



WHITEPAPER

Benchmark von Werkzeugen zur Zerspanung von Dentalkeramik

Ein an der Fakultät für Maschinenbau und Verfahrenstechnik der Hochschule Augsburg durchgeführter Vergleichstest zeigt, dass in der Bearbeitung von Zirkoniumdioxid in der Dentaltechnik die Auswahl der Fräswerkzeuge eine deutliche Auswirkung auf die Qualität der Ergebnisse und die Effizienz der Verfahren hat. Die Fertigung von Dummy-Kronen mit unterschiedlichen Wandstärken – auch bekannt als Merlon-Test – weist nach, dass nur wenige Werkzeuge eine gleichbleibend hohe Qualität garantieren können. Die feinsten Strukturen konnten nur mit dem Benchmark-Sieger überzeugend bearbeitet werden. Die Testreihen der Studie zeigen zudem, dass die Beschichtung des Werkzeugs entscheidend für Standzeiten und hohe Ausbeute ist.

Zusammenfassung der Erkenntnisse

Der an der Hochschule Augsburg im Zuge einer Bachelor-Thesis durchgeführte Benchmark-Test von Werkzeugen für die Zerspanung von Zirkoniumdioxid bedeutet für die dentaltechnische Praxis: Mit Standardhartmetallwerkzeugen können nur kurzfristig akzeptable Ergebnisse erreicht werden. Im Sinne einer prozesssicheren Fertigung von Prothesenkomponenten oder monolithischen Kronen und Brücken aus Zirkoniumdioxid sollte auf werkstoffspezifisch spezialisierte Werkzeuge zurückgegriffen werden. Insbesondere der Standzeittest zeigt, dass sich die gleichbleibend höchste Qualität mit dem Werkzeug HC720DT-DIP®3S von Hufschmied Zerspanungssysteme GmbH erreichen lässt, dicht gefolgt vom Werkzeug Dentsply Sirona. Insgesamt wird durch den Test deutlich, dass die Investition in hochwertige, auf die jeweilige Dentalfräsmaschine abgestimmte Werkzeuge entscheidend zur Prozesssicherheit in der Prothesenfertigung beiträgt.

Quelle

Der folgende Text basiert auf der Bachelorarbeit „Einfluss der Werkzeuggeometrie auf die Zerspanbarkeit von dentalen ZrO₂-Keramiken“ von Lena Wieland, Hochschule Augsburg, Dezember 2019, Erstprüfer Prof. Dr.-Ing. Ralf Goller (Lehrgebiet: Prozesstechnik für polymere und keramische Faserverbundstoffe). Der Text stellt eine Auswahl, Zusammenfassung und Interpretation der Erkenntnisse des in der Zulassungsarbeit dokumentierten Benchmark-Tests dar. Als Nachtrag zur Bachelorarbeit wurde der Benchmark-Test auch noch unter den gleichen Bedingungen für das vom Maschinenhersteller gelieferte Werkzeug durchgeführt. Die Ergebnisse gehen in die hier verwendete erweiterte Benchmark-Auswertung ein. Das Whitepaper verzichtet auf einen wissenschaftlichen Apparat – zum Quellenachweis sei auf die Arbeit von Frau Wieland verwiesen.

Die Fakultät für Maschinenbau und Verfahrenstechnik an der Hochschule für angewandte Wissenschaften Augsburg bietet die Bachelorstudiengänge Maschinenbau (B.Eng.), Mechatronik (B.Eng.) und Umwelt- und Verfahrenstechnik (B.Eng.) sowie die Masterstudiengänge Applied Research (M.Sc.), Leichtbau- und Faserverbundtechnologie (M.Eng.), Umwelt- und Verfahrenstechnik (M.Eng.) und berufsbegleitend Technologie-Management (M.Eng.). Die Fakultät für Maschinenbau und Verfahrenstechnik versteht Forschung als eine „anwendungsorientierte Forschung“: Mit wissenschaftlichen

Methoden soll Wissen generiert werden, um neue Produkte und Prozesse zu schaffen oder vorhandene Produkte und Prozesse weiterzuentwickeln. Dieses neue Wissen soll der Lehre zugutekommen. Forschung dient keinem Selbstzweck, sondern soll der Gesellschaft unter Berücksichtigung der Würde des Menschen sowie der Aspekte der Nachhaltigkeit (Ressourceneffizienz) nutzen. Neben zahlreichen Projekten vor allem zu Themen der Materialforschung gibt es zwei lehrstuhlübergreifende Projekte zu Simulation im Maschinenbau und zu Composites im Maschinenbau.

Bedeutung und Eigenschaften von Zirkoniumdioxid

Neben den mechanischen Eigenschaften stehen bei künstlichen Zähnen die Biokompatibilität und Ästhetik im Fokus. Die keramische Verblendung eines metallischen Unterbaus bietet gerade im sichtbaren Bereich noch Verbesserungspotenzial, da durch die totale Opazität des metallischen Werkstoffs die Optik eines natürlichen Zahns nicht erreicht werden kann. Die Alternative sind vollkeramische Lösungen. Dabei werden neben der Verblendung der Krone auch die Gerüstkonstruktionen aus einem keramischen Werkstoff hergestellt.

Durch die Entwicklung der Hochleistungskeramik Zirkoniumdioxid wurde die vollkeramische Versorgung konkurrenzfähig. Zirkoniumdioxid wird aufgrund seiner überaus guten mechanischen Eigenschaften überwiegend als Gerüstwerkstoff im Front- und Seitenzahnbereich verwendet. Neben diesem Einsatz als Gerüst für die Verblendungen, kann es auch als Vollzirkon genutzt werden. Solche monolithischen Kronen oder Brücken besitzen keine Verblendung, sondern bestehen ausschließlich aus Zirkoniumdioxid. Das ursprünglich weiße Material kann in der entsprechenden Zahnfarbe koloriert werden.

Bearbeitung

Beim Fräsen von Zirkoniumdioxid wird zwischen zwei Verarbeitungskonzepten unterschieden: der Bearbeitung bereits durchgesinterter Keramiken und der Weißkörperverarbeitung. Beim ersten Verfahren liegt der Keramikwerkstoff durch den Sinterprozess in seiner nahezu poren- und defektfreien Form vor. Das gesinterte, heiß-isostatisch gepresste Zirkoniumdioxid, auch gehiptes Zirkoniumdioxid genannt, weist bereits seine sehr hohe Endfestigkeit auf. Diesen sogenannten

dichtgesinterten, extrem harten Werkstoff zu bearbeiten, stellt sehr hohe Anforderungen an Maschine und Werkzeug, erfordert Kühlung und bedeutet lange Prozessdauer und hohen Werkzeugverschleiß. Der deshalb weitaus üblichere Prozess – und Gegenstand des Benchmarks der Hochschule Augsburg – ist die Bearbeitung der sogenannten Weißlinge. Ausgangsmaterial ist ein vorgesintertes Zirkoniumdioxid-Block, der einen Verdichtungsgrad von 55-70 % aufweist. Die im Vergleich zur durchgesinterten Variante wesentlich geringere Festigkeit ermöglicht eine schnellere, leichtere und somit kostengünstigere subtraktive Fertigung. Eine Kühlung des Bearbeitungsprozesses ist nicht erforderlich. Die Endfestigkeit erhält das ZrO₂ dann bei der nachfolgenden Sinterung. Diese führt zu einer gleichmäßigen Schrumpfung in alle Raumrichtungen von 25-30 %, welche bereits bei der Bauteilkonstruktion berücksichtigt und kompensiert werden muss.

Der Vergleichstest

Werkzeuge

Der Test verglich beschichtete Hartmetall-Vollradiusfräswerkzeuge mit 2,5 mm Schneidendurchmesser von zehn Herstellern. Zwei der Hersteller konnten nur Werkzeuge mit 2,0 mm liefern, zwei Werkzeuge waren unbeschichtet. Wichtig: Alle Werkzeuge wurden von den jeweiligen Herstellern als für die Zirkoniumdioxid-Zerspanung geeignet deklariert.

Maschine

Der Test wurde mit einem für den Dentaltechnikmarkt entwickelten 5-Achs-Fräs- und Schleifzentrum durchgeführt: Sirona inLab MC X5. Jede der Rondenbearbeitungen dauert 6 bis 8 Stunden und läuft komplett automatisiert und ohne menschlichen Eingriff ab.

Material

Als Material dienen von der Firma Sirona zur Verfügung gestellte Zirkonoxid-Ronden inCoris TZI C. Diese Discs haben einen Durchmesser von 98,5 mm und eine Höhe von 16 mm. Es handelt sich um transluzentes, voreingefärbtes, vorgesintertes Zirkoniumdioxid.

Werkstück im Merlon-Fracture-Test

Aus jeder Ronde werden 30 Vergleichskörper herausgefräst, die grob einer Krone ähneln und Zinnen von verschiedener Materialstärke aufweisen: 0,1 mm, 0,2 mm, 0,3 mm, 0,4 mm und 0,5 mm. Von Interesse ist bei diesem branchenüblichen Merlon-Test (Merlon = franz. Zinne) die Qualität der Zinnen sowie der Böden. Beim Merlon-Fracture-Test gilt eine Zinne als in Ordnung, wenn weniger als 1/3 des Materials beim Fräsvorgang ausgebrochen ist. Die Qualität des Bodens ist hingegen durch die Durchscheinbarkeit charakterisiert. Kann man durch ihn mit bloßem Auge hindurchblicken, gilt der Bereich als fehlerhaft.



Abbildung 1: STL-Datei der Merlon-Testkrone

Qualitätskontrolle

Für den Test wurde ein Verfahren entwickelt, um die Vermessungen der gefrästen Kronen mit einem Keyence-Digitalmikroskop auszuwerten. Dabei wird eine kreisförmige Messlinie gewählt, welche entlang der Zinnen verläuft. Jedem Punkt dieser Messlinie, kann nun eine Höhenkoordinate zugeordnet werden, woraus sich das Diagramm im unteren Teil der Abbildung 2 ergibt.

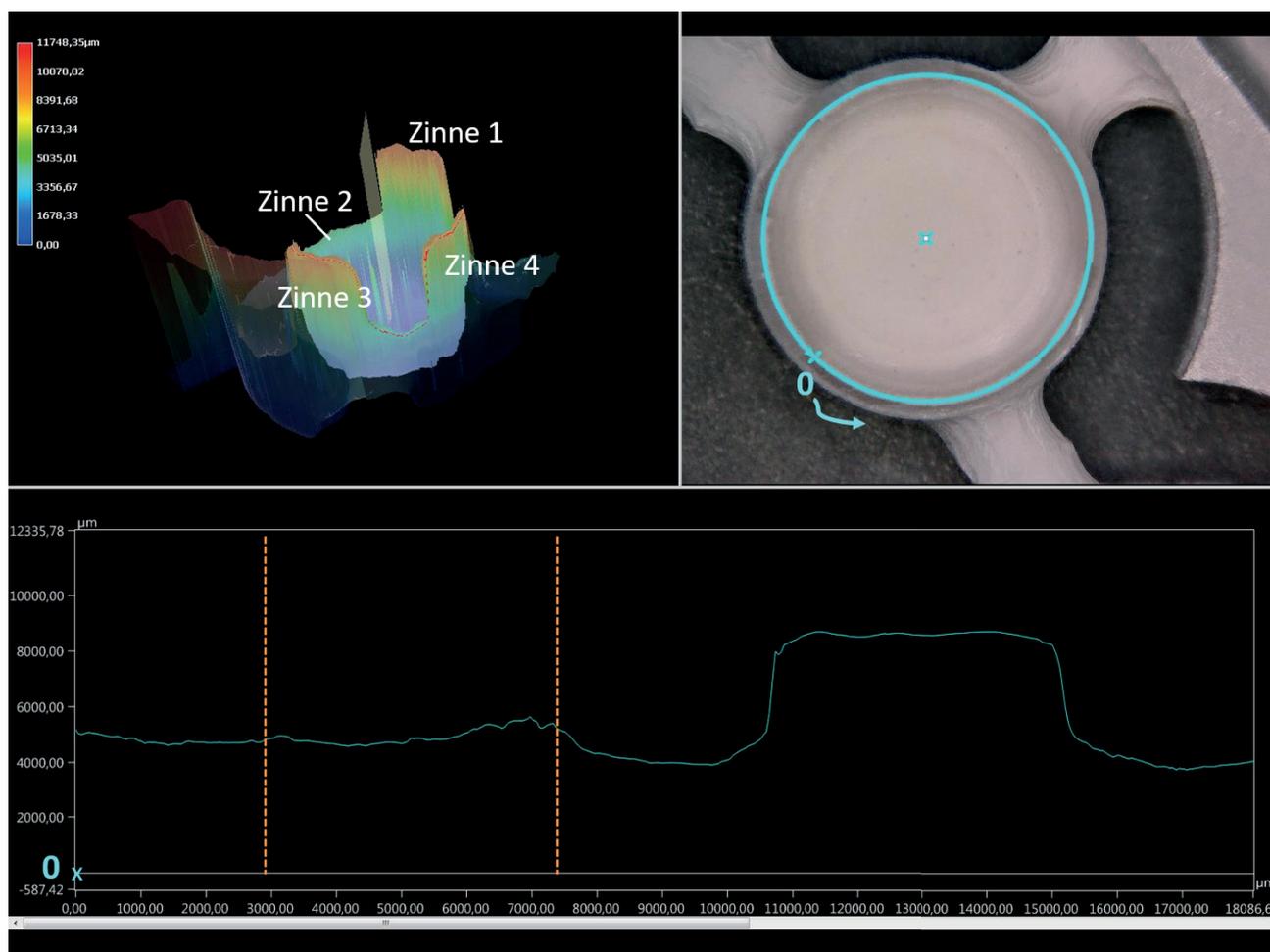


Abbildung 2: Vermessung einer Krone durch kreisförmige Messlinie

Die X-Achse entspricht dem Verlauf der Messlinie und damit dem Umfang des Messkreises. Auf der Y-Achse stehen die Höhenwerte. Es ergibt sich ein Diagramm mit mehr oder weniger vollständigen Stufen, welche die vier Zinnen der Krone wiedergeben. Mit bloßem Auge ist oft schwer zu beurteilen, ob es sich bei der ausgebrochenen Fläche um mehr als 1/3 (entspricht 33 %) der Zinne handelt. Durch die Berechnung der Fläche unterhalb des Graphen im Bereich der Zinnen, kann dieses Entscheidungsmerkmal für das Bestehen des Merlon-Tests eindeutig bestimmt werden. Diese Berechnung wurde in einem Programm umgesetzt, das die in Matlab importierten Messdaten ins Verhältnis zur „idealen Zinnenfläche“ setzt – zunächst für eine Krone und dann für die ganze Ronde. Auf diese Weise kann im automatisierten Test zuverlässig zwischen intakten oder defekten Ronden unterschieden werden.

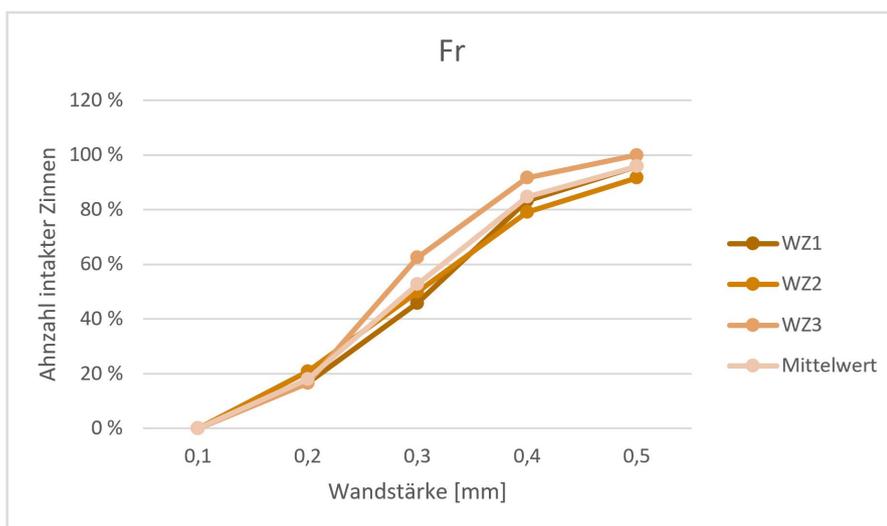
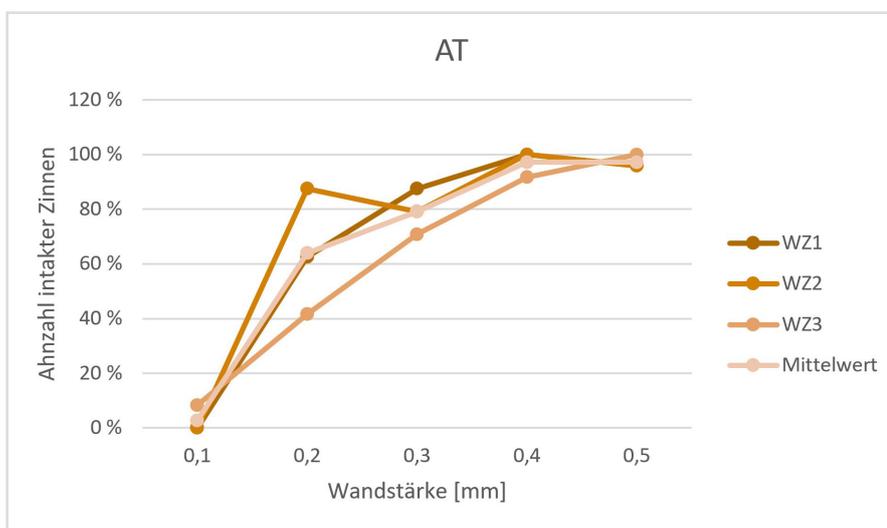
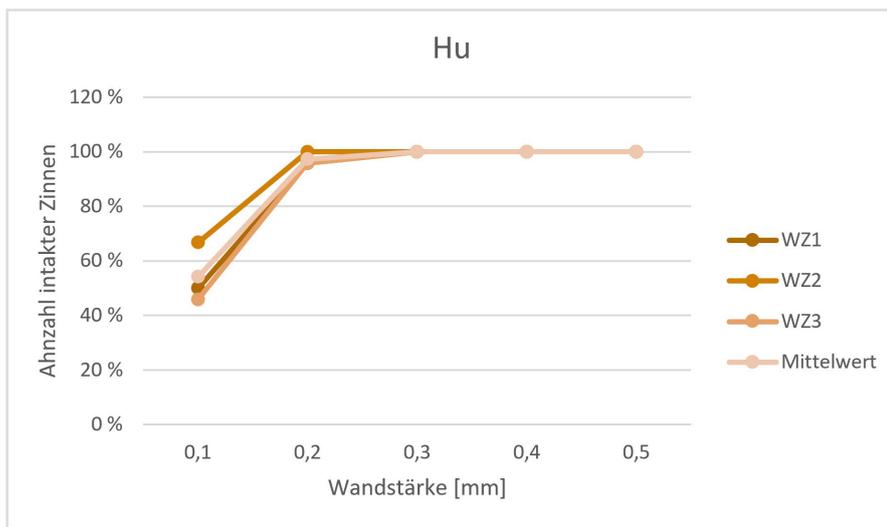
Testablauf

Das Fräsen der Ronden wird jeweils mit drei Werkzeugen jedes Herstellers wiederholt. Die sechs Werkzeuge jener Hersteller, die die besten Ergebnisse vorweisen, nehmen anschließend noch an einem Test des

Standzeitverhaltens teil. Dafür wird mit jeweils einem bereits eingesetzten Fräser der Bearbeitungsprozess zwei weitere Male durchgeführt, sodass eines der Werkzeuge insgesamt drei Ronden bearbeitet. Dies ist der Standzeittest, bei dem die Auswirkung von Verschleiß am Werkzeug auf die Qualität der Bearbeitung sichtbar wird.

Testergebnis

Die Beurteilung der Testergebnisse erfolgte sowohl mit dem bloßen Auge als auch über die Messungen und den dafür entwickelten Algorithmus – der insbesondere beim Materialausbruch im Zweifel besser über das Kriterium „maximal 33 %“ entscheiden kann. Die Beurteilungsfaktoren für Erfolg und Misserfolg sind Böden und Zinnen. Es wurde zu jedem Hersteller ein Diagramm angefertigt, welches für die jeweils fünf verschiedenen Wandstärken den prozentualen Anteil intakter Zinnen sowie Böden aufzeigt. Mit unterschiedlich gefärbten Kurven werden die Ergebnisse für die drei verschiedenen Werkzeuge der Versuchsdurchgänge pro Hersteller angezeigt.



Um die Qualität des Bearbeitungsprozesses sinnvoll beurteilen zu können, werden zwei Größen als Kennzahlen eingeführt, nach denen alle Hersteller verglichen werden: die lineare und die quadratische Performance. Erstere gibt allgemein an, wie viel Prozent aller Zinnen bzw. Böden einer Runde in Ordnung sind. Dabei wird einfach der Mittelwert der intakten Zinnen der unterschiedlichen Wandstärken gebildet. Interessanter ist nun die Berechnung der quadratischen Performance, da sie nicht nur die Anzahl defekter Böden und Zinnen, sondern auch die jeweilige Zinnenwandstärke bei der Bewertung berücksichtigt.

Mit diesem Verfahren wird die Performance eines Fräasers als deutlich schlechter bewertet, wenn Kronen größerer Wandstärken defekt sind. Sind hingegen lediglich an Zinnen und Böden der Wandstärke 0,1 mm Mängel vorzufinden, hat dies einen deutlich geringeren negativen Effekt auf die Performance.

Die Formel der quadratischen Performance P2 lautet:

$$P2 = 1 - [(1 - W_{0,1}[\%])^2 + (1 - W_{0,2}[\%])^2 + (1 - W_{0,3}[\%])^2 + (1 - W_{0,4}[\%])^2 + (1 - W_{0,5}[\%])^2] / [(0,1 \cdot 10)^2 + (0,2 \cdot 10)^2 + (0,3 \cdot 10)^2 + (0,4 \cdot 10)^2 + (0,5 \cdot 10)^2]$$

W_{0,1}[%] steht dabei für den prozentualen Anteil intakter Zinnen der Wandstärke 0,1 mm.

Abbildung 3: Drei Beispiele für die prozentuale Auswertung: Beim Benchmark-Gewinner Hufschmied liegen die Ergebnisse für alle drei Werkzeuge eng beieinander – anders als zum Beispiel bei Mitbewerber AT. Während bei Hufschmied selbst für die 0,1 mm dünnen Zinnen noch eine durchschnittliche Erfolgsquote von 54 Prozent erreicht wurde, erreichen andere eine solche erst bei dreimal so dicken Wänden (Beispiel Fr).

Je höher die Performance-Werte sind, desto besser hat das Werkzeug die ZrO₂-Ronde bearbeitet. Die folgende Tabelle fasst alle berechneten Werte der quadratischen und linearen Performance zusammen.

	Böden						Zinnen					
	Werkzeug 3		Werkzeug 2		Werkzeug 1		Werkzeug 3		Werkzeug 2		Werkzeug 1	
	P ² [%]	P [%]										
Hu	100	100	100	97	100	97	99	88	99	93	99	89
DS	100	100	100	100	100	100	99	88	99	90	97	88
Dt	99	90	100	97	100	100	96	74	97	78	97	78
Fr	100	100	100	100	100	100	84	54	74	48	77	48
AT	100	100	100	100	100	100	87	63	92	73	92	69
AG	99	90	99	90	99	90	97	79	96	79	96	81
Zr	100	97	100	100	100	100	95	75	94	70	95	73
Ac	100	100	100	100	100	100	90	65	97	83	89	63
Ka	100	100	100	100	100	100	92	66	95	72	95	73
Zz	99	90	100	97	100	100	94	72	95	73	95	73

Abbildung 4: Ergebnisse der quadratischen und linearen Performance

Die Einstufung der Fräswerkzeuge erfolgte anhand der Mittelwerte aller drei verwendeten Werkzeuge. (Abbildung 5). Um hier Rundungsfehler zu minimieren, sind die Werte in dieser Tabelle mit zwei Nachkommastellen angegeben. Das eindeutige Ergebnis: Die Werkzeuge der Firma Hufschmied Zerspanungssystem GmbH sind Sieger des Benchmark-Tests.

	Mittelwert					Mittelwert		
	Böden		Zinnen			Böden	Zinnen	
	P ² [%]	P [%]	P ² [%]	P [%]		P ² [%]	P ² [%]	
Hu	99,80	97,78	98,96	90,28	→ aufsteigend sortiert →	Fr	100,00	78,16
DS	100,00	100,00	98,36	88,61		AT	100,00	90,13
Dt	99,60	95,56	96,82	76,67		Ac	100,00	92,05
Fr	100,00	100,00	78,16	50,28		Ka	100,00	94,09
AT	100,00	100,00	90,13	68,06		Zr	99,90	94,62
AG	99,09	90,00	96,26	79,72		Zz	99,60	94,90
Zr	99,90	98,89	94,62	72,50		AG	99,09	96,26
Ac	100,00	100,00	92,05	70,56		Dt	99,60	96,82
Ka	100,00	100,00	94,09	70,28		DS*	100,00	98,36
Zz	99,60	95,56	94,90	72,22		Hu	99,80	98,96

Abbildung 5: Mittelwerte der quadratischen und linearen Performance bestimmen den Sieger des Tests.

	Wände			Böden		
	Zyklus 1	Zyklus 2	Zyklus 3	Zyklus 1	Zyklus 2	Zyklus 3
Hu	99%	99%	99%	100%	100%	100%
DS	97%	99%	99%	100%	100%	100%
Dt	96%	94%	94%	99%	100%	99%
AG	97%	73%	16%	99%	96%	91%
Zr	94%	92%	90%	100%	100%	100%
ZZ	95%	65%	6%	100%	98%	92%

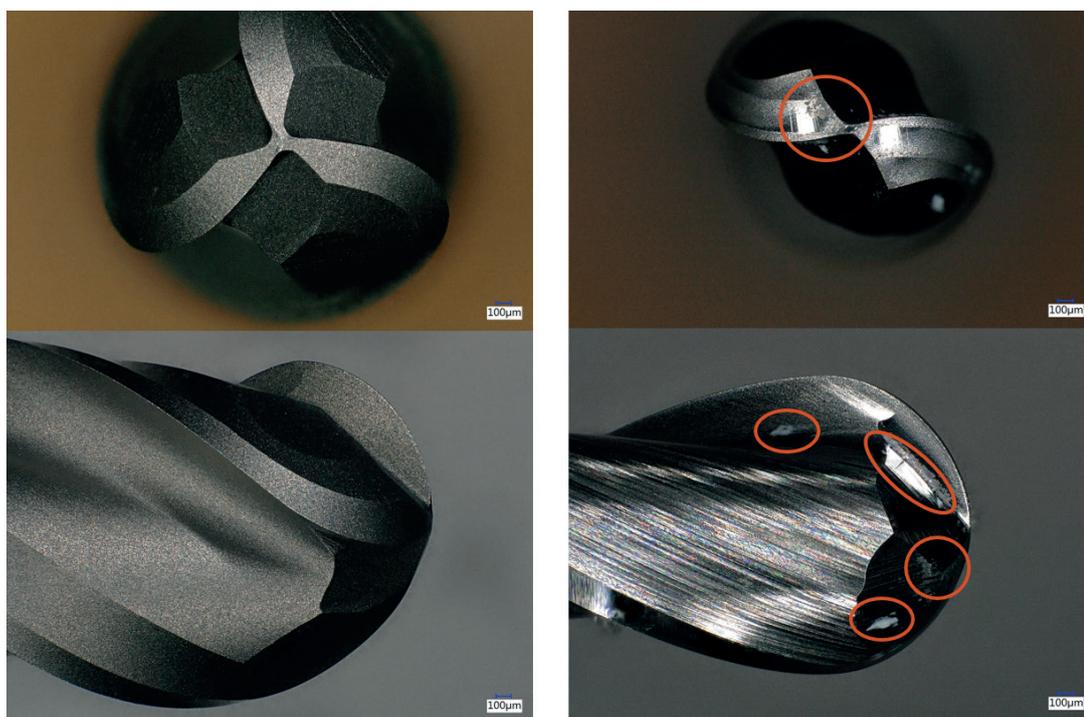
Abbildung 6: Die Ergebnisse des Standzeitversuchs

Standzeitversuch

Für die weitere Untersuchung wurden die besten sechs Hersteller ausgewählt, deren Werkzeuge im Test eine mittlere quadratische Performance bei den Zinnen von mindestens 95 % auswiesen. Interessant ist, dass hierzu auch die beiden unbeschichteten Fräser AG und Zz zählen. Demnach scheint für die Bearbeitung nur einer einzelnen Ronde, also von 30 Kronen, nicht zwingend eine Beschichtung erforderlich.

Ohne Werkzeugwechsel wurden für den Standzeittest drei weitere Ronden gefräst. Abbildung 6 zeigt die Ergebnisse des Standzeitversuchs. Während die Werkzeuge bei der Bearbeitung der Böden mit ihrer Leistung noch relativ nah beieinander liegen, trennt sich bei den Wänden die Spreu vom

Weizen. Die Performance der unbeschichteten Werkzeuge bricht schon ab der zweiten Ronde dramatisch ein. Auch in der Qualität der Beschichtung beziehungsweise in deren Abnutzungsverhalten gibt es offensichtlich deutliche Unterschiede. Einzig das Werkzeug von Hufschmied zeigt in allen drei Durchgängen gleichbleibend maximale Performance.



Links: Fräser Hu nach dem 3. Einsatz

Rechts: Fräser Zz nach dem 3. Einsatz

Abbildung 7: Werkzeug Hu und Zz nach dem Fräsen von drei Ronden (Foto: Hufschmied)

Abbildung 7 vergleicht das Fräswerkzeug der Firma Hufschmied (links) und eines der unbeschichteten Werkzeuge Zz (rechts) nach der gesamten Versuchsreihe. Hier ist ein deutlicher Unterschied im Zustand der Werkzeuge zu erkennen. Während das linke Werkzeug weder fehlerhafte Stellen in der Beschichtung noch in der Geometrie aufweist, sind auf dem rechten Bild deutlich Abnutzungserscheinungen zu erkennen (farbig gekennzeichnet). Der einwandfreie Zustand des Benchmark-Siegers von Hufschmied erklärt die konstant hohe quadratische Performance in allen drei Bearbeitungszyklen.

Aus den vorliegenden Ergebnissen kann ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Beschichtung der Fräser und dem Standzeitverhalten entnommen werden. Unbeschichtete Fräser können Zirkoniumdioxid kurzzeitig gut bearbeiten, jedoch bricht die Qualität mit der Zahl der gefrästen Ronden bzw. Kronen schnell und dramatisch ein. Für die Praxis in der Dentaltechnik bedeutet dies: Für eine andauernde, hohe Performance muss das Werkzeug zwingend mit einer Diamantschicht versehen sein, da beschädigte Werkzeuge keine hochwertigen Bearbeitungsergebnisse erzielen.

Fazit

„Mit dem Benchmark der Hochschule Augsburg haben wir die wissenschaftliche Bestätigung, dass wir mit der Entwicklung eines Fräswerkzeugs speziell für die Zerspannung von Zirkoniumdioxid für dentaltechnische Anwendungen erfolgreich waren. Entscheidend für die herausragenden Ergebnisse bei Bearbeitungsqualität und Standzeit sind eine speziell auf das Material angepasste Schneidengeometrie des HC720DT-DIP®3S und unsere patentierte Diamantbeschichtung. Hier folgt die Dentaltechnik den Erfahrungen mit industriellen Prozessen: Eine effiziente und prozesssichere Fertigung in der Zahntechnik ist nur mit hochwertigen Spezialwerkzeugen möglich“, sagt Ralph Hufschmied, Geschäftsführer Hufschmied Zerspanungssysteme GmbH. „Neben der Anpassung von Werkzeugen an das zu bearbeitende Material ergibt sich in unserer täglichen Praxis Optimierungspotenzial beim Kunden durch die Berücksichtigung der Eigenheiten von Fräsmaschinen und Bearbeitungsprogrammen. Dies wird durch das gute Abschneiden des Dentsply-Sirona-Werkzeugs bestätigt. Eine weitere Konsequenz des Benchmarks: Hersteller von Fräsmaschinen für Dentaltechnik können mit der Bereitstellung optimierter Werkzeuge punkten. Wir bieten hier gerne unser Know-how in Kooperationen an.“



Hufschmied.
Einen Schnitt voraus.

HUFSCHMIED Zerspanungssysteme GmbH
Edisonstraße 11d | 86399 Bobingen
Telefon +49 8234 9664-0
www.hufschmied.net
info@hufschmied.net