literatur

1. Ackermann, H.: Medizinische Normbereiche. medwelt 45, 448 (1994)
2. Adler, F.: Der Einfluß der Vorschubkraft und Drehzahl (5.000 -160.000) beim Fräsen von Amalgam und Elfenbein mit Hartmetallbohrern (Fräsern). Dtsch Zahnärztl Z 15, 71 (1960).
3. Adolph, W.: Untersuchungen über die Oberflächenbeschaffenheit nieder-, hoch- und höchsttourig bearbeiteter Kavitätswände. Dtsch Zahnärztl Z 14, 949 (1959).
4. Andersson, M., Odén, A. : A new all-ceramic crown. Acta odontologica Scandinavica 1993 Bd 51
5. Becker, J., Heidemann, D.: Entwicklungsstand und Probleme des Einsatzes von CAD/CAM-Systemen. Dtsch Zahnärztl Z 48, 611 (1993).
6. Becker, J., Heidemann, D.: CAD/CAM in der Zahnmedizin - schon praxisreif? Dtsch Zahnärztl Z 49, 91 (1994).
7. Becker, J., Heidemann, D.: Eine neue Methode zur Versorgung von Zahndefekten mit computergefrästen Füllkörpern. 25. Jahrestagung der AfG, Mainz 1993.
8. Becker, J.: C.A.C – Eine Revolution zahnärztlicher Behandlung? Zahnärztl Welt 105, 236-241 (1996)
9. Becker, J.: C.A.C – Eine Weg zur computerunterstützten Herstellung keramischer Restaurationen. Dtsch Zahnärztl Z 51, 511 (1996).
10. Becker, J.: CAD/CAM in der Zahnmedizin (Teil 1). Zahnärztl Welt 105, 119-125 (1996).
11. Becker, J.: CAD/CAM in der Zahnmedizin (Teil 2). Zahnärztl Welt 105, 188-192 (1996).
12. Becker, J.: CAC - Entwicklung eines computerunterstützten Verfahrens zur Herstellung von keramischen Einlagefüllungen. Habilitationsschrift, Johann Wolfgang Goethe – Universität / Frankfurt am Main, 1997
13. Bieniek, K.W., Marx, R.: Die mechanische Belastbarkeit neuer vollkeramischer Kronen- und Brückenmaterialien. Schweiz Mschr Zahnheilk 104, 284 (1994).
14. Bindl, A., Mörmann, W.: Klinische und technische Aspekte der Cerec-In-Ceram-Krone. Quintessenz 47, 775 (1996).

-
- | | | |
|---|---|---|
| 15. Bohlmann, A.: | Untersuchungen zur Spannung der Zahnhartsubstanzen mit umlaufenden Werkzeugen in verschiedenen Drehzahlbereichen und bei unterschiedlichen Vorschubkräften. | Dtsch Zahnärztl Z 15, 87 (1960). |
| 16. Böning, K., Wolf, B., Schmidt, A., Kästner, K., Walter, M.: | Klinische Randspaltmessungen an Procera AllCeram-Kronen. | Dtsch Zahnärztl Z 55, 97 (2000). |
| 17. Caesar, H., Ernst, S.: | Die Nichtmetalle in der Zahntechnik. | Verlag Neuer Merkur, München 1993 |
| 18. Cales, B., Stefani, Y.: | Yttria-Stabilized Zirconia for Improved Orthopedic Protheses. | J Biomed Mater Res. 1998, 43 (1) |
| 19. Claus, H.: | Vita In-Ceram, ein neues Verfahren zur Herstellung oxidkeramischer Gerüste für Kronen und Brücken. | Quint Zahntech 16, 35-46 (1990) |
| 20. Claussen, N.: | Umwandlungsverstärkte keramische Werkstoffe. | Z. Werkstofftech. 13 138-147 (1982) |
| 21. Doddoli, R.: | Biomaterial- und Werkstoffwesen prägen die neue Ära des Zahnersatzes. | Quintessenz Zahntech 22, 5 (1996) |
| 22. Eibenbenz, S., Schärer, P.: | Das Kopierschleifen keramischer Formkörper. | Phillip J 3, 91 (1994) |
| 23. Eibofner, E., Kimmel, K.: | Leistungen von Antrieben, Übertragungs- und rotierenden Schleifinstrumenten für die zahnärztliche Präparationstechnik. | Zahnärztl Welt 92, 18/11 (1983). |
| 24. Eichner, K.: | Zahnärztlich Werkstoffe und ihre Verarbeitung. | Hüthig-Verlag, Heidelberg 4. Aufl. (1981) |
| 25. Eichner, K.: | Normal-, hoch- und höchsttouriges Bohren und Schleifen – eine Übersicht über Instrumente, Untersuchungen und klinische Folgerungen. | Dtsch Zahnärztl Z 15, 65 (1960). |
| 26. Fan, P.L., Standford, J.W.: | Ceramics: Their place in dentistry. | Int Dent J 37, 197 (1987). |
| 27. Fehér, A., Mörmann, H.: | Die Ausarbeitung von Keramikrestorationen mit superfeinen Diamantinstrumenten. | Schweiz Mschr Zahnheilk 105, 474 (1995). |
| 28. Fehér, A., Mörmann, W.H., Lutz, F.: | Die Standzeit von Cerec-Schleifscheiben. | Schweiz Mschr Zahnheilk 101, 857 (1991). |
| 29. Felber, L., Leemann, T., | Computergestützte vollautomati- | Acta Med Dent Helv, |

	Mörmann, W.H.:	sche Konstruktion von Inlays.	Vol 2: 9/1997
30.	Firma Degussa Dental	Cercon smart ceramics.	Firma Degussa Dental
31.	Firma Komet (Lemgo)	Technische Informationen: Diamant- Schleifinstrumente	Firma Komet (Lemgo)
32.	Firma Komet (Lemgo)	Technische Informationen: Hartmetall-Bohrer und –Finierer	Firma Komet (Lemgo)
33.	Firma Komet (Lemgo)	Instrumentenkunde Rotierende Instrumente für die zahnärztliche Präparationstechnik	Firma Komet (Lemgo) 1. Auflage, April 1985
34.	Firma Vita	Produktbeschreibungen Vita Celay Alumina / Spinell Blanks	Firma Vita
35.	Firma Vita	Produktbeschreibungen Vita Celay Zirkonia Blanks	Firma Vita
36.	Firma Zeiss	Messanleitung	Firma Zeiss
37.	Fischer, H., Edelhoff, D., Marx, R.:	Mechanische Beanspruchbarkeit von Zirkonoxid-Wurzelstiften.	Dtsch Zahnärztl Z 53, 12 (1998).
38.	Fischer, H., Weinzierl, P., Weber, M., Marx, R.:	Bearbeitungsinduzierte Schädigung von Dentalkeramik.	Dtsch Zahnärztl Z 54, 484 (1999).
39.	Fischer, H., Yildirim, M., Schmitz, F., Marx, R.:	Festigkeitsminderung von Zirkonoxid-Abutments infolge der Bearbeitung.	Dtsch Zahnärztl Z 54, 443 (1999).
40.	Forschungszentrums Karlsruhe :	Keramik die beim Sintern nicht mehr schrumpft.	Presseinformation des Forschungszentrums Karlsruhe 28/97
41.	Furrer, O., Mörmann, W.:	Effizienz und Kantenqualität beim computertechnischen Formschleifen von Keramikinlays.	Schweiz Mschr Zahnheilk 103, 851 (1993).
42.	Gärtner, D.:	Vergleichende Untersuchung zum Bohren und Schleifen mit höchsten Drehzahlen (Borden-Airotor).	Dtsch Zahnärztl Z 15, 80 (1960).
43.	Geis-Gerstorfer, J., Fäßler, P.:	Untersuchungen zum Ermüdungsverhalten der Dentalkeramiken Zirkondioxid-TZP und In-Ceram.	Dtsch Zahnärztl Z 54, 692 (1999).
44.	Gründler, H.:	Der Einsatz CNC-gesteuerter Maschinen aus der Sicht des Zahn-technikers.	Dent Labor 36, 1259 (1988)
45.	Grüninger, A., Hugo, B., Stassinakis, A., Hotz, P.:	Das Celay-System.	Schweiz Mschr Zahnheilk 106, 127 (1996).

- | | | | |
|-----|---|---|--|
| 46. | Haessler, D.,
Foitzik, Ch.,
von Mallinckrodt, D.: | Orthograde Wurzelkanalverschluß
mit Keramikstiften aus Zirkonoxid. | Dtsch Zahnärztl Z 42,
1035 (1987). |
| 47. | Haessler, D.,
Goldbach, G.,
Kornmann, F.: | Ergebnisse von Wurzelspitzenre-
sektionen mit transapikalen Wur-
zelstiftimplantaten aus Zirkonoxid. | Quintessenz 48, 10
(1997) |
| 48. | Hahn, R., Löst, C.: | Konventionelle Dentalporzellane
versus bruchzähe Hochleistungske-
ramiken. | Dtsch Zahnärztl Z 47,
659 (1992). |
| 49. | Hahn, R., Löst, C.: | Sonoerosive Fertigung keramischer
Zahnrestorationen. | Dtsch Zahnärztl Z 47,
734 (1992). |
| 50. | Hahn, R., Wolf, M.,
Breunig, A.: | Hochleistungskeramik – eine aktu-
elle Standortbestimmung. | Phillip J 9-10/96 |
| 51. | Hahn, R.: | Experimentelle Untersuchungen zur
reproduzierbaren Passgenauigkeit
keramischer Einlagefüllungen. | Dtsch Zahnärztl Z 45,
653 (1990). |
| 52. | Hahn, R.: | Entwicklung und experimentelle
Anwendungsprüfung keramischer
und polymer-keramischer Zahner-
satzstoffe aus polymeren Werk-
stoffvorstufen. | Dtsch Zahnärztl Z 52,
168 (1997). |
| 53. | Hennige, V.D.,
Ritzaupt-Kleissl, H.J.,
Haußelt, J.H.: | Herstellung von ZrSiO ₄ -Keramiken
mit minimierter Sinterschrumpfung. | (Vorabdruck) For-
schungszentrum Karls-
ruhe Institut für Materi-
alforschung Aug. 1997 |
| 54. | Herrmann, R.: | Der Computer wird unsere Arbeits-
plätze in den Labors nur verändern
und nicht wegrationalisieren. | Dent Labor 36, 1126
(1988). |
| 55. | Hofmann, N.: | Die Herstellung und Eingliederung
von computergefrästen Keramik-
Inlays. | Zahnärztl Welt 99,
530-537 (1990). |
| 56. | Hohmann, W.: | Achsen und Freiheitsgrade-Die
Probleme des Monsieur Duret. | Dent Labor 35, 761
(1987) |
| 57. | Hösch, W.,
Kappert, H.F.: | Festigkeitsprüfung von vollkerami-
schen Einzelzahnersatz für den
Front- und Seitenzahnbereich. | Dtsch Zahnärztl Z 47,
621 (1992). |
| 58. | Hüls, A. : | Zum Stand der klinischen Bewäh-
rung infiltrationskeramischer Ver-
blendkronen. | Dtsch Zahnärztl Z 50,
674 (1995). |
| 59. | Kappert, H.F.,
Gläser, R.: | Zeta DC-Tell. | Quintessenz Zahntech
24, 6, (1998) |
| 60. | Kappert, H.F., Knipp, U.,
Wehrstein, A., Kmita, M., | Festigkeit von Zirkonoxid-
verstärkten Vollkeramikbrücken aus | Dtsch Zahnärztl Z 50,
683 (1995). |

	Knipp, J.:	In-Ceram.	
61.	Kappert, H.F.:	Bruchfestigkeit und Frakturverhalten von DCS-gefrästen Frontzahnkronen nach Verblendung mit Vitadur D und Trizeram.	Zahnärztl Welt 110, 134-139 (2001).
62.	Karapetian, V. :	Die Seitenzahnversorgung mit dem Cerec-II-System.	Quintessenz 47, 11 (1996)
63.	Kern, M., Simon, M.H.P., Strub, J.R.:	Erste klinische Erfahrungen mit Wurzelstiften aus Zirkonoxidkeramik.	Dtsch Zahnärztl Z 53, 266 (1998).
64.	Kern, M., Strub, J.R.:	Klinische Anwendung und Bewährung von Adhäsivbrücken aus der Aluminiumoxidkeramik In-Ceram.	Dtsch Zahnärztl Z 47, 532 (1992).
65.	Kimmel, K.:	Rauhtiefen- ein unterschätztes Qualitätskriterium.	Zahnärztl Mittl 88, 1796 (1998)
66.	König, W., Verlemann, E., Wagemann, A.:	Zeitgemäße Konzepte für die Keramikfertigung.	In: Fortschrittsberichte der Deutschen Keramischen Gesellschaft, Bd 7 (1992) Heft 4
67.	Körper, S., Körper, K.H.:	Glasfaser-Brücken-Zahnersatz.	Zahnarzt Magazin 3/96
68.	Krüger, M.:	Passgenauigkeiten von CAC – Keramikinlays (konische Präparation).	Med. Dissertation Frankfurt a. M., 1999
69.	Kunzelmann, K.-H., Hickel, R.:	Zur Präzision des Cerec®- Systems: Die Schleifeinheit.	Dtsch Zahnärztl Z 45, 277 (1990).
70.	Kunzelmann, K.-H., Hickel, R.:	Feinpolitur von Cerec-Inlays mit Diamantpoliersystemen.	Dtsch Zahnärztl Z 45, 680 (1990).
71.	Lampe, K., Luthy, H., Mörmann, W.H., Lutz, F.:	Bruchlast vollkeramischer Computerkronen.	Acta Med Dent Helv, Vol 2: 4/1997
72.	Lang, G.J.:	Abnutzungs- und Dimensionsverhalten von diamantierten Schleifkörpern.	Med. Dissertation, Frankfurt a. M., in Vorbereitung
73.	Lauer, H.-Ch., Ottl, P., Weigl, P.:	Kronen und Brücken aus Vollkeramik.	Deutscher Zahnärztekalendar 1996
74.	Linke, S.:	Untersuchungen von Kavitätenrändern, die mit Schleifkörpern in verschiedenen Drehzahlbereichen bearbeitet wurden.	Dtsch Zahnärztl Z 15, 93 (1960).
75.	Luthardt, R., Herold, V., Sandkuhl, O., Reitz, B., Knaak, J.P., Lenz, E.:	Kronen aus Hochleistungskeramik.	Dtsch Zahnärztl Z 53, 280 (1998).

- | | | | |
|-----|--|---|--|
| 76. | Luthardt, R., Musil, R.: | CAD/CAM-gefertigte Kronengerüste aus Zirkondioxid-Keramik. | Dtsch Zahnärztl Z 52, 380 (1997). |
| 77. | Luthardt, R., Musil, R.: | Das Precident-DCS-System für Kronen und Brücken. | Phillip J 7-8, 217 (1996) |
| 78. | Lutterberg, B., Stiefel, A.: | Rauhtiefenmessung und Raster-elektronenmikroskopie an Kavität-wänden. | Zahn-, Mund- und Kie-ferheilkunde Bd. 67 (1979) H. 2 |
| 79. | Maier, H.R.: | Leitfaden technische Keramik / Werkstoffkunde II Keramik. | 3. Aufl. Mainz-Druck, Aachen 1993 |
| 80. | Marx, R., Fischer, H., Weber, M., Jungwirth, F.: | Rissparameter und Weibullmodule: unterkritisches Rißwachstum und Langzeitfestigkeit vollkeramischer Materialien | Dtsch Zahnärztl Z 56, 90 (2001). |
| 81. | Marx, R.: | Moderne keramische Werkstoffe für ästhetische Restaurationen – Ver-stärkung und Bruchzähigkeit. | Dtsch Zahnärztl Z 48, 229 (1993). |
| 82. | Marxkors, R.: | Rauhtiefe. | Zahnärztl Welt 82, 498 (1973). |
| 83. | Mayer, R.: | Cool-Diamantschleifer auf dem Prüfstand. | Zahnärztl Welt 98, 314-327 (1989). |
| 84. | Mehl, A., Gloger, W., Hickel, R.: | Erzeugung von CAD-Datensätzen für Inlays. | Dtsch Zahnärztl Z 52, 520 (1997). |
| 85. | Mehl, A., Pfeiffer, L., Hickel, R.: | Randständigkeit von Cerec-II-Inlays. | Dtsch Zahnärztl Z 53, 56 (1998). |
| 86. | Mehlhose, J., Schneeweiß, M., Hertel, D.: | Grün- und Weißbearbeitung techni-scher Keramik. | Engineering Research Bd. 59 (1993) Nr.6 |
| 87. | Mörmann, W., Furrer, O.: | Efficiency of an electric drive in the Cerec® CAD-CAM unit. | J Dent Res 71, 516 IADR Abstr. 3 (1992). |
| 88. | Ontrup, D.: | Übersicht über Schleifkörper, Boh-erer und Geräte zum hoch- und höchsttourigen Bohren und Schlei-fen. | Dtsch Zahnärztl Z 15, 58 (1960). |
| 89. | Ontrup, D.: | Die Oberflächengestalt der Zahn-harts-substanzen nach Bearbeitung mit umlaufenden Instrumenten. | Dtsch Zahnärztl Z 15, 99 (1960). |
| 90. | Pantke, H.: | Vergleichende Untersuchung der Oberflächenstruktur von mit Dia-mantschleifkörpern bearbeiteten Kavitätenwänden. | Zahnärztl Welt 64, 526 (1963). |
| 91. | Paucksch, E., Preger, K.T.: | Zerspantechnik. | Vieweg-Verlag Braun-schweig 6. Aufl. 1985 |

-
92. Peters, R., Rinke, S., Schäfers, F.: Passungsqualität CAD/CAM-gefertigter Inlays in Abhängigkeit von der Kavitätenpräparation. 10. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Zahnerhaltung e.V., Münster 1996.
93. Peters, R., Rinke, S., Schäfers, S.: Passungsqualität CAD/CAM-gefertigter Inlays in Abhängigkeit von der Kavitätenpräparation. Dtsch Zahnärztl Z 51, 587 (1996).
94. Pfeiffer, P., Sommer, M.Ch., Knof, R.: Zur Eignung des In-Ceram-Systems für Inlays. Dtsch Zahnärztl Z 48, 419 (1993).
95. Plischka, G., Dimeg, K.: Untersuchung über die optimale Korngröße bei Diamantschleifkörpern in der Zahnheilkunde. Zahnärztl Rdsch 77, 9 (1968).
96. Pröbster, L., Diehl, J.: Klinik und Technik des keramischen Kronen- und Brückensystems In-Ceram. Quintessenz 4, 613 (1990).
97. Pröbster, L., Groten, M., Girthofer, S.: Kopiergefräste, glasinfiltrierte Aluminiumoxid-Keramikkronen. Phillip J 11, 577 (1994).
98. Pröbster, L., Weber, H., Diehl, J., Weigel, E.: Erste klinische und Werkstoffkundliche Erfahrungen mit dem vollkeramischen Kronen- und Brückensystem In-Ceram. Zahnärztl Welt 99, 816 (1990).
99. Reiss, B., Walther, W.: Ereignisanalyse und klinische Langzeitergebnisse mit Cerec-II-Inlays. Dtsch Zahnärztl Z 53, 65 (1998).
100. Rekow, D.: Dental CAD/CAM systems - what is the state of the art? J Am Dent Assoc 122, 43 (1991).
101. Reppel, P.D., Böning, K., Walter, M.: Festsitzender Zahnersatz aus gefrästem/funkenerodiertem Titan. Dtsch Zahnärztl Z 46, 756 (1991).
102. Rieger, W.: Aluminium- und Zirkonoxidkeramik in der Medizin. Industrie-Diamanten-Rundschau 2/93, 116 (1993).
103. Rinke, S., Hüls, A., Chafizadeh, A.: Vergleichende Qualitätsbeurteilung kopiergefräster vollkeramischer Kronen und Brücken (Celay®/ In-Ceram®). Dtsch Zahnärztl Z 50, 671 (1995).
104. Rinke, S., Hüls, A., Jahn, L.: Marginal accuracy and fracture strength of conventional and copymilled all-ceramic crowns. Int J Prosthodont 8, 303-310 (1995).
105. Rose, D., Platzer, U., Roth, K.-F.: Untersuchungen zur Kompositfuge bei computererstellten Keramikinlays. Dtsch Zahnärztl Z 45, 677 (1990).

- | | | |
|---|---|---|
| 106. Sachs, L.: | Angewandte Statistik. | Springer 1997
8. Auflage |
| 107. Sadoun, M.: | Zukünftige Entwicklungen. | Vortrag auf dem 1.
Vollkeramik-
Symposium in Düssel-
dorf 1992 |
| 108. Schaller, H.G., Hahn, P.,
Götze, W., Herzog, E.: | Der Einfluß der Randbearbeitung
auf die Rauhtiefe approximaler
Schmelzränder. | Dtsch Zahnärztl Z 47,
436 (1992). |
| 109. Schirra, C.,
Hegenbarth, E.A.: | Individuell CAD/CAM-hergestellte
Aluminiumoxidkeramikappen für
vollkeramische Restaurationen auf
Zähnen und Implantaten. | Quintessenz 1, 33-42
(1998) |
| 110. Schlegel, A., Besimo,
Ch., Guggenheim, R.,
Düggelin, M.: | In vitro-Untersuchung zur margina-
len Paßgenauigkeit von computer-
gefrästen Titankronen (I): Raster-
elektronenmikroskopische Rand-
spaltenanalyse. | Schweiz Mschr
Zahnheilk 101, 1273
(1991). |
| 111. Schlegel, K.A.,
Tavor, A., Zaborsky, J.: | Das DCS-Titansystem – Ein neuer
Weg in der Kronentechnik. | Quintessenz 3, 461
(1991) |
| 112. Scholze, Salmang: | Keramik ,Teil 1. Allgemeine Grund-
lagen und wichtige Eigenschaften,
Teil 2 Keramische Werkstoffe. | Berlin: Springer Verlag,
1982 |
| 113. Schroeder, A., Opitz, S.: | Verschleiß von Diamantschleifern
und Hartmetallfinierern. | Dtsch Zahnärztl Z 42,
557 (1987). |
| 114. Schug, J., Pfeiffer, J.,
Sener, B., Mörmann, W.: | Schleifpräzision und Paßgenauig-
keit von Cerec-2-CAD/CIM-Inlays. | Schweiz Mschr
Zahnheilk 105, 913
(1995). |
| 115. Schulle, W.: | Probleme und Entwicklungstenden-
zen der Formgebung in der klassi-
schen Keramik. | Ceramic forum internti-
onal Bd. 71 1994 S.
221-230 |
| 116. Schwickerath, H.: | Die In-Ceram Aluminiumoxid-
Keramik ein innovativer dentalkera-
mischer Werkstoff. | dental-labor, XXXVII,
Heft 11/89 |
| 117. Sieber, C., Thiel, N.: | Eine lichtoptische Möglichkeit –
Spinell/Luminaries. | Quintessenz Zahntech
20, 1041 (1994) |
| 118. Siervo, S.,
Pampalone, A.,
Siervo, P., Siervo, R.: | Präzision und Vielseitigkeit des
Celay®-Systems. | Quintessenz 45,
379-396 (1994) |
| 119. Spiekermann, H.,
Rübber, A. : | Kronen und Brückengerüste aus
hochfester Preßkeramik. | Quintessenz 50, 2,
177-189 (1999) |
| 120. Spur, G. : | Keramikbearbeitung . | Carl Hanser Verlag,
München 1989 |

-
- | | | |
|--|---|---|
| 121. Spur, G., Stöferle, T.: | Handbuch der Fertigungstechnik. | Hanser-Verlag München 1980 Bd 3/1 |
| 122. Spur, G., Stöferle, T.: | Handbuch der Fertigungstechnik. | Hanser-Verlag München 1980 Bd 3/2 |
| 123. Spur, G., Uhlmann, E.,
Brücher, Th.: | Bearbeitung keramischer Bauteile
– Möglichkeiten und Grenzen. | In: Fortschrittsberichte
der Deutschen Keramischen
Gesellschaft, Bd 7 (1992) Heft 4 |
| 124. Steegmayer, G.,
Lenz, P., Gilde, H.,
Eibofner, E.: | Experimentelle Untersuchungen zur
Abriebleistung und Abnutzung
zahnärztlicher Diamantschleifkörper. | Dtsch Zahnärztl Z 44,
583 (1989). |
| 125. Steegmayer, G.: | Schleifleistung und Abnutzung
zahnärztlicher Diamantschleifkörper. | Phillip J 8, 34 (1991). |
| 126. Stoll, R., Stachniss, V.: | Computerunterstützte Technologien
in der Zahnheilkunde. | Dtsch Zahnärztl Z 45,
314 (1990). |
| 127. Stroh, W.: | Schleifleistung zahnärztlicher
Diamanten bei hohen und höchsten
Umdrehungen. | Dtsch Zahnärztl Z 15,
77 (1960). |
| 128. Sturzenegger, B.,
Fehér, A. et al : | Klinische Studie von Zirkonoxidbrücken
im Seitenzahngebiet hergestellt
mit dem DCM-System. | Acta Med Dent Helv.
Vol 5: 12/2000 |
| 129. Südfels, H.: | Kavitätenrand und Schmelzoberfläche
nach der Präparation okklusaler
Kavitäten mit Schleifern und
Finieren. | Dtsch Zahnärztl Z 42,
552 (1987). |
| 130. Tinschert, J.,
Schimmang, A.,
Fischer, H., Marx, R.: | Belastbarkeit von zirkonoxidverstärkter
In-Ceram Alumina-Keramik. | Dtsch Zahnärztl Z 54,
695 (1999). |
| 131. Trinschert, J., Natt, G.,
Doose, B., Fischer, H.,
Marx, R.: | Seitenzahnbrücken aus hochfester
Strukturkeramik. | Dtsch Zahnärztl Z 54,
545 (1999). |
| 132. Türp, J.C.: | Vollkeramikbrücken. | Dtsch Zahnärztl Z 56,
136 (2001). |
| 133. Wagemann, A.: | Grünbearbeitung – wirtschaftliche
und technologische Potentiale. | In: Kriegesmann, J.:
Technische keramische
Werkstoffe 1. Aufl.
1993 |
| 134. Walther, W., Reiß, B.,
Toutenburg, H.: | Longitudinale Ereignisanalyse von
Cerec®-Einlagefüllungen. | Dtsch Zahnärztl Z 49,
914 (1994). |

-
- | | | |
|---|--|---|
| 135. Wegmann, U.: | Zur Qualität beschliffener Schmelzflächen und der Präparationsgrenze. | Dtsch Zahnärztl Z 40, 472 (1985). |
| 136. Weiland, W.: | Einsatzbedingungen für Diamantwerkzeuge in der Bearbeitung keramischer Werkstoffe. | Keramische Zeitschrift, 28. Jahrg. Nr. 12, 1976 |
| 137. Werner, J.: | Biomathematik und Medizinische Statistik. | Urban & Schwarzenberg 1992, 2. Aufl. |
| 138. Wetzler, M.: | Erste praktische Erfahrungen mit der Vita In-Ceram Zirconia Vollkeramik – ein Patientenfall, klinisch und technisch dargestellt. | Quint Zahntech 25, 4 398-408 (1999) |
| 139. Willer, J.: | Neues CAD/CAM-System zur Herstellung von festsitzendem Zahnersatz. | Zahnärztl Welt 107, 180 (1998). |
| 140. Windisch, S., Bintl, A., Mörmann W.H.: | Passgenauigkeit von vollkeramischen Cerec-CAD/CIM-Frontzahnkronenkappen. | Acta Med Dent Helv, Vol 4: 2/1999 |
| 141. Wirz, J., Jäger, K., Schmidli, F.: | Politur von Keramikoberflächen. | Schweiz Mschr Zahnheilk 97, 906 (1987). |
| 142. Wohlwend, A., Studer, S.: | Das Zirkonoxidabutment – ein neues vollkeramisches Konzept zur ästhetischen Verbesserung der Suprastruktur in der Implantologie. | Quintessenz Zahntech 22, 4, 364 (1996) |

Danksagung

Herrn Priv.-Doz. Dr. J. Becker danke ich für die Überlassung des Themas, sowie die stets freundliche und fachliche Unterstützung bei der Durchführung und Durchsicht der Arbeit und dafür, dass er immer Zeit gefunden hat, mich bei aufgetretenen Problemen zu beraten.

Herrn N. Troltenier danke ich für die Hilfe bei der Auswahl der statistischen Testverfahren, sowie Frau K. Ronge für die Unterstützung bei der Anfertigung der mikroskopischen Aufnahmen.

Mein Dank gilt ebenso Herrn Univ.-Prof. Lauer (Leiter der Abteilung Prothetik) für die Übernahme des Korreferats.

Wesentlicher Dank gebührt meinen Eltern, die meinen akademischen Werdegang ermöglicht und mich zu jeder Zeit bestmöglich unterstützt haben.

Besonders danke ich auch Beatrix Freudenberger. Ihre liebevolle Unterstützung und vor allem Geduld gaben mir den notwendigen Freiraum und die immer wieder erforderliche Motivation, diese Arbeit fertig zu stellen.

Schließlich danke ich noch Claire Ryan für ihre Hilfe bei der Erstellung der englischen Zusammenfassung.

Roßdorf, im Dezember 2002

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'Kint', written in a cursive style.

Schriftliche Erklärung

Ich erkläre, dass ich die dem Fachbereich Humanmedizin der Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main zur Promotionsprüfung eingereichte Dissertation mit dem Titel:

„Verschleiß- und Dimensionsverhalten von
diamantierten Schleifkörpern und Hartmetallinstrumenten
bei der Bearbeitung einer neuartigen
ZrSiO₄-Keramik im Grünzustand“

im Zentrum der Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde (Carolinum) / Poliklinik für Zahnerhaltungskunde unter Betreuung und Anleitung von Priv.-Doz. Dr. Joachim Becker ohne sonstige Hilfe selbst durchgeführt und bei der Abfassung der Arbeit keine anderen als die in der Dissertation angeführten Hilfsmittel benutzt habe.

Ich habe bisher an keiner in- oder ausländischen Universität ein Gesuch um Zulassung zur Promotion eingereicht.

Die vorliegende Arbeit wurde bisher nicht als Dissertation eingereicht.

Roßdorf, den 15.02.2002



(Frank Hintz)

Lebenslauf

Holzgasse 44
64380 Roßdorf

Telefon 06154-81907
E-Mail: frank.hintz@web.de

Frank Hintz

Persönliche Information

- Familienstand: ledig
- Staatsangehörigkeit: deutsch
- Geburtsdatum: 26.09.1973
- Geburtsort: Darmstadt
- Eltern: Gerhard Hintz (Maschinenbauingenieur)

Elisabeth Hintz, geb Hotz (Hausfrau)

Schulbildung

- | | |
|--------------|--|
| 1980 - 1984 | Rehbergschule (Grundschule) / Roßdorf |
| 1984 - 1986 | Justin-Wagner-Schule (Förderstufe) / Roßdorf |
| 1986 - 1993 | Viktoriaschule (Gymnasium) / Darmstadt |
| • 16.06.1993 | Abitur |

Ersatzdienst

1993 - 1994 Zivildienst bei der Johanniter-Unfall-Hilfe / Griesheim

Studium

- | | |
|--------------|---|
| 1994 - 2000 | Studium der Zahnmedizin an der Johann Wolfgang Goethe-Universität / Frankfurt am Main |
| • 28.09.1995 | Naturwissenschaftliche Vorprüfung |
| • 11.09.1997 | Zahnärztliche Vorprüfung |
| • 27.06.2000 | Zahnärztliche Prüfung |
| • 28.06.2000 | Approbation als Zahnarzt |

Spezielle Qualifikationen

- | | |
|--------------|--|
| 1993 - 1994 | Ausbildung zum Rettungssanitäter bei der Johanniter-Unfall-Hilfe / Griesheim |
| • 24.06.1994 | Prüfung zum Rettungssanitäter |

Assistenzzeit

Juli 2000 bis Juli 2002 Assistenzzeit in der Praxis Dr. Breitwieser in Erbach/Odw.

Praxis

seit Juli 2002 als Partner in einer Gemeinschaftspraxis in Darmstadt

Roßdorf, den 05.12.2002



(Frank Hintz)