

Aus dem Zentrum für Zahnmedizin

der Medizinischen Fakultät Charité – Universitätsmedizin Berlin

DISSERTATION

**Systematische Untersuchung des Einflusses der
Andruckkraft beim Beschleifen auf die Rauheit von
Feldspatkeramiken**

zur Erlangung des akademischen Grades

Doctor medicinae dentariae (Dr. med. dent.)

vorgelegt der Medizinischen Fakultät
Charité – Universitätsmedizin Berlin

von

Robert Neumann

aus Dresden

Gutachter: 1. Priv.-Doz. Dr. F. P. Strietzel
2. Priv.-Doz. Dr. med. dent. K. Bitter
3. Prof. Dr. Dr. R. J. Radlanski

Datum der Promotion: 14.02.2014

Inhaltsverzeichnis

	<u>Seite</u>
Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	VII
1 Einleitung	1
2 Literaturübersicht	3
2.1 Einteilungen der Keramiken nach ihrer Zusammensetzung	5
2.2 Indikationen von Keramiken in der Zahnheilkunde	6
2.3 Problem der Wärmespannungen in Keramiken	7
2.4 Notwendigkeit der Oberflächenoptimierung	7
2.5 Effektivität von Schleif- und Poliersystemen	8
2.6 Einfluss von verschiedenen Bearbeitungsparametern auf die Festigkeit von Dentalkeramiken ein Vergleich von Literaturuntersuchungen	8
3 Problem- und Aufgabenstellung	13
4 Material und Methode	15
4.1 Materialcharakterisierung	15
4.2 Probenvorbereitungen	15
4.2.1 Versuchsaufbau und Arbeitsplatz für Handversuche.....	15
4.2.2 Versuchsaufbau und Arbeitsplatz für maschinelle Versuche.....	16
4.2.3 Einrichtung des Arbeitsplatzes	17
4.2.4 Bearbeitungsinstrumente.....	20
4.2.5 Aufbau und Kalibrierung des Drucksensors	21
4.3 Versuchsablaufschema.....	23
4.4 Rauheitsmessungen mit dem Perthometer	24
4.5 Statistische Auswertung.....	26
5 Ergebnisse	27
5.1 Ergebnisse der Handversuche.....	28
5.1.1 Ergebnisse Diamantschleifer grün (100µm)	28
5.1.2 Ergebnisse Diamantfinierer rot 30 µm	28
5.1.3 Ergebnisse Diamantfinierer gelb 15 µm	29
5.1.4 Ergebnisse Sof-Lex grob	29
5.1.5 Ergebnisse Sof-Lex mittel.....	30
5.1.6 Ergebnisse Sof-Lex fein	30

5.1.7	Ergebnisse Sof-Lex superfein	30
5.1.8	Ergebnisse Diamantpolierpaste (DP) nach Sof-Lex	31
5.1.9	Ergebnisse Keramikpolierer Ceraglaze grob(grün)	32
5.1.10	Ergebnisse Keramikpolierer Ceraglaze mittel (blau)	32
5.1.11	Ergebnisse Keramikpolierer Ceraglaze fein(gelb)	32
5.1.12	Ergebnisse Keramikpolierer OptraFine 1(hellblau).....	33
5.1.13	Ergebnisse Keramikpolierer OptraFine 2 (dunkelblau)	34
5.1.14	Ergebnisse Polierbürste OptraFine 3 (Nylonbürste mit Diamantpaste) ..	34
5.2	Ergebnisse mit der Testvorrichtung	35
5.2.1	Ergebnisse Diamant Grünring	35
5.2.2	Ergebnisse Diamant Rotring.....	36
5.2.3	Ergebnisse Diamant Gelbring.....	36
5.2.4	Ergebnisse Keramikpolierer Ceraglaze grob (grün)	37
5.2.5	Ergebnisse Keramikpolierer Ceraglaze mittel (blau)	38
5.2.6	Ergebnisse Keramikpolierer Ceraglaze fein (gelb)	39
5.2.7	Ergebnisse Keramikpolierer OptraFine 1 (hellblau).....	40
5.2.8	Ergebnisse Keramikpolierer OptraFine 2 (dunkelblau).....	41
5.2.9	Ergebnisse Polierbürste OptraFine 3 (Bürste mit Diamantpaste)	42
5.3	Ergebnisse der Rauheitsreduktion der Schleif- und Poliersysteme.....	42
5.3.1	Diamantschleifer.....	43
5.3.1.1	Grünringdiamant	47
5.3.1.2	Rotringdiamant	48
5.3.1.3	Gelbringdiamant	49
5.3.2	Cera Glaze Polierer	50
5.3.2.1	CeraGlaze grob	53
5.3.2.2	CeraGlaze mittel	54
5.3.2.3	CeraGlaze fein.....	54
5.3.3	Optrafine Polierer	56
5.3.3.1	Optrafine grob.....	59
5.3.3.2	Optrafine mittel	59
5.3.3.3	Optrafine fein	60
5.3.3.4	SofLex Scheiben grob/mittel/fein/superfein/Diamantpolierpaste	60
5.4	Auswertung der Diagramme, Tabellen, REM Bilder und Fotos.....	63
6	Diskussion	64
6.1	Diskussion der Handbearbeitung	64
6.1.1	Diskussion der Testvorrichtung unter kontrollierten Bedingungen.....	66

6.1.2	Bewertung der optimalen Politur mit der Testvorrichtung und der optimalen Politur der Handversuche	68
6.2	Schleif- und Poliermethodik unter Berücksichtigung des gewählten Anpressdrucks	69
6.3	Messverfahren	70
7	Zusammenfassung	73
	Literaturverzeichnis	75
	Anhang	IX
	Danksagung	XXIV
	Erklärung	XXV
	Lebenslauf	XXVI

Abbildungsverzeichnis

	<u>Seite</u>
<i>Abb. 2.1:</i> Ternäres Phasendiagramm	5
<i>Abb. 2.2:</i> Schematische Darstellung SiO ₂ -Molekül.....	5
<i>Abb. 2.3:</i> Schematische Darstellung Oxidkeramiken	5
<i>Abb. 4.1:</i> Keramischer Block für CEREC	15
<i>Abb. 4.2:</i> Aufbau der Testvorrichtung	16
<i>Abb. 4.3:</i> Ansicht des Drucksensors mit Halterung	17
<i>Abb. 4.4:</i> Übersicht der kompletten Testvorrichtung	17
<i>Abb. 4.5:</i> Bewegungsrichtungen des Schleifers/Polierers.....	18
<i>Abb. 4.6:</i> Linearitätskurve des Drucksensors.....	22
<i>Abb. 4.7:</i> Schemazeichnung des Drucksensors.....	23
<i>Abb. 4.8:</i> Flussdiagramm der Vorgehensweise.....	24
<i>Abb. 4.9:</i> Darstellung der Bestimmung von R _{max}	25
<i>Abb. 4.10:</i> Darstellung der Bestimmung von R _z	25
<i>Abb. 4.11:</i> Messschema längs/quer.....	25
<i>Abb. 4.12:</i> Rauheitsmessungen mit dem Perthometer (Profilometer)	25
<i>Abb. 5.1:</i> Diagramm Diamantschleifer grün R _{max}	28
<i>Abb. 5.2.:</i> Diagramm Diamantschleifer grün R _z	28
<i>Abb. 5.3:</i> Diagramm Diamantschleifer rot R _{max}	28
<i>Abb. 5.4:</i> Diagramm Diamantschleifer rot R _z	28
<i>Abb. 5.5:</i> Diagramm Diamantschleifer gelb R _{max}	29
<i>Abb. 5.6:</i> Diagramm Diamantschleifer gelb R _z	29
<i>Abb. 5.7:</i> Diagramm SofLex grob R _{max}	29
<i>Abb. 5.8:</i> Diagramm SofLex grob R _z	29
<i>Abb. 5.9:</i> Diagramm SofLex mittel R _{max}	30
<i>Abb. 5.10:</i> Diagramm SofLex mittel R _z	30
<i>Abb. 5.11:</i> Diagramm SofLex fein R _{max}	30
<i>Abb. 5.12:</i> Diagramm SofLex fein R _z	30
<i>Abb. 5.13:</i> Diagramm SofLex superfein R _{max}	31
<i>Abb. 5.14:</i> Diagramm SofLex superfein R _z	31
<i>Abb. 5.15:</i> Diagramm Diamantpolierpaste R _{max}	31
<i>Abb. 5.17:</i> Diagramm Ceraglaze grob R _{max}	32
<i>Abb. 5.18:</i> Diagramm Ceraglaze grob R _z	32
<i>Abb. 5.19:</i> Diagramm Ceraglaze mittel R _{max}	32
<i>Abb. 5.20:</i> Diagramm Ceraglaze mittel R _z	32

<i>Abb. 5.21:</i>	Diagramm Ceraglaze fein Rmax.....	33
<i>Abb. 5.22:</i>	Diagramm Ceraglaze fein Rz.....	33
<i>Abb. 5.23:</i>	Diagramm OptraFine 1 Rmax.....	33
<i>Abb. 5.24:</i>	Diagramm OptraFine 1 Rz.....	33
<i>Abb. 5.25:</i>	Diagramm OptraFine 2 Rmax.....	34
<i>Abb. 5.26:</i>	Diagramm OptraFine 2 Rz.....	34
<i>Abb. 5.27:</i>	Diagramm Optrafine 3 Rmax.....	34
<i>Abb. 5.28:</i>	Diagramm Optrafine 3 Rz.....	34
<i>Abb. 5.29:</i>	Diagramm Diamant grün Rmax.....	35
<i>Abb. 5.30:</i>	Diagramm Diamant grün Rz.....	35
<i>Abb. 5.31:</i>	Diagramm Diamant rot Rmax.....	36
<i>Abb. 5.32:</i>	Diagramm Diamant rot Rz.....	36
<i>Abb. 5.33:</i>	Diagramm Diamant gelb Rmax.....	37
<i>Abb. 5.34:</i>	Diagramm Diamant gelb Rz.....	37
<i>Abb. 5.35:</i>	Diagramm Ceraglaze grob Rmax.....	38
<i>Abb. 5.36:</i>	Diagramm Ceraglaze grob Rz.....	38
<i>Abb. 5.37:</i>	Diagramm Ceraglaze mittel Rmax.....	39
<i>Abb. 5.38:</i>	Diagramm Ceraglaze mittel Rz.....	39
<i>Abb. 5.39:</i>	Diagramm Ceraglaze fein Rmax.....	40
<i>Abb. 5.40:</i>	Diagramm Ceraglaze fein Rz.....	40
<i>Abb. 5.41:</i>	Diagramm Optrafine 1 Rmax.....	40
<i>Abb. 5.42:</i>	Diagramm Optrafine 1 Rz.....	40
<i>Abb. 5.43:</i>	Diagramm Optrafine 2 Rmax.....	41
<i>Abb. 5.44:</i>	Diagramm Optrafine 2 Rz.....	41
<i>Abb. 5.45:</i>	Diagramm Optrafine 3 Rmax.....	42
<i>Abb. 5.46:</i>	Diagramm Optrafine 3 Rz.....	42
<i>Abb. 5.47:</i>	Diagramm Rauheitsreduktion Diamant/längs/Rmax.....	43
<i>Abb. 5.48:</i>	Diagramm Rauheitsreduktion Diamant/längs/Rz.....	43
<i>Abb. 5.49:</i>	Diagramm Rauheitsreduktion Diamant/quer/Rmax.....	44
<i>Abb. 5.50:</i>	Diagramm Rauheitsreduktion Diamant/quer/Rz.....	44
<i>Abb. 5.51:</i>	Schleifmuster Grünringdiamant 100fach.....	45
<i>Abb. 5.52:</i>	Schleiffurchen Grünringdiamant 1000fach.....	45
<i>Abb. 5.54:</i>	Schleifmuster Rotringdiamant 100fach.....	46
<i>Abb. 5.55:</i>	Schleiffurchen Rotringdiamant 1000fach.....	46
<i>Abb. 5.56:</i>	Übersicht Rotringdiamantschleifer verschlissen.....	46
<i>Abb. 5.57:</i>	Übersicht Rotringdiamantschleifer mit Schleifpartikelresten.....	47
<i>Abb. 5.58:</i>	Übersicht Rotringdiamantschleifer Walze.....	47

<i>Abb. 5.59:</i>	Diagramm Rauheitsreduktion Ceraglaze/längs/Rmax	50
<i>Abb. 5.60:</i>	Diagramm Rauheitsreduktion Ceraglaze/längs/Rz	50
<i>Abb. 5.61:</i>	Diagramm Rauheitsreduktion Ceraglaze/quer/Rmax	51
<i>Abb. 5.62:</i>	Diagramm Rauheitsreduktion Ceraglaze/quer/Rz	51
<i>Abb. 5.63:</i>	Schleifmuster CeraGlaze grob 100fach	52
<i>Abb. 5.64:</i>	verbliebene Rille vom Diamanten nach CeraGlaze grob Behandlung	52
<i>Abb. 5.65:</i>	Übersicht CeraGlaze grob Instrument	52
<i>Abb. 5.66:</i>	Oberfläche nach CeraGlaze mittel Behandlung 500fach	52
<i>Abb. 5.67:</i>	Oberfläche nach CeraGlaze mittel Behandlung (0,5 N) 500fach	52
<i>Abb. 5.68:</i>	Oberfläche nach CeraGlaze fein Behandlung 100fach	53
<i>Abb. 5.69:</i>	Oberfläche nach CeraGlaze fein Behandlung 1000fach	53
<i>Abb. 5.70:</i>	Übersicht CeraGlaze fein Instrument	53
<i>Abb. 5.71:</i>	Diagramm Rauheitsreduktion Optrafine/längs/Rmax	56
<i>Abb. 5.72:</i>	Diagramm Rauheitsreduktion Optrafine/längs/Rz	56
<i>Abb. 5.73:</i>	Diagramm Rauheitsreduktion Optrafine/quer/Rmax	57
<i>Abb. 5.74:</i>	Diagramm Rauheitsreduktion Optrafine/quer/Rz	57
<i>Abb. 5.75:</i>	Oberfläche nach CeraGlaze grob Behandlung 100fach	58
<i>Abb. 5.76:</i>	Oberfläche nach CeraGlaze grob Behandlung 1000fach	58
<i>Abb. 5.77:</i>	Oberfläche nach CeraGlaze mittel Behandlung 100fach	58
<i>Abb. 5.78:</i>	Oberfläche nach CeraGlaze mittel Behandlung 1000fach	58
<i>Abb. 5.79:</i>	Oberfläche nach CeraGlaze fein Behandlung 1000fach	58
<i>Abb. 5.80:</i>	Oberfläche nach CeraGlaze fein Behandlung 100fach	58
<i>Abb. 5.81:</i>	Diagramm Rauheitsreduktion SofLex/Rmax	61
<i>Abb. 5.82:</i>	Diagramm Rauheitsreduktion SofLex/Rz	61
<i>Abb. 5.83:</i>	REM Aufnahme behandelter Keramikblock mit Rillen 100fach	63
<i>Abb. 5.84:</i>	Foto Keramikblock nach Politur mit Rillen	63
<i>Abb. 6.1:</i>	Diagramm Gegenüberstellung optimale Hand-/Maschinenpolitur	69

Tabellenverzeichnis

	<u>Seite</u>
Tab. 2.1.: Keramiken nach dem Herstellungsverfahren.....	4
Tab. 2.2: Übersicht Anpressdruck anderer Studien	10
Tab. 4.1.: Bearbeitungsparameter	19
Tab. 4.2: Auflistung der Instrumente.....	20
Tab. 4.3: Gegenüberstellung der Bearbeitungsschritte.....	21
Tab. 4.3: Messwerte Drucksensor	22
Tab. 5.1: Messwerte Diamant mit Standardabweichung.....	29
Tab. 5.2: Messwerte SofLex Scheiben mit Standardabweichung.....	31
Tab. 5.4: Messwerte Optrafine mit Standardabweichung	35
Tab. 5.5: Messwerte Diamant grün definierter Anpressdruck mit Standardabweichung	35
Tab. 5.6: Messwerte Diamant rot definierter Anpressdruck mit Standardabweichung	36
Tab. 5.7: Messwerte Diamant gelb definierter Anpressdruck mit Standardabweichung	37
Tab 5.8: Messwerte CeraGlaze grob def. Anpressdruck mit Standardabweichung ..	38
Tab. 5.9: Messwerte CeraGlaze mittel def. Anpressdruck mit Standardabweichung.	39
Tab 5.10: Messwerte CeraGlaze fein def. Anpressdruck mit Standardabweichung ...	40
Tab 5.11: Messwerte Optrafine 1 def. Anpressdruck mit Standardabweichung	41
Tab. 5.12: Messwerte Optrafine 2 mit Standardabweichung	41
Tab 5.13: Messwerte Optrafine 3 def. Anpressdruck mit Standardabweichung	42
Tab. 5.14: Messwerte Rauheitsreduktion Diamant längs Rmax	43
Tab. 5.15: Messwerte Rauheitsreduktion Diamant längs Rz	43
Tab. 5.16: Messwerte Rauheitsreduktion Diamant quer Rmax.....	44
Tab. 5.17: Messwerte Rauheitsreduktion Diamant quer Rz.....	44
Tab. 5.18: Messwerte Rauheitsreduktion CeraGlaze längs Rmax.....	50
Tab. 5.19: Messwerte Rauheitsreduktion CeraGlaze längs Rz	50
Tab. 5.20: Messwerte Rauheitsreduktion CeraGlaze quer Rmax.....	51
Tab. 5.21: Messwerte Rauheitsreduktion CeraGlaze quer Rz.....	51
Tab. 5.22: Messwerte Rauheitsreduktion Optrafine längs Rmax	56
Tab. 5.23: Messwerte Rauheitsreduktion Optrafine längs Rz	56
Tab. 5.24: Messwerte Rauheitsreduktion Optrafine quer Rmax	57
Tab. 5.25: Messwerte Rauheitsreduktion Optrafine quer Rz	57
Tab. 5.26: Messwerte Rauheitsreduktion SofLex längs Rmax.....	61
Tab. 5.27: Messwerte Rauheitsreduktion SofLex längs Rz	61

Tab. 5.28: Messwerte Rauheitsreduktion SofLex quer R_{\max}	62
Tab. 5.29: Messwerte Rauheitsreduktion SofLex quer R_z	62

1 Einleitung

Keramiken werden heute in großem Umfang in der Zahnmedizin eingesetzt und sind in der Lage nahezu alle Indikationsbereiche abzudecken. Hohe Festigkeit, Formbeständigkeit, gute Biokompatibilität und ein großes ästhetisches Potenzial lassen diesen Werkstoff ideal erscheinen [1]. Allerdings unterscheiden sich die Dentalkeramiken hinsichtlich der Festigkeit und der ästhetischen Eigenschaften beträchtlich. Die beiden Hauptgruppen Oxidkeramiken und Silikatkeramiken verhalten sich dahingehen diametral. Während Oxidkeramiken, wie Zirkoniumdioxid oder glasinfiltriertes Aluminiumoxid hohe bis sehr hohe Festigkeitsparameter besitzen, sind sie wegen ihrer ausgeprägten Opazität für eine vollanatomische ästhetische Versorgung ungeeignet. Die zweite Gruppe, die Silikatkeramiken kommen durch ihre ausgezeichnete Transparenz optisch der natürlichen Zahnschmelze sehr nahe und ermöglicht eine perfekte, ästhetische Anpassung.

Werkstoffeigenschaften wie zahnähnliches Abrasionsverhalten und geringe Wärmeleitung machen sie für die Restauration von Zahndefekten nahezu ideal. Allerdings sind sie hinsichtlich der Festigkeit den Oxidkeramiken bei weitem unterlegen. So ist das Bruchverhalten dieser keramischen Materialien von großem Interesse und Ziel zahlreicher Untersuchungen. Neben der obligaten adhäsiven Befestigung silikatkeramischer Restaurationen kommt dem Finish der keramischen Oberfläche eine ganz entscheidende Bedeutung zu. Da offensichtlich eine Korrelation verschiedener Festigkeitsparameter mit dem Zustand der Keramikoberfläche besteht, sollten eingeschliffene, gebrannte Keramiken bzw. Oberflächen einer maschinell hergestellten keramischen Restauration grundsätzlich optimiert werden. Die Oberflächenoptimierung kann auf dem Weg der Individualisierung mittels Farbauftrag und Glasurbrand oder durch Politur erfolgen.

Letztere ist Voraussetzung für CAD/CAM gefertigte und intraoral polierte Restaurationen. Diese haben sich seit über 20 Jahren bewährt und stellen mittlerweile einen etablierten Behandlungsstandard dar [2-4]. Die Güte der Politur differiert in der Praxis allerdings durchaus und ist häufig verbesserungswürdig.

Die Festigkeitserhöhung der Keramik nach einer Politur beziehungsweise Glazing bestätigen eine Vielzahl von Autoren [5-11], nur wenige Publikationen relativieren diesen Effekt [12, 13].

Neben der Verminderung der Festigkeit wird eine beschleunigte Abrasion der Restauration und des Antagonisten begünstigt [14, 15]. Weiterhin ist wegen der Anlagerungsmöglichkeiten für Plaque ein erhöhtes Risiko aus parodontologischer und kariologischer Sicht zu erwarten [16]. In-vitro-Studien konnten belegen, dass bei einer durchschnittlichen Rauheit größer als $0,3 \mu\text{m}$ die Bakterienadhärenz deutlich ansteigt [17].

Deshalb ist die adäquate Politur der keramischen Oberfläche im Sinne einer der Glasur ebenbürtigen Oberflächenvergütung [18] unbedingt zu fordern.

2 Literaturübersicht

Ausgangsbasis für die Entwicklung von Dentalkeramiken war das Porzellan. Die erste Fertigung von Porzellanzähnen 1774 durch *Duchateau* [19] führte zu einer kontinuierlichen Entwicklung der Dentalkeramiken. Gatzka [20] setzte 1949 mit dem ersten Vakuumbrand einen vorläufigen Meilenstein. Um 1900 entstanden in Deutschland Zahnfabriken wie Wienand (Bad Nauheim), Hutschenreuther (Radeberg) oder Dr. Hildebrandt (Bad Säckingen), die heutige Vita Zahnfabrik. Mit der parallel entwickelten sogenannten Jacketkrone gelangen erstmals klinisch praktikable, ästhetische Restaurationen von anterioren Zähnen. MacLean gelang es 1965 durch Zugabe von Korund die Festigkeit des Kernmaterials auf 120 MPa Biegebruchfestigkeit zu erhöhen. Dennoch blieb vollkeramischen Systemen wegen der hohen Misserfolgsrate und Passungsproblemen nur ein geringer Indikationsbereich vorbehalten und ließ die inzwischen etablierte Metallkeramik bevorzugt zum Einsatz kommen. Der besseren Biokompatibilität und natürlicheren Ästhetik wegen wurde weiterhin intensiv an der Verbesserung dentalkeramischer Systeme gearbeitet, von denen in den 80er Jahren eine ganze Anzahl praxisreif vorgestellt wurden, wie Cerestore (Johnson&Johnson, 1984), Dicor (Dentsply, 1984), Hiceram (Vita, 1986), Optec (Jeneric, 1987), InCeram (Vita, 1989) und Empress (Ivoclar, 1990). Die Infiltrationskeramik InCeram und Empress, eine gepresste Glaskeramik brachten endlich die gewünschte Verbindung von Festigkeit und hoher Ästhetik und somit die Möglichkeit für den breiten Einsatz für vollkeramische Kronen, Teilkronen und Inlays. Das Optec-System setzte als erstes auf eine adhäsive Befestigung mit Schmelzätzung und Keramikconditionierung. Auch Empress bot sich für die Adhäsivtechnik an. Die sich daraus ergebende Verbundstabilisierung war ein Wendepunkt für den breiten klinisch sicheren Einsatz vollkeramischer Restaurationen.

Auf der Suche nach geeigneten Verfahren der Keramikverarbeitung etablierten sich sehr unterschiedliche Technologien. (Tab. 2.1.)

Tab. 2.1.: Keramiken nach dem Herstellungsverfahren

Formsinterung	Gießen	Heisspressen	Kopierschleifen	CAD/CAM
Vitadur	Dicor	Empress	Celay Vita	CEREC Vita Mark II
Optec HSP	Cerapearl	Empress 2	Celay Alumina	CEREC Empress
Hi-Ceram		Optec OPC		CEREC IPS e.max
Duceram		Cerapress		Everest
InCeram		Cerestore		Lava
				Procera

Aus werkstoffkundlicher Sicht ist vor allem die industriell vorgefertigte und dann CAD/CAM gestützt konstruierte und ausgeschliffene Keramik von großem Interesse. Schwankungen in der Qualität und Reinheit von Ausgangskomponenten, sowie die durch hohe Brenntemperaturen laborgefertigte Keramiken zu erwartende Mikroporosität, Inhomogenität und Schrumpfung wären beseitigt.

Diese erste schleifbare Feldspatkeramik brachte die Firma Vita 1988 unter dem Namen Vita Mark I auf den Markt und ist mittlerweile durch weiterentwickelte Feldspat- und Glaskeramiken ergänzt worden und stehen als Vita Mark II, Vita Mark Trilux, sowie als Glaskeramiken IPS Empress CAD und IPS e.max CAD für einen breiten Indikationsbereich zur Verfügung.

Die Feldspatkeramiken nehmen einen Platz zwischen industriellen Keramiken und dem Glas ein. In eine amorphe Glasmatrix eingebettet sind kristalline Strukturen, die etwa ein Drittel ausmachen. Basis der klassischen Dentalkeramiken sind die Feldspäte, eine Mischung aus Quarz, Aluminiumoxid und Kalium-, Natrium- und Calciumoxid.

Moderne Dentalkeramik bestehen heute aus einer Mischung von kristallinen und nicht-kristallinen (glasartigen) Bestandteilen.

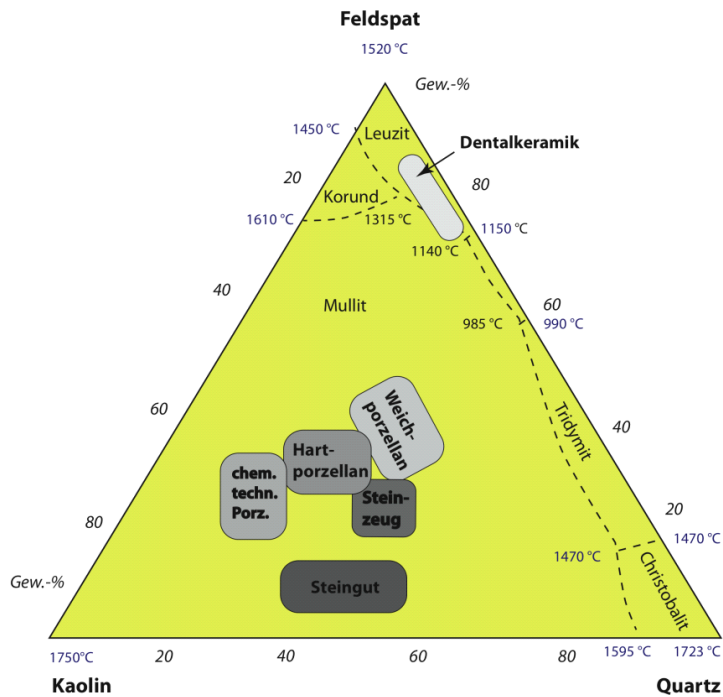


Abb. 2.1: Ternäres Phasendiagramm

2.1 Einteilungen der Keramiken nach ihrer Zusammensetzung

Hauptsächlich lassen sich Keramiken in zwei verschiedene Gruppen einteilen, die Silikatkeramik (Feldspat- und Glaskeramiken) und zum anderen die Oxidkeramiken.

Der Hauptbestandteil der Feldspatkeramiken ist die amorphe Glasphase. Das heißt eine reguläre kristalline Struktur liegt in diesem Alumosilikat - Al_2O_3 - SiO_2 - Gemisch nicht vor. Strukturbestimmend ist in diesem Fall das SiO_2 - Netzwerk, wie in Abb. 2.2 schematisch dargestellt.

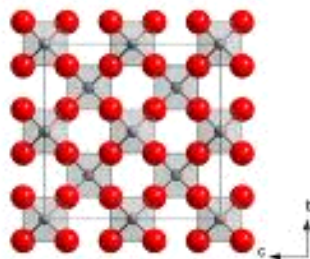
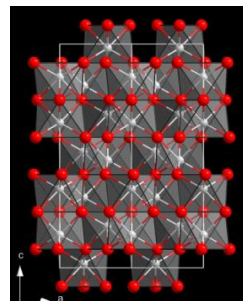
Abb. 2.2: Schematische Darstellung SiO_2 -Molekül

Abb. 2.3: Schematische Darstellung Oxidkeramiken

Neben einer sehr geringen Biegefestigkeit ist äußerlich die Porenstruktur auffällig. Die starke Bruchanfälligkeit kann durch bestimmte Zusätze wie zum Beispiel Leuzit-Kristalle

deutlich gemindert werde. Es handelt sich dabei um eine kristalline Phase der Feldspä- te, die bei entsprechender Temperaturführung durch Ausscheidung von zwei Quarzmo- lekülen gebildet werden kann.

Die sogenannten „Oxidkeramiken“ hingegen zeichnen sich durch ihre kristalline Struktur aus, wie in Abb. 2.3 zu sehen. Zu den Vertretern gehören reines Al_2O_3 sowie tetrago- nal Phasen stabilisiertes ZrO_2 . Hierbei wird neben der Kristallinität in der Struktur zu- sätzlich noch auf eine Volumenzunahme bei Energieeintrag als Folge der Gitterum- wandlung von tetragonal nach monoklin, und damit verbundener Rissverkürzung zur Verbesserung der Biegefestigkeit zurückgegriffen[1].

Es ist aber zu berücksichtigen, dass dieser Prozess unter Normalbedingungen nicht reversibel ist, sondern in diesem Fall ein einmaliges Ereignis und in der Folge, das heißt, bei weiterer Belastung an der Rissspitze deren Ausbreitung nicht weiter verhin- dern, sondern somit nur verzögern kann.

2.2 Indikationen von Keramiken in der Zahnheilkunde

Vollkeramiken nehmen in der Zahnheilkunde einen festen Platz ein. Sie stellen einen geeigneten Werkstoff dar, verlorengegangene Zahnhartsubstanz adäquat zu ersetzen. Die Verbesserung der physikalischen Eigenschaften von Dentalkeramiken ermöglichte einen breiten Einsatz in der Zahnheilkunde und erweitert das Indikationsspektrum stän- dig.

Gründe, weshalb der Einsatz von Keramiken vorteilhaft ist, sind unter anderem folgen- de:

1. Der Erhalt der anatomischen Form des Zahnes [21, 22]
2. Die Schonung der Pulpa[21, 23, 24]
3. Verbesserte parodontale Situation[21, 25, 26]
4. Der Erhalt von natürlicher Zahnhartsubstanz [21]
5. Möglichkeit der vereinfachten täglichen Hygiene [21, 27]
6. Ermöglichung der visuellen Kontrolle des Restaurationsrandes [21, 28, 29]
7. Verbesserte Sicherheit der Vitalitätskontrolle [3, 4, 24, 30]

8. Vergleichbarkeit der Schmelzabrasion im Gebiss[31, 32]
9. Vergleichbarkeit der Abrasion im Gegenkiefer[32]
10. Ästhetisch ansprechendes Ergebnis, neben der Wiederherstellung der Funktion[33, 34]

2.3 Problem der Wärmespannungen in Keramiken

Von großem Interesse ist der Wärmeeintrag in das Material in Bezug auf damit provoziertes Risswachstum [35, 36].

Keramiken tolerieren Druckspannungen wesentlich besser als Zugspannungen, daraus resultiert das für sie typische Sprödigkeitsverhalten. Risse, die bei der Herstellung oder mechanischer Bearbeitung entstehen, können unter diesen Bedingungen „wachsen“. Erzeugte Spannungen konzentrieren sich hauptsächlich auf die Fehlstellen. Während Druckspannung beginnende Risse wieder zusammendrückt und schließt, führen Zug- oder Scherbelastungen zu deren Öffnung und somit Verlängerung. Da keramische Materialien sich nicht verformen können und damit die mechanische Spannung verringert, ist bei überkritischer Bruchspannung die Fraktur vorprogrammiert.

In der klinischen Praxis bedeutet das, dass durch unsachgemäße Anwendung von Polierern oder Diamantfinierern, zum Beispiel ungenügende Wasserkühlung und/oder zu hohem Druck sich der keramische Werkstoff übermäßig erwärmt. Defekte, wie zum Beispiel Kratzer oder Risse, die unter Zugbelastung geraten, werden zu Schwach- und Gefahrenstellen der Stabilität.

Diese Wärme kann wegen der sehr schlechten Wärmeleitung kaum in die Umgebung abgeführt werden. Die Folge ist eine schnelle Ausdehnung des Materials auf der Oberfläche, während die tiefer gelegenen Schichten dieser Bewegung nicht folgen. Eine Rissbildung und Rissfortpflanzung beginnt [35].

2.4 Notwendigkeit der Oberflächenoptimierung

Rauhigkeiten, Defekte und Poren an der Oberfläche können Ursache für eine Rissbildung- bzw. Rissausbreitung sein.

Keramische Werkstoffe sind sehr spröde und deshalb anfällig für Biege- und Zugkräfte. Defekte und Poren an der Oberfläche können als Ursache für eine Rissausbreitung die-

nen. So kann zum Beispiel Speichel, der in Porositäten dringt, einen nach innen gerichteten Druck erzeugen, der bereits bestehende Risse vergrößert. Außerdem können die Bindungen zwischen den Siliziumdioxidtetraedern gespalten werden, wenn eine mit Speichel gefüllte Risspitze auf diese trifft. Es ist deshalb möglich, dass selbst eine wenig belastete keramische Arbeit dadurch geschädigt wird und dann in der Folge bricht. Aus diesem Grund sollten Zahntechniker beziehungsweise Behandler unbedingt dafür Sorge tragen, dass die Keramik eine möglichst glatte und porenfreie Oberfläche aufweist. Erreichen kann man das am einfachsten durch den Glanzbrand. Wenn dies jedoch durch eventuelle Korrekturen nach Eingliederung nicht mehr möglich ist, sollte eine bestmögliche Politur erfolgen.

Das einschleifen mittels Diamantschleifern von keramischen Restaurationen stellt ein gebräuchliches Verfahren dar, Vorkontakte intraoral zu beseitigen (Hung2008). Nach den Einschleifmaßnahmen ist eine Politur der aufgerauten Oberfläche unerlässlich [37].

In-vitro-Studien konnten belegen, dass bei einer durchschnittlichen Rauheit größer als $0,3 \mu\text{m}$ die Bakterienadhärenz deutlich ansteigt [17].

2.5 Effektivität von Schleif- und Poliersystemen

Die Effektivität einer Politur bezüglich der Verbesserung der Biegefestigkeit wird von vielen Studien befürwortet und von anderen bezweifelt (Ahmad2005; Alkhiary2003, de Jager2000). Die genauen Mechanismen sind nicht genau zu erklären und damit nur bedingt auf die Zahnmedizin übertragbar. Häufig gehen aus den Studien die verwendeten Parameter wie Drehzahl, Anpressdruck, Bearbeitungsdauer, etc. nicht hervor [13, 38]. Die Mehrheit der Untersuchungen berichtet über einen Anstieg der Biegefestigkeit sowie eine Verringerung des Risswachstums.

2.6 Einfluss von verschiedenen Bearbeitungsparametern auf die Festigkeit von Dentalkeramiken ein Vergleich von Literaturuntersuchungen

Die Polierbarkeit von Dentalkeramiken wird experimentell im Allgemeinen auf flachen oder scheibenförmigen Proben untersucht, die anschließend einer Bearbeitung mit zahnärztlichen oder zahntechnischen Hand- beziehungsweise Winkelstücken unterzogen werden (Krejci1999). Als wesentliche Parameter dienen neben dem eigentlichen Bearbeitungsinstrument die Rotationsgeschwindigkeit und Polierdauer und Anpress-

druck. Häufig findet man dazu keine Angaben, wie unter anderem de Jager, Alkhiary und Fairhust [13, 38, 39] feststellten.

Krejci und Lutz [40] legen einen Anpressdruck fest, ohne darauf einzugehen, weshalb dieser so gewählt wurde. Insgesamt werden in relevanten Studien Drücke zwischen 0,22 N bis 22 N [39, 41, 42] angegeben. Bezogen auf die zahnärztliche Praxis erscheinen die Kräfte in der oben genannten Größenordnung realistisch bis deutlich zu hoch [43, 44]. Alkhiary et al. verwendet ein präzises Politurprotokoll, basierend auf Messungen mit erfahrenen Zahnärzten.

Einige Hersteller von Polierinstrumenten empfehlen für intraorale Anwendung 0,3 N bis 2 N [45, 46], für Instrumente in der Zahntechnik wurden Werte bis 6 N aufgeführt.

In einer Studie von S.D. Heintze setzt sich der Autor mit Oberflächenrauheit und Glanz in Bezug auf den Anpressdruck und Polierdauer auseinander. Die Proben wurden alle einheitlich mit Sandpapierscheiben vorbehandelt, die eine Rauheit eines vergleichbaren 30-40 μm Diamantschleifers erzeugen sollten. Das verwendete Gerät für den definierten Anpressdruck arbeitet mit Druckluft. Der Luftdruck steht in Relation zum Anpressdruck. Die Apparatur benutzt eine luftgefüllte Druckkammer, die durch externe, mechanische Druckapplikation solange komprimiert wird, bis sich der gewünschte Anpressdruck einstellt. Angewendet wurden zwei Druckstufen, 2 N und 4 N. Die Parameter Drehzahl (10.000 U/min) und Zeit (30 s) blieben bei allen Polierstufen konstant. In den Zwischenschritten erfolgte eine Reinigung der Probenoberfläche mit Druckluft und Wasser. Heintze et al. fanden einen Zusammenhang zwischen Anpressdruck und Oberflächenrauheit. Ferner ergaben Poliermaschinen geringere Rauheiten als Handpolituren.

Tab. 2.2: Übersicht Anpressdruck anderer Studien

Material	Anpressdruck	Drehzahl (U/min)	Zeit in s	Bewertung/Ergebnis
Amalcap plus	2 N / 4N	10.000	30	mehr Druck-mehr Rauheit
Compoglass F	2 N / 4N	10.000	30	mehr Druck-mehr Rauheit
Heliomolar RO	2 N / 4N	10.000	30	mehr Druck-mehr Rauheit
Tetric Ceram	2 N / 4N	10.000	30	Mehr Druck - geringere Rauheit
Tetric Evoceram	2 N / 4N	10.000	30	mehr Druck - geringere Rauheit

Zwei weitere Studien [47, 48] verwendeten einen definierten Anpressdruck, der zwischen 1,75 und 2,25 Newton lag, für die Evaluierung von Polierpasten. Mittels einer digitalen Küchenwaage und kontaktlosen magnetischen Schaltern wurde über ein akustisches Signal per Hand der Anpressdruck weitestgehend für 45 Sekunden konstant gehalten. In welcher Art und Weise sich der Polierer mit Polierpaste über die Probe bewegte, wurde nicht deutlich, sie erfolgte durch eine Testperson.

Krejci et al.[40] unterzogen alle Proben, in diesem Fall mit Kompositfüllungen versehene natürliche Zähne einer Politur. Dazu wurde im ersten Schritt mit einem 25 µm Finierdiamanten ohne Anpressdruck unter Wasserkühlung die Kompositoberfläche bearbeitet, danach mit einem maximalen Anpressdruck von 2,5 Newton mit und ohne Wasserspray für 8 Minuten behandelt. Es wird nicht darauf eingegangen, weshalb dieser Anpressdruck gewählt wurde und in welcher Größenordnung er schwankte. Nicht im Ansatz kann nachvollzogen werden, mit wie viel Kraft der Finierdiamant die Vorpolutur übernahm.

Die Studie von Alkhiary [39] setzt sich ausführlich mit den Parametern auseinander, mit denen Keramikproben bearbeitet werden. Eigens dafür ließ er ein Polierprotokoll erstellen, welches aus einem Team von 8 erfahrenen Prothetikern bestand. Die Parameter Anpressdruck und Zeit fanden Bedeutung. Das Protokoll ergab einen Druck von 0,6 N

bis 1,3 N. Die Vorschubgeschwindigkeit, Drehzahl und Polierzyklen waren ebenfalls genau definiert. Auf dieser Grundlage richtete er eine programmierbare CNC Drehbank ein, die alle Keramikproben nach den oben genannten Parametern bearbeitete. Damit wollte er eine Standardisierung der Oberflächenbehandlung erreichen. Jedoch räumt er ein, dass selbst damit keine vollkommene klinische Situation simuliert werden kann.

Das oben genannte Polierprotokoll übernahm Ahmad et al., um die Frage zu klären, ob eine Oberflächenvergütung die Biegefestigkeit beeinflusst. Ahmad et al. stellte fest, dass keinerlei Standardisierung bezüglich der Oberflächenbearbeitung in anderen Studien vorgenommen wurde. Die Ergebnisse widersprachen anderen Studien, die eine Festigkeitssteigerung nach Polituren berichteten [38]. Ferner erzeugten höhere Drehzahlen bei der Politur eine geringere Bruchfestigkeit, obwohl die Rauheit signifikant geringer war, als bei niedrigeren Drehzahlen.

Eine ganze Reihe von Studien der Arbeitsgruppe Yin und Song [49] beschäftigt sich ausführlich mit den Auswirkungen auf die Oberfläche nach dessen Bearbeitung. Ferner kam die Arbeitsgruppe in ihrer Studie nach einer Literaturrecherche zu dem Ergebnis, dass keramische Restaurationen intraoral mit 300.000 – 400.000 U/min und einem Anpressdruck von 1 – 2 Newton bearbeitet werden [11, 44, 49-53] sollten. Sie gingen davon aus, dass jeder maschinelle Substanzabtrag mit einer Reduktion an Festigkeit, Chip-Frakturen bei Glaskeramiken und Strukturschäden im Zahnschmelz einhergeht. Ferner stellten sie fest, dass eine Simulation von in-vivo Materialabtrag nur sehr schwer auf eine in-vitro Situation übertragbar ist. Yin et al. [50] entwickelten ein Verfahren, bei welchem das Handstück zwei Freiheitsgrade besitzt und zwar die Vorschubrichtung (15 - 60 mm/min), die parallel zur Probe verläuft und die Abwärtsrichtung (10 - 50 μ m), die senkrecht dazu verläuft, in die Probe hinein. Es wurde ein grober Diamant (106 – 125 μ m Korngröße) verwendet mit 30 ml/min Wasserkühlung. Die Auswertung erfolgte mit einem piezoelektrischen Kraftmesser und Datenprozessor. Die Oberflächenrauheit wurde mit einem Perthometer und die Morphologie mittels Rasterelektronenmikroskop untersucht.

Song [42, 54, 55] untersuchte Einschleifvorgänge auf Keramiken mit Schnellläufern. Er ermittelte zwei wesentliche Parameter, die vom Behandler während des Einschleifens im Mund variiert werden können. Zum einen ist es die Vorschubgeschwindigkeit (15 -60 mm/min), zum anderen die Eindringtiefe des Schleifers in das Material (100 μ m). Diese

fest definierten Werte wurden in der klinischen Praxis von Zahnärzten ermittelt. Der Aufbau der Apparatur war identisch mit der vorangegangenen Studie. Die Ergebnisse zeigten eine sprunghafte Erhöhung der tangential aufgewendeten Kraft bei steigender Vorschubgeschwindigkeit. Zusätzlich nahmen die Defekte in der Probenoberfläche zu.

Über Polituren von Oberflächen machte sich Giampaolo [56] Gedanken. Er stellte 4 verschiedene Polituren zusammen, mit denen er Zahnschmelzproben einer Politur unterzog. Der Anpressdruck wurde lediglich als minimal beziehungsweise leicht beschrieben unter kontinuierlicher Wasserspülung. Die Zeit spielte für die Behandlungen keine Rolle. Die Politur wurde nach dem subjektiv bestmöglichen Ergebnis gestoppt und erfolgte nach visuellen Kriterien.

Kaum eine einzige Studie setzt sich mit der Effektivität von Polituren auseinander. Camacho [57] versuchte Polituren mit verschiedenen Trägermaterialien und Diamantpolierpaste zu evaluieren. Keramische Scheiben bearbeitete er mit Gummi-, Bürsten-, Filz-, Lederträgern und zwei verschiedenen Diamantpolierpasten, nachdem sie standardisiert mit Sandpapierscheiben geglättet wurden. Für die Vorbehandlung der Keramikscheiben taucht lediglich die Korngröße auf. Eine Konstanz der Bearbeitungsparameter stellte er dadurch sicher, dass nur eine Person die Polituren durchführte mit „leichtem“ Druck und 38 Polierzyklen. Über Zeit und Rotationsgeschwindigkeit wurden keine Angaben gemacht.

Martinez-Gomis [58] evaluierte vier verschiedene Poliersysteme und stellte die Effektivität dieser gegenüber. Angaben über standardisierte Parameter wurden nicht gemacht, außer dem einheitlichen Anrauen der Proben mit einem Diamanten.

Ein Ranking von Bearbeitungsinstrumenten und deren Einfluss auf die Oberflächenbeschaffenheit von Zahnschmelz stellte die Studie von Pistorius [59] zusammen. Er legte eine Reihe von Parametern in seiner Testvorrichtung fest. Eine definierte Vorschubkraft, wenn diese auch nicht beziffert wurde. Ferner einen minimalen, festgelegten Schichtabtrag, Drehzahl, Anzahl der Schleifvorgänge, Instrumentenwechsel, Menge der Spülflüssigkeit und die Bearbeitungsfläche. Der verwendete Anpressdruck wird nicht ersichtlich.

3 Problem- und Aufgabenstellung

Silikatkeramiken müssen nach dem adhäsiven Einsetzen anschließend von Kompositüberschüssen befreit und anschließend poliert werden. Ferner ist das Einschleifen der Okklusion und Artikulation für eine, im stomatognathen System perfekt funktionierende Restauration notwendig. Dies geschieht mit Diamantschleifern und Polierinstrumenten verschiedener Körnung und Abrasivität.

Dentalkeramiken besitzen neben den vielen vorteilhaften Eigenschaften eine ausgeprägte Sprödigkeit. Diese kann zu einem Versagen der Restauration durch Rissbildung und daraus folgenden Bruch führen. Imperfekte Oberflächen auf der Keramik, die in Form von Poren, Aussprengungen und Rissen auftreten, können durch rotierende Instrumente effektiv verkleinert.

Für diese Reduktion der oberflächlichen Defekte werden abgestimmte Systeme eingesetzt, die eine schrittweise Verringerung der Rauheit erreichen.

Mehrstufige Systeme (abgestufte Körnung) sind dabei erwiesenermaßen am wirkungsvollsten. Die erste Bearbeitungsstufe bilden die Präparier- und Finierdiamanten. In der zweiten wird die endgültige Hochglanzpolitur erreicht, wobei das mit unterschiedlichen Konzepten, wie Gummipoliersystemen, Polierscheiben, sowie Polierbürsten- und Filzen realisiert wird.

Die vom Behandler beurteilte Qualität der Politur kann nur visuell, taktil überprüft werden, wobei es diesbezüglich keine festgelegten Kriterien gibt [60]. Diese beiden Methoden geben keine tatsächliche Auskunft über Defekte auf der Oberfläche. Auch der Glanz der bearbeiteten Oberfläche gibt keine verlässliche Information, da die Oberflächenrauheit nicht streng mit dieser korrelieren muss [12, 61].

Die Politurergebnisse verschiedener Studien lassen sich kaum oder gar nicht miteinander vergleichen. Das Problem besteht darin, dass Polituren nicht einheitlich unter gleichen, beziehungsweise festgelegten Kriterien erfolgen. Die Politurergebnisse hängen unter anderem vom Behandler und dessen Erfahrung ab. Selbst einem erfahrenen Zahnarzt kann es schwerfallen, in der Praxis reproduzierbare Ergebnisse zu liefern. Jede (Hand-)Politur stellt somit ein Unikat dar.

Die anatomische Zugänglichkeit des zu polierenden Objektes, die verwendete Drehzahl, Drehrichtung, Verschleißzustand und Durchmesser des Instruments sind die Faktoren, die das Ergebnis beeinflussen. Die Geometrie und effektive Auflagefläche erschweren zusätzlich die Einschätzung für den richtigen, teilweise vom Hersteller empfohlenen Anpressdruck.

Es sind keine präzisen, genau definierte Polieranleitungen vermittelbar, die zu einem sicheren und vor allen Dingen reproduzierbaren Resultat führen. Auf dem Markt befindet sich eine große Anzahl von Polierinstrumenten, jedoch lassen sich über die Effektivität und Qualität der Polierleistung keine genauen Angaben machen.

Um eine objektive und vor allen Dingen vergleichbare Qualität und Effektivität der Politur zu ermitteln, wird eine Referenz benötigt. Definierte Bearbeitungsparameter sind dabei unerlässlich.

4 Material und Methode

4.1 Materialcharakterisierung

Für die Untersuchungen wurde Vita Mark II, eine leuzitverstärkte Feldspatkeramik, der Firma Vita, Zahnfabrik Bad Säckingen verwendet. Diese Feinkeramik lag als CAD/CAM Block (Vita Bloc) mit den Abmessungen 10 mm * 12 mm * 15 mm vor. Die Mikrostruktur besteht aus einer Glasmatrix und etwa 30% Feldspatkristallen [49] mit einer Größe von 1 – 7µm [62]. Folgende mechanische Eigenschaften werden für die Vita Mark II Keramik angegeben:

Vickershärte $H=6.2$ GPa;

E-Modul $E= 68$ GPa;

Bruchzähigkeit $K_{IC}= 0,9$ MPa m^{1/2}

Bruchfestigkeit $\sigma= 100$ MPa (alle Werte gemessen von Deng [63]).



Abb. 4.1: Keramischer Block für CEREC

4.2 Probenvorbereitungen

Der Metallträger der CEREC Blöcke wurde vom keramischen Block gelöst. Auf einer diamantierten Schleifscheibe (Körnung 54µm) unter ständiger Wasserkühlung erfolgte das Planschleifen und Polieren der Blöcke. Die bearbeiteten Flächen wurden gründlich mit Wasser und Druckluft abgesprüht. Für jedes Bearbeitungsinstrument wurden 3 Blöcke vorbereitet.

4.2.1 Versuchsaufbau und Arbeitsplatz für Handversuche

Die vorbereiteten Keramikblöcke wurden mit der zu bearbeitenden Fläche parallel zur Tischebene in eine Haltevorrichtung fest eingespannt. Als Bearbeitungsinstrument kam ein Schnellläufer (KaVo Dental, Biberach) für die Diamantschleifer und ein Reduzier-Winkelstück (KaVo Dental, Biberach) für die Polierer zum Einsatz. Die Drehzahl betrug 200.000 U/min für die Diamanten und 10.000 U/min für die Polierer im Rechtslauf. Die Kühlmittelzufuhr wurde auf 50 ml/min justiert.

Für jede Probe kam ein frischer Diamant zum Einsatz, auch die Polierer wurden während der gesamten Versuchsreihe nach Gebrauch gegen neue ausgetauscht.

Für ein komplettes Beschleifen beziehungsweise Polieren wurde eine Zeit von 3 ½ Minuten je Polierstufe festgelegt und nach den Erfahrungswerten der Testperson durchgeführt. Nach jedem Instrumentenwechsel erfolgte eine gründliche Reinigung mit Luft-Wasser-Spray.

4.2.2 Versuchsaufbau und Arbeitsplatz für maschinelle Versuche

Für die Versuche mit einer reproduzier- und kontrollierbaren Anpresskraft musste ein individueller Arbeitsplatz entwickelt werden. Er besteht aus folgenden Komponenten:

- Zahntechnikhandstück
- Haltevorrichtung für das Handstück auf einem schrittmotorgesteuerten Schlitten in der x-Achse sowie manueller Einstellung in der y- und z-Achse
- Aufnahmevorrichtung der Keramikprobe mit Drucksensoreinheit
- Kühlmittelkreislauf
- Schrittmotoransteuerung
- Newtonmeter

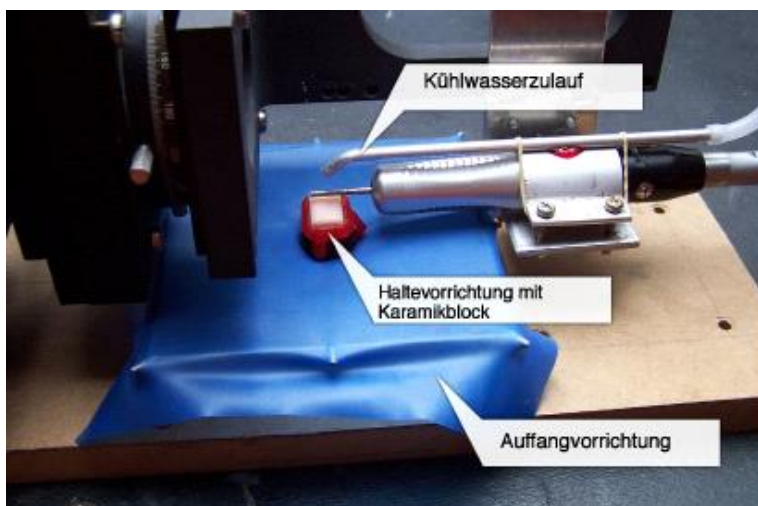


Abb. 4.2: Aufbau der Testvorrichtung

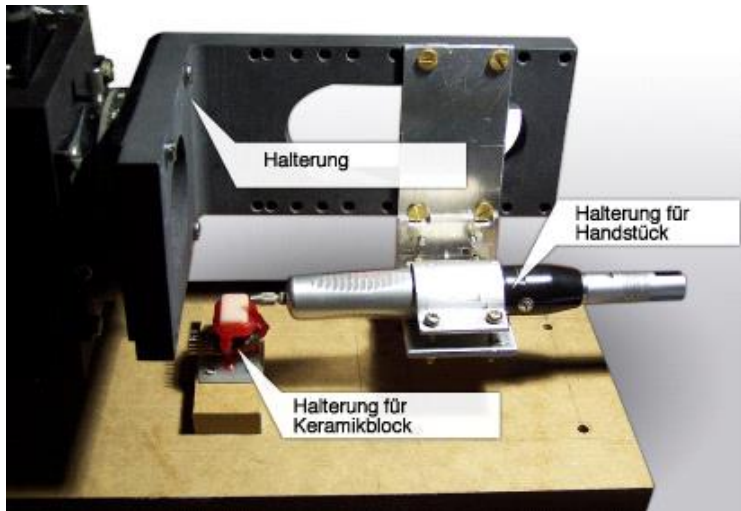


Abb. 4.3: Ansicht des Drucksensors mit Halterung

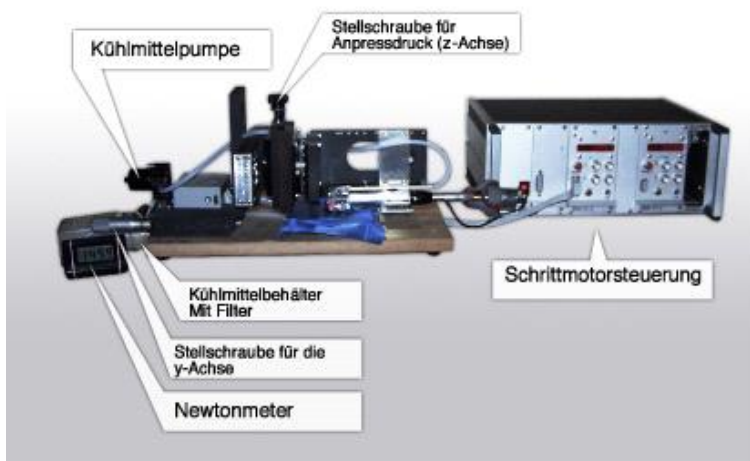


Abb. 4.4: Übersicht der kompletten Testvorrichtung

4.2.3 Einrichtung des Arbeitsplatzes

Der vorbereitete Keramikblock wurde in die Aufnahmevorrichtung eingesetzt und das Newtonmeter auf den Wert 0 kalibriert. Ein Gewicht von 50 g, 100 g beziehungsweise 200 g wurde auf den eingesetzten Keramikblock platziert und die gemessenen Werte mit dem Newtonmeter (0,5 N; 1 N; 2 N) kontrolliert. Nach Aktivierung des Technikerhandstücks mit 10.000 U/min und des Kühlmittelkreislaufes wurde per Hand die y- und z- Achse justiert und so eingestellt, dass die gesamte Arbeitsfläche des Schleifers beziehungsweise des Polierers mit der Probenoberfläche plan in Kontakt kam. Über Verstellen der z-Achse ließ sich der Anpressdruck definiert festlegen. Während der gesamten Bearbeitung wurde nach Bedarf die Einstellung korrigiert und konstant gehalten.

12 mm in der x-Achse wurde die Keramikoberfläche in ziehender und schiebender Richtung insgesamt 5 Zyklen pro Schleif-/Poliervorgang überstrichen, jede Probe komplett 10-mal vom rotierenden Instrument bearbeitet. Bei der Verwendung des Grünringdiamanten konnte nur 3 Zyklen durchgeführt werden. Der Substanzabtrag bei 1 N und 2 N war so hoch, dass eine Beschädigung der Haltevorrichtung nicht auszuschließen war.

Die Vorschubgeschwindigkeit (x-Achse) betrug 35 mm / min. Für einen Bearbeitungszyklus ergab sich bei einem zurückgelegten Weg von 2 x 12 mm eine Schleifzeit von 41 Sekunden. Das ergab für einen kompletten Schleif-/Poliervorgang 3 min und 30 s.

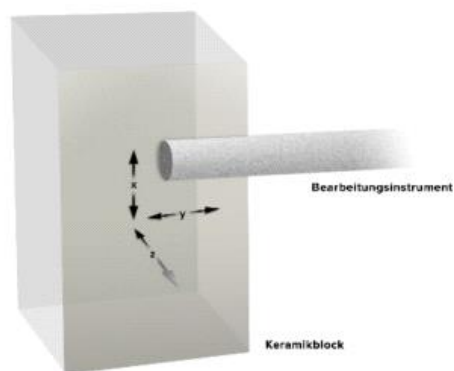


Abb. 4.5: Bewegungsrichtungen des Schleifers/Polierers

Tab. 4.1.: Bearbeitungsparameter

	Bearbeitungsparameter Testvorrichtung	Bearbeitungs- parameter Hand
Probenmaterial	Vita Mark II I12	Vita Mark II I12
Drehzahl (Diamanten) in U/min	10.000	160.000
Drehzahl (Polierer) in U/min	10.000	10.000
Kühlwassermenge (Diamanten) in ml/min	50	50
Kühlwassermenge Polierer	0	0
Anzahl der Wasserstrahle	1	3
Anpressdruck	0,5 N; 1 N; 2 N	undefiniert
Bearbeitungszeit in Minuten	03:30	03:30
Bearbeitungszyklen	5 (Grünring 3)	undefiniert
Vorschubgeschwindigkeit in mm/min	35	undefiniert

4.2.4 Bearbeitungsinstrumente

Tab. 4.2: Auflistung der Instrumente

Instrument	Firma	Typ/Bezeichnung
Diamant grob	Komet, Gebr.Brasseler, Lemgo	6.878.314.012
Diamant mittel	Komet, Gebr.Brasseler, Lemgo	878.314.012
Diamant fein	Komet, Gebr.Brasseler, Lemgo	878EF.314.012
NTI Cera Glaze I	NTI, Kahla	P333
NTI Cera Glaze II	NTI, Kahla	P3033
NTI Cera Glaze III	NTI, Kahla	P30033
OptraFine I	Ivoclar Vivadent, Eil- wangen	601990
OptraFine II	Ivoclar Vivadent, Eil- wangen	601995
OptraFine III	Ivoclar Vivadent, Eil- wangen	602288+602289
Sof-Lex grob	3M Espe, Neuss	70-2004-8105-2
Sof-Lex mittel	3M Espe, Neuss	70-2004-8096-3
Sof-Lex fein	3M Espe, Neuss	70-2004-8106-0
Sof-Lex super- fein	3M Espe, Neuss	70-2004-8097-1
Occlubrush	Hawe Neos, Bioggio	2503
Diamantpaste	Ivoclar Vivadent, Eil- wangen	516-0001

Im Folgenden wird auf die Einzelheiten der Bearbeitungsinstrumente und Weise eingegangen (Tab. 4.2).

Für den Grünringdiamanten gab es wie schon erwähnt 3 in der Testvorrichtung eine Begrenzung auf 3 Schleifzyklen.

Die Keramikpolierer der Ceraglaze konnten für beide Bearbeitungsmethoden uneingeschränkt verwendet werden.

Die Polyamidbürste in der Bearbeitungsstufe OptraFine 3 deformierte sich bei 2 N Anpressdruck stark. Die Messwerte wurden trotzdem verwendet, da auch bei der Handbearbeitung derartige Deformationen auftreten können.

Als nicht durchführbar gestalteten sich die Untersuchungen an den Sof-Lex Scheiben, unabhängig von deren Durchmesser und Typ (Papier- oder Kunststoffträger). Die anfängliche Steifigkeit ließ mit fortschreitender Zeit extrem nach, teilweise bis zur Zerstörung des Trägers beziehungsweise zum Ablösen der Kunststoff/Papierscheibe von der Metallöse. Ein konstanter Anpressdruck war über eine sinnvolle Zeit nicht erreichbar. Die Ergebnisse dieser Polierer werden deshalb aufgeführt, wegen der nicht möglichen Evaluierung jedoch nicht ausgewertet bzw. verglichen.

Tab. 4.3: Gegenüberstellung der Bearbeitungsschritte

Bearbeitungsinstrument	Testvorrichtung	Handbearbeitung
Diamant Grün-Ring	ja (mit Einschränkung)	ja
Diamant Rot-Ring	ja	ja
Diamant Gelb-Ring	Ja	ja
NTI Cera Glaze I	Ja	ja
NTI Cera Glaze II	Ja	ja
NTI Cera Glaze III	Ja	ja
OptraFine I	Ja	ja
OptraFine II	Ja	ja
OptraFine III	ja (mit Einschränkung)	ja
Sof-Lex grob	nicht möglich	ja
Sof-Lex mittel	nicht möglich	ja
Sof-Lex fein	nicht möglich	ja
Sof-Lex superfein	nicht möglich	ja
Sof-Lex + Diamantpolierpaste	nicht möglich	ja
Sof-Lex + Occlubrush	nicht möglich	ja

4.2.5 Aufbau und Kalibrierung des Drucksensors

Für diese Untersuchung wurde ein Drucksensor (MPX5999D Freescale Semiconductor) modifiziert. Es handelt sich um einen temperaturkompensierten, kalibrierten Sensor in Piezotechnik, der relativen (Luft-)Druck misst. Eine Seite des Sensors erhielt eine her-

metisch abgedichtete, kompressible Silikonkammer, die eine flächige Auflage für den vorbereiteten Keramikblock besitzt. Der Referenzdruck für die Messungen stellte den atmosphärischen Luftdruck dar. Die Messwerte übermittelte der Drucksensor an eine Auswerteeinheit, dem Newtonmeter. Der eingesetzte Keramikblock wurde durch die Halterung gegen Verkanten und Wegkippen gesichert.

Der Drucksensor wurde vor seiner Verwendung auf seine Sensitivität und Linearität geprüft. Hierfür simulierte eine Prüfmaschine (Zwick GmbH, Ulm) einen Druckverlauf von 0 N bis 3 N. Die Messwerte sind in Tabelle 4.3 aufgeführt. Eine ausreichende Reproduzierbarkeit, Linearität und Sensitivität für die Bereiche 0,5 N, 1 N und 2 N konnte sichergestellt werden.

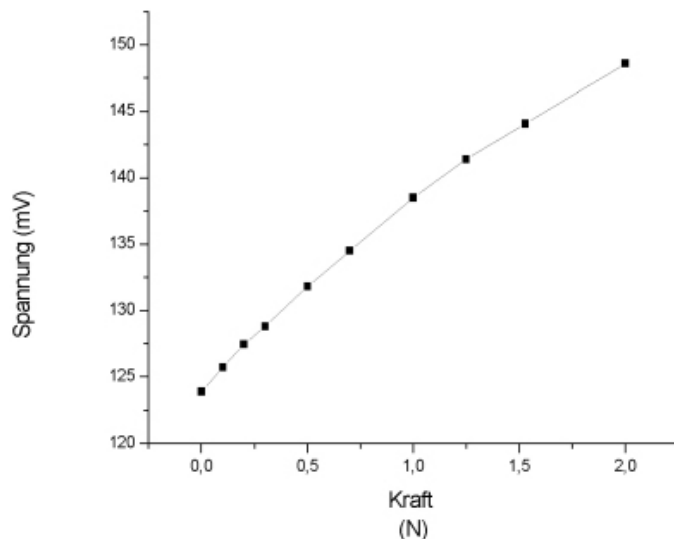


Abb. 4.6: Linearitätskurve des Drucksensors

Tab. 4.3: Messwerte Drucksensor

Kraft (N)	Spannung (mV)	Spannung (mV)	Spannung (mV)	Spannung (mV)
0	124	123,9	123,9	123,8
0,1	125,9	125,7	125,8	125,4
0,2	127,4	127,4	127,5	127,5
0,3	128,9	128,7	129	128,6
0,5	131,8	131,6	132	131,8
0,7	134,7	134,2	134,6	134,5
1	138,9	138,2	138,5	138,4
1,25	141,9	141,2	141,3	141,2
1,53	144,3	143,9	144,1	144
2	149,2	148,5	148,4	148,3

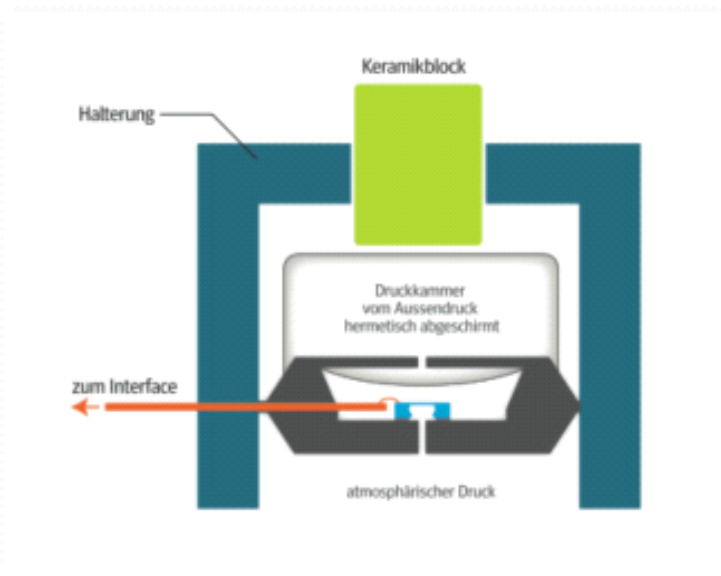


Abb. 4.7: Schemazeichnung des Drucksensors

4.3 Versuchsablaufschemata

- Planschleifen der Keramikproben auf einer diamantierten Scheibe
- Rauheitsmessung der plangeschliffenen Flächen
- Bearbeitung der Keramikoberflächen mit den gewählten Instrumenten per Hand und Maschine
- Rauheitsmessung der bearbeiteten Oberflächen
- Auswertung der Ergebnisse
- REM Aufnahmen der ursprünglichen und bearbeiteten Flächen je System

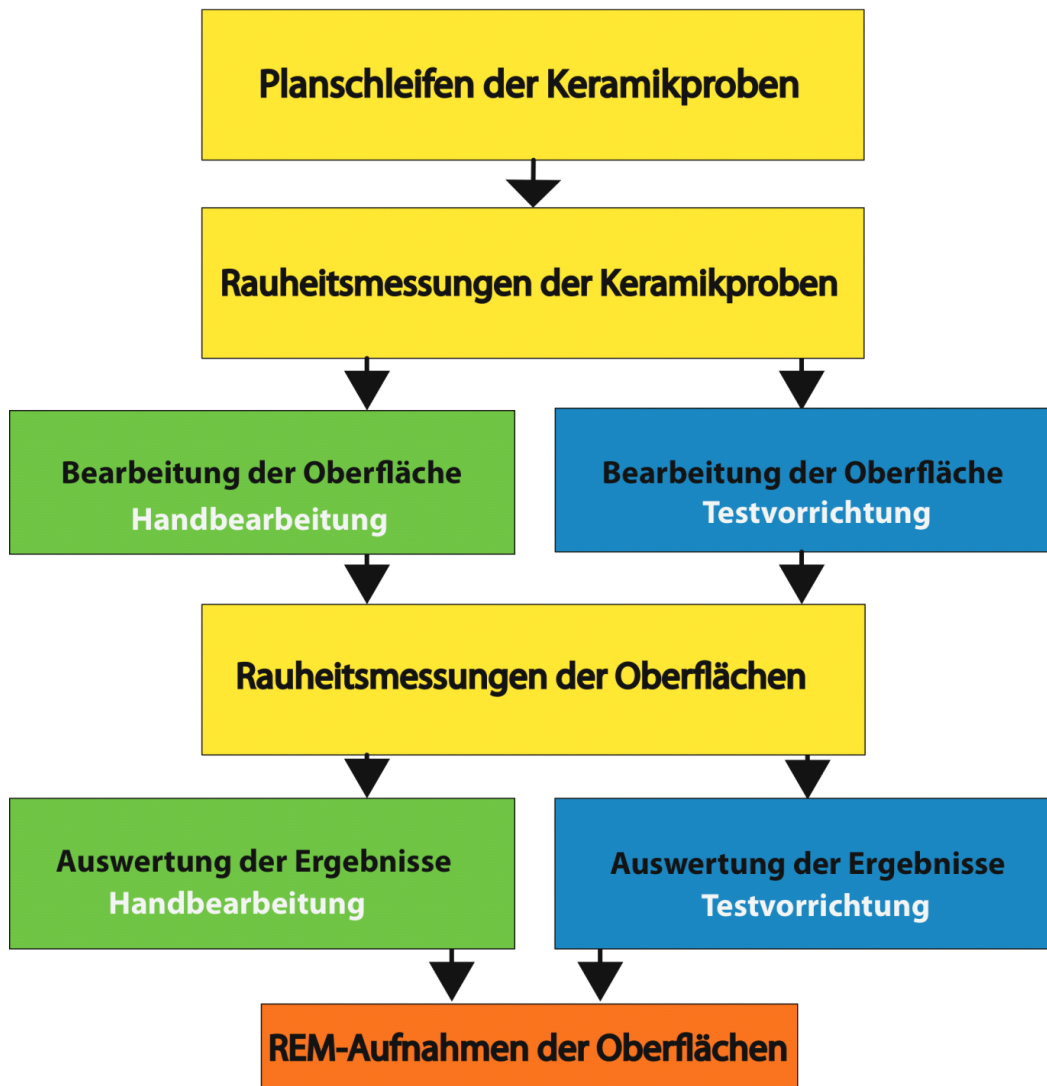


Abb. 4.8: Flussdiagramm der Vorgehensweise

4.4 Rauheitsmessungen mit dem Perthometer

Die Apparatur bestand aus einem Rauheitsmessgerät (Mahr, Göttingen), welches die Oberfläche mechanisch mit einer Nadel mit dem Durchmesser von $10\mu\text{m}$ abtastet. Die Messstrecke betrug $5,6\text{ mm}$ und es wurden 3 Längs- und 3 Quermessungen pro bearbeitete Keramikprobe durchgeführt. Die Messungen erfolgten für die Rauheitsparameter R_{max} und R_z .

R_{max} berechnet sich aus den jeweiligen Rauheitsmaxima auf der festgelegten Messstrecke.

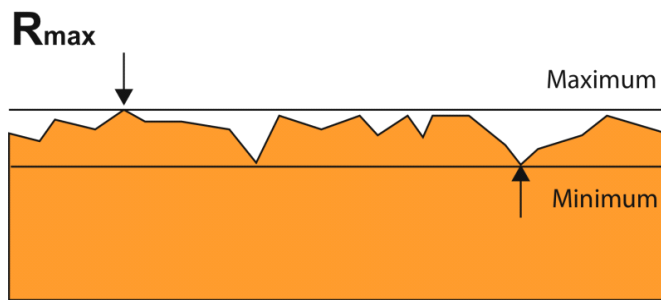


Abb. 4.9: Darstellung der Bestimmung von R_{max}

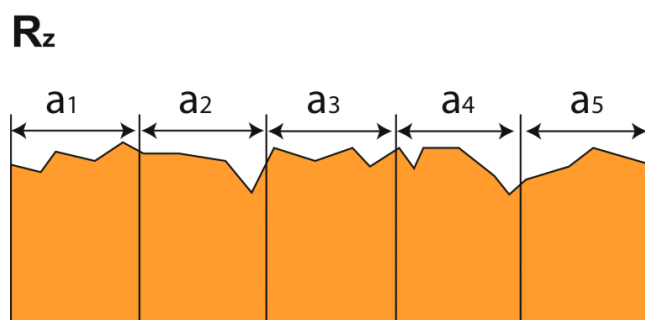


Abb. 4.10: Darstellung der Bestimmung von R_z

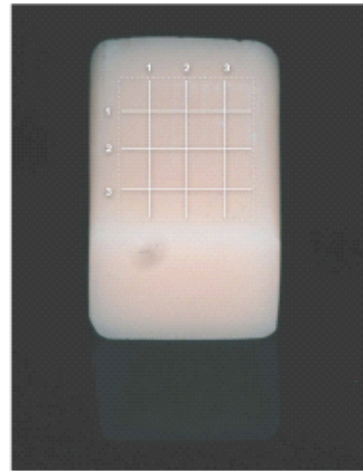


Abb. 4.11: Messschema längs/quer

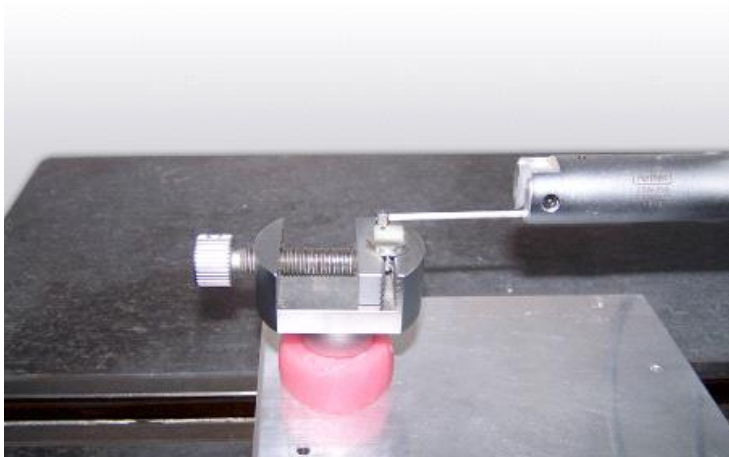


Abb. 4.12: Rauheitsmessungen mit dem Perthometer (Profilometer)

4.5 Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung erfolgte mit Hilfe des Programms Origin Version 6.0.

Aus den Einzelmessdaten wurden Mittelwert und Standardabweichung berechnet. Für die Prüfung der Signifikanz im Vergleich verschiedener Testreihen wurde f- und T- Test nach Student mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von $p=0,05$ genutzt.

5 Ergebnisse

Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt in zwei Teilen. Im ersten Teil werden die Ergebnisse der Handversuche und im zweite Teil die mit der Testvorrichtung gezeigt. Die Poliersysteme sind jeweils in Untersysteme beziehungsweise Zwischenstufen aufgeteilt. Für jedes System und Untersystem werden die Messparameter R_{max} und R_z betrachtet, sowie einzeln nochmals in Längs- und Quermessungen unterschieden. Pro Messzyklus wurden drei Messungen durchgeführt, aus denen der Mittelwert berechnet und für die Ergebnisse verwendet wurde. Damit sind insgesamt pro Messzyklus 9 Werte ermittelt worden, aus denen wiederum der Mittelwert gebildet wurde.

Handversuche

Diamantschleifer	Optrafine	SofLex-Scheiben	SofLex-Scheiben+Diamantpolierpaste	CeraGlaze
5.1.1	5.1.12	5.1.4	5.1.8	5.1.9
5.1.2	5.1.13	5.1.5		5.1.10
5.1.3	5.1.14	5.1.6		5.1.11
		5.1.7		

Es wurden 5 verschiedene Systeme untersucht, die sich in 14 verschiedene Schleifbeziehungsweise Polierstufen aufteilen.

Testvorrichtung

Diamantschleifer	Optrafine	CeraGlaze
5.2.1	5.2.7	5.2.4
5.2.2	5.2.8	5.2.5
5.2.3	5.2.9	5.2.6

In der Testvorrichtung wurden drei verschiedene Systeme untersucht, die sich in insgesamt 9 Stufen aufteilen.

5.1 Ergebnisse der Handversuche

5.1.1 Ergebnisse Diamantschleifer grün (100 μm)

Der Grünringdiamant verursachte eine durchschnittliche maximale Rauheit von 25,01 μm und 18,68 μm Rz in der Längsmessung. Die Quermessungen ergaben eine durchschnittliche maximale Rauheit von 30,04 μm und 20,7 μm Rz.

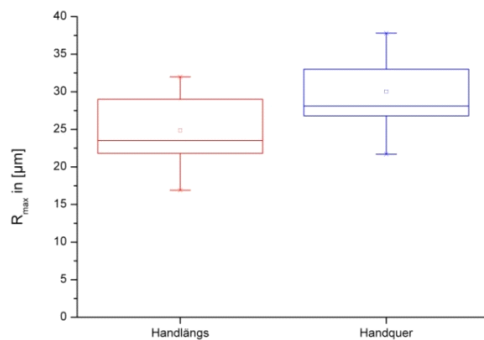


Abb. 5.1: Diagramm Diamantschleifer grün Rmax

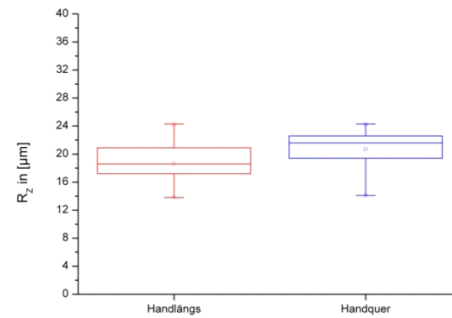


Abb. 5.2: Diagramm Diamantschleifer grün Rz

5.1.2 Ergebnisse Diamantfinierer rot 30 μm

Die Bearbeitung mit dem Rotringdiamant ergab eine durchschnittliche maximale Rauheit von 14,07 μm und 11,88 μm Rz in der Längsmessung. Die Quermessungen ergaben eine durchschnittliche maximale Rauheit von 10,1 μm und 7,21 μm Rz.

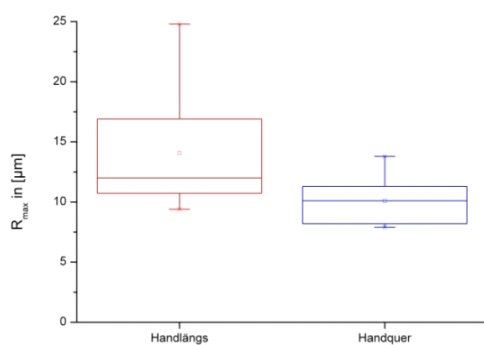


Abb. 5.3: Diagramm Diamantschleifer rot Rmax

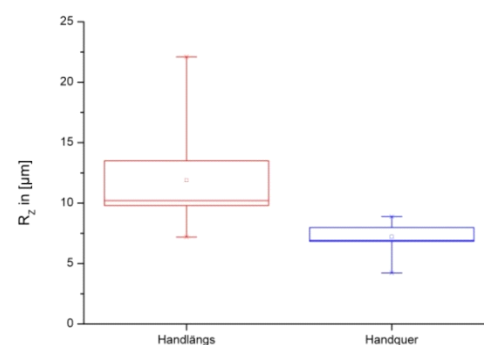


Abb. 5.4: Diagramm Diamantschleifer rot Rz

5.1.3 Ergebnisse Diamantfinierer gelb 15 μm

Der Gelbringdiamant erzeugte eine durchschnittliche maximale Rauheit von 9,03 μm und ebenfalls 7,99 μm Rz in der Längsmessung. Die Quermessungen ergaben eine durchschnittliche maximale Rauheit von 3,91 μm und 2,94 Rz.

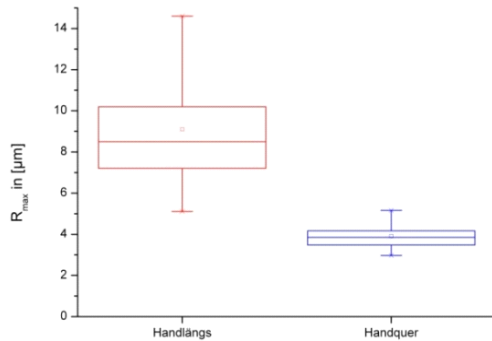


Abb. 5.5: Diagramm Diamantschleifer gelb Rmax

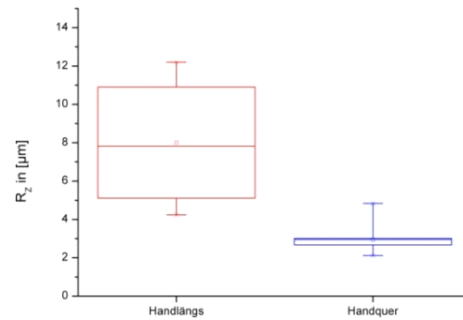


Abb. 5.6: Diagramm Diamantschleifer gelb Rz

Tab. 5.1: Messwerte Diamant mit Standardabweichung

Schleifer/Polierer	Rmax längs	Rmax quer	Rz längs	Rz quer
Diamant				
grün	24,88 +/- 5,4	30,04 +/-5,4	18,68 +/- 3,32	20,7 +/-3,01
rot	14,07 +/-4,93	10,1 +/-1,97	11,88 +/- 4,45	7,21 +/-1,39
gelb	9,09 +/-3,02	3,01 +/-0,71	8 +/-3,02	2,94 +/-0,79

5.1.4 Ergebnisse Sof-Lex grob

Die Sof-Lex Scheibe grob erzeugte eine durchschnittliche maximale Rauheit von 4,29 μm und 2,02 μm Rz in der Längsmessung. Die Quermessungen ergaben eine durchschnittliche maximale Rauheit von 4,38 μm und 2,02 μm Rz.

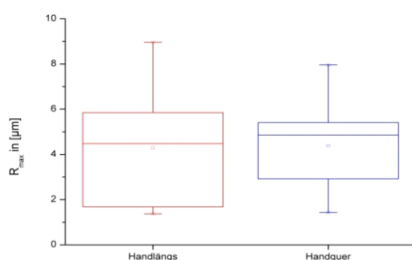


Abb. 5.7: Diagramm SofLex grob Rmax

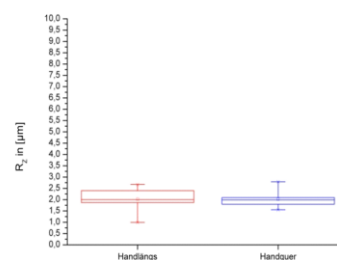


Abb. 5.8: Diagramm SofLex grob Rz

5.1.5 Ergebnisse Sof-Lex mittel

Die Sof-Lex Scheibe mittel ergab eine durchschnittliche maximale Rauheit von $3,09 \mu\text{m}$ und $1,98 \mu\text{m}$ Rz in der Längsmessung. Bei den Quermessungen wurde eine durchschnittliche maximale Rauheit von $2,8 \mu\text{m}$ und $1,98 \mu\text{m}$ Rz. gemessen.

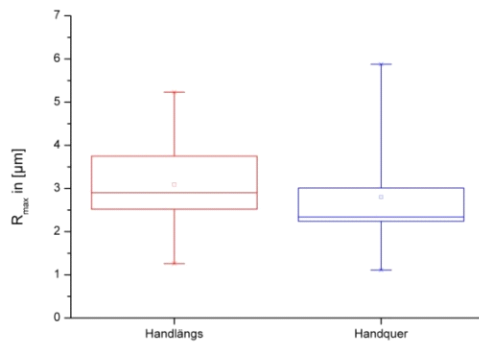


Abb. 5.9: Diagramm SofLex mittel Rmax

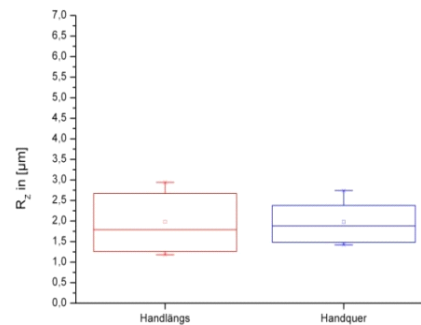


Abb. 5.10: Diagramm SofLex mittel Rz

5.1.6 Ergebnisse Sof-Lex fein

Die Sof-Lex Scheibe fein ergab eine durchschnittliche maximale Rauheit von $1,9 \mu\text{m}$ und $1,31 \mu\text{m}$ Rz in der Längsmessung. Die Quermessungen ergaben eine durchschnittliche maximale Rauheit von $2,01 \mu\text{m}$ und $1,27 \mu\text{m}$ Rz.

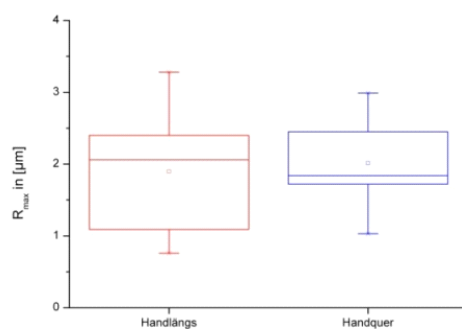


Abb. 5.11: Diagramm SofLex fein Rmax

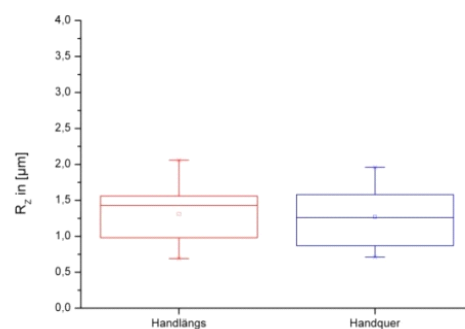


Abb. 5.12: Diagramm SofLex fein Rz

5.1.7 Ergebnisse Sof-Lex superfein

Die Sof-Lex Scheibe superfein ergab eine durchschnittliche maximale Rauheit von $1,01 \mu\text{m}$ und $0,87 \mu\text{m}$ Rz in der Längsmessung. Die Quermessungen ergaben eine durchschnittliche maximale Rauheit von $1,08 \mu\text{m}$ und $0,91 \mu\text{m}$ Rz.

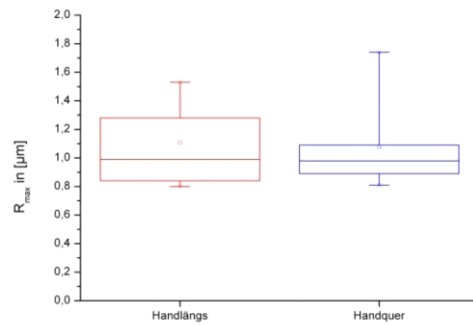


Abb. 5.13: Diagramm SofLex superfine Rmax

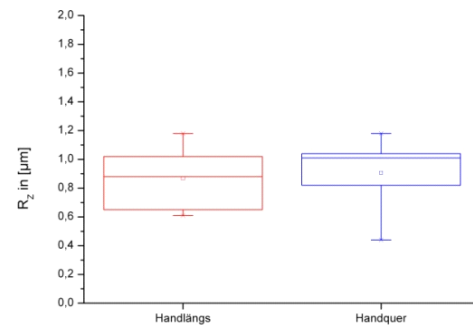


Abb. 5.14: Diagramm SofLex superfine Rz

5.1.8 Ergebnisse Diamantpolierpaste (DP) nach Sof-Lex

Die Diamantpolierpaste ergab eine durchschnittliche maximale Rauheit von $0,93 \mu\text{m}$ und $0,7 \mu\text{m}$ Rz in der Längsmessung. Die Quermessungen ergaben eine durchschnittliche maximale Rauheit von $1,01 \mu\text{m}$ und $0,68 \mu\text{m}$ Rz.

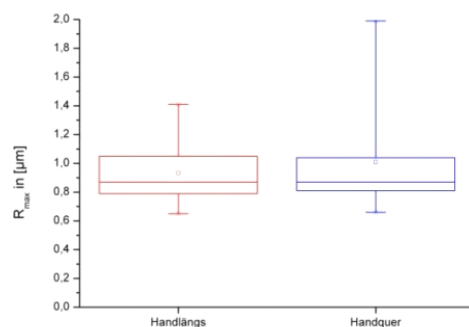


Abb. 5.15: Diagramm Diamantpolierpaste Rmax

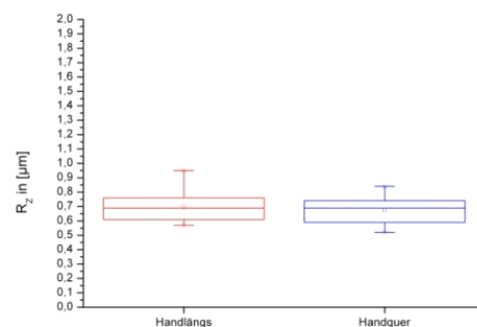


Abb. 5.16: Diagramm Diamantpolierpaste Rz

Tab. 5.2: Messwerte SofLex Scheiben mit Standardabweichung

Schleifer/Polierer	Rmax längs	Rmax quer	Rz längs	Rz quer
Sof-Lex				
Grob	4,29 +/-2,56	4,38 +/-1,99	2,02 +/-0,49	2,02 +/-0,34
Mittel	3,09 +/-1,11	2,8 +/-1,32	1,98 +/-0,7	1,98 +/-0,53
Fein	1,9 +/-0,87	2,01 +/-0,6	1,31 +/-0,44	1,27 +/-0,45
Superfein	1,11 +/-0,29	1,08 +/-0,31	0,87 +/-0,2	0,91 +/-0,23
Superfein+Diam.pol.paste	0,93 +/-0,24	1,01 +/-0,4	0,7 +/-0,13	0,68 +/-0,11

5.1.9 Ergebnisse Keramikpolierer Ceraglaze grob(grün)

Der Keramikpolierer Ceraglaze grob ergab eine durchschnittliche maximale Rauheit von 8,73 μm und 6,7 μm Rz in der Längsmessung. Die Quermessungen ergaben eine durchschnittliche maximale Rauheit von 7,22 μm und 5,81 μm Rz.

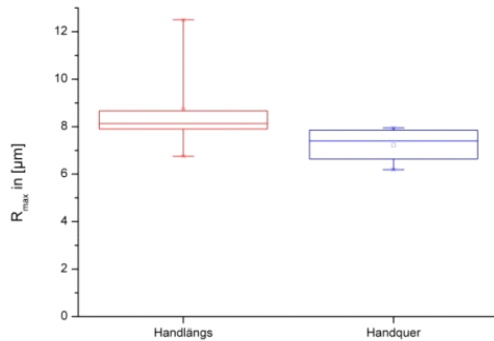


Abb. 5.17: Diagramm Ceraglaze grob Rmax

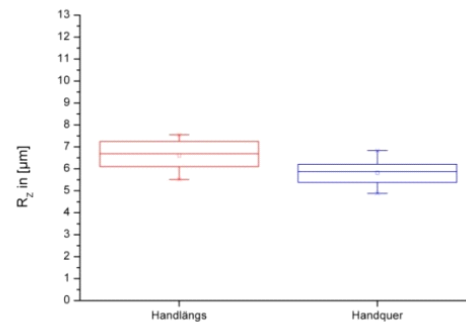


Abb. 5.18: Diagramm Ceraglaze grob Rz

5.1.10 Ergebnisse Keramikpolierer Ceraglaze mittel (blau)

Der Keramikpolierer mittel ergab eine durchschnittliche maximale Rauheit von 5,06 μm und 4,21 μm Rz in der Längsmessung. Die Quermessungen ergaben eine durchschnittliche maximale Rauheit von 4,24 μm und 3,25 μm Rz.

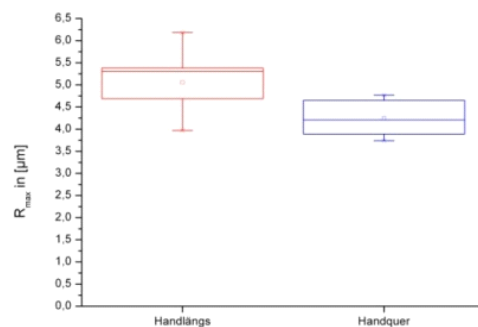


Abb. 5.19: Diagramm Ceraglaze mittel Rmax

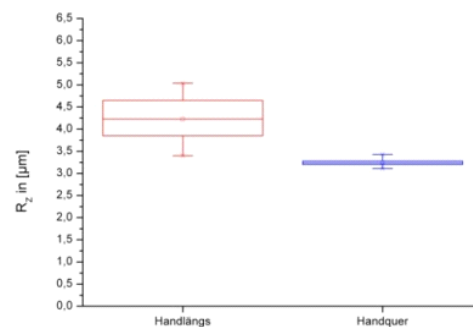


Abb. 5.20: Diagramm Ceraglaze mittel Rz

5.1.11 Ergebnisse Keramikpolierer Ceraglaze fein(gelb)

Der Keramikpolierer fein ergab eine durchschnittliche maximale Rauheit von 3,05 μm und 2,39 μm Rz in der Längsmessung. Die Quermessungen ergaben eine durchschnittliche maximale Rauheit von 2,01 μm und 1,56 μm Rz.

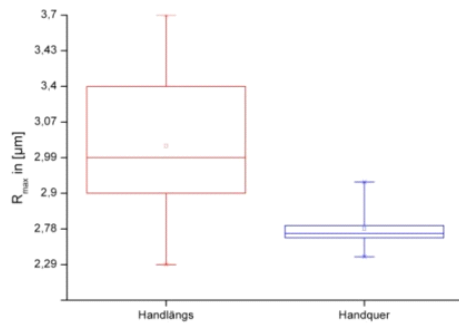


Abb. 5.21: Diagramm Ceraglaze fein Rmax

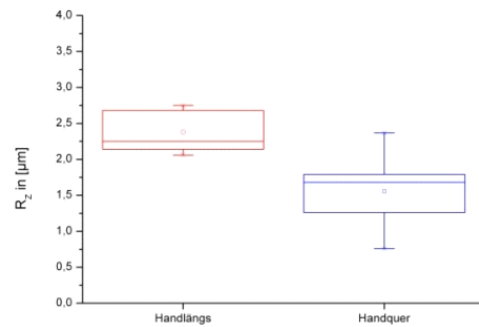


Abb. 5.22: Diagramm Ceraglaze fein Rz

Tab. 5.3: Messwerte CeraGlaze mit Standardabweichung

Schleifer/Polierer	Rmax längs	Rmax quer	Rz längs	Rz quer
Ceraglaze				
grob	8,73 +/-1,71	6,01 +/-0,71	7,22 +/-0,77	5,81 +/-0,6
mittel	5,06 +/-0,72	4,23 +/-0,4	4,24 +/-0,55	3,25 +/-0,09
fein	3,05 +/-0,42	2,38 +/-0,4	2,81 +/-0,23	2,71 +/-0,09

5.1.12 Ergebnisse Keramikpolierer OptraFine 1(hellblau)

Der Keramikpolierer OptraFine 1 ergab eine durchschnittliche maximale Rauheit von 4,16 μm und 3,48 μm Rz in der Längsmessung. Die Quermessungen ergaben eine durchschnittliche maximale Rauheit von 3,28 μm und 2,62 μm Rz.

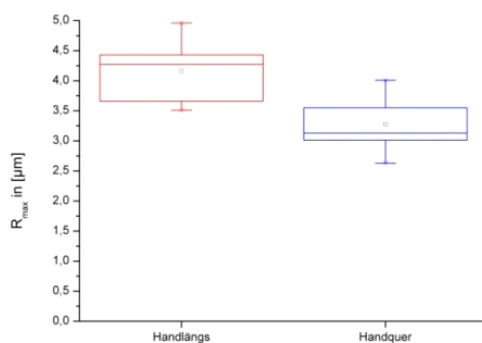


Abb. 5.23: Diagramm OptraFine 1 Rmax

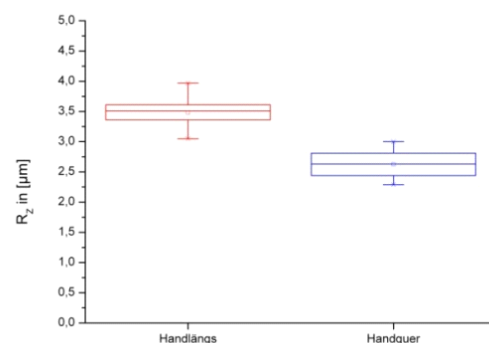


Abb. 5.24: Diagramm OptraFine 1 Rz

5.1.13 Ergebnisse Keramikpolierer OptraFine 2 (dunkelblau)

Der Keramikpolierer OptraFine 2 ergab eine durchschnittliche maximale Rauheit von 3,3 μm und 2,68 μm Rz in der Längsmessung. Die Quermessungen ergaben eine durchschnittliche maximale Rauheit von 2,42 μm und 1,96 μm Rz.

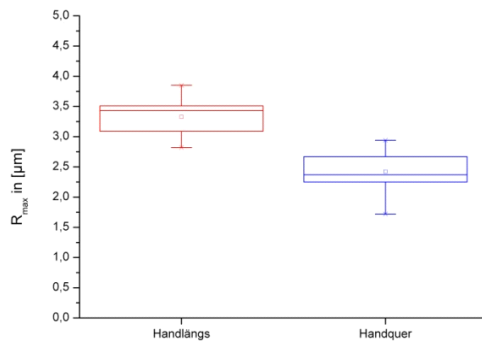


Abb. 5.25: Diagramm OptraFine 2 Rmax

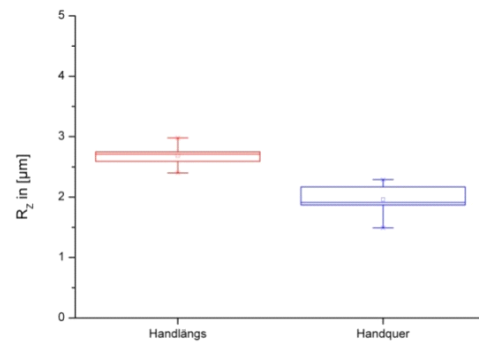


Abb. 5.26: Diagramm OptraFine 2 Rz

5.1.14 Ergebnisse Polierbürste OptraFine 3 (Nylonbürste mit Diamantpaste)

Die Politur mit OptraFine 3 ergab eine durchschnittliche maximale Rauheit von 2,46 μm und 1,96 μm Rz in der Längsmessung. Die Quermessungen ergaben eine durchschnittliche maximale Rauheit von 1,8 μm und 1,29 μm Rz.

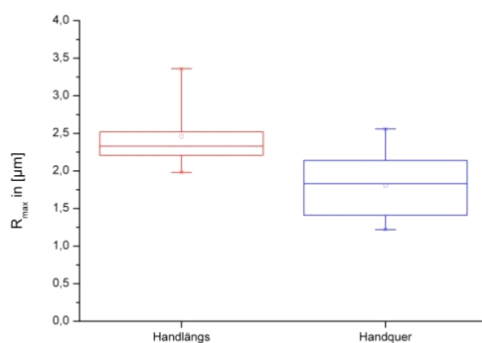


Abb. 5.27: Diagramm Optrafine 3 Rmax

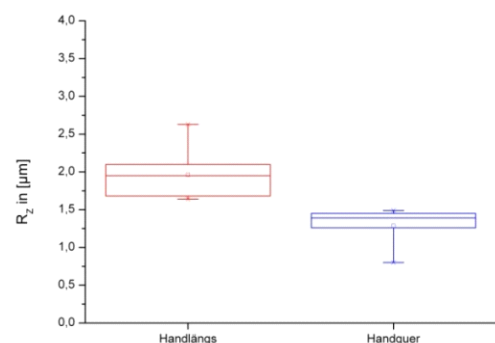


Abb. 5.28: Diagramm Optrafine 3 Rz

Tab. 5.4: Messwerte Optrafine mit Standardabweichung

Schleifer/Polierer	Rmax längs	Rmax quer	Rz längs	Rz quer
Optrafine				
1 hellblau	4,16 +/-0,49	3,28 +/-0,46	3,48 +/-0,27	2,63 +/-0,24
2 dunkelblau	3,33 +/-0,33	2,42 +/-0,38	2,68 +/-0,18	1,96 +/-0,26
Nylonbürste+Paste	2,46 +/-0,43	1,81 +/-0,45	1,96 +/-0,32	1,29 +/-0,25

5.2 Ergebnisse mit der Testvorrichtung

5.2.1 Ergebnisse Diamant Grünring

Der Grünringdiamant ergab bei 0,5 N definiertem Anpressdruck eine durchschnittliche maximale Rauheit von 27,43 μm und 23,28 μm Rz, bei 1 N wurde ein Wert von Rmax 36,74 μm und Rz von 26,77 μm gemessen. Unter 2 N Anpressdruck wurden für Rmax 33,46 μm und Rz 22,32 μm ermittelt. Die Quermessungen betreffend, ergab sich bei 0,5 N eine durchschnittliche maximale Rauheit von 36,42 μm und 22,18 μm für Rz, bei 1 N ein Rmax von 37,21 μm und 26,77 μm für Rz. Die Ergebnisse bei 2 N Anpressdruck lieferten die Werte Rmax 30,34 μm und 22,32 μm für Rz.

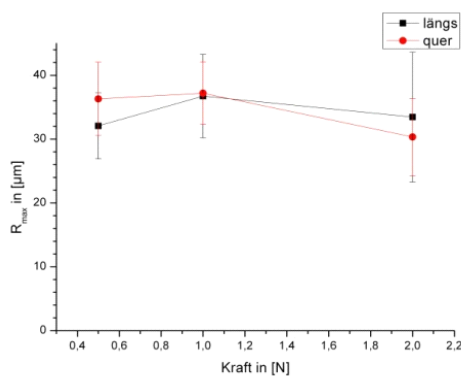


Abb. 5.29: Diagramm Diamant grün Rmax

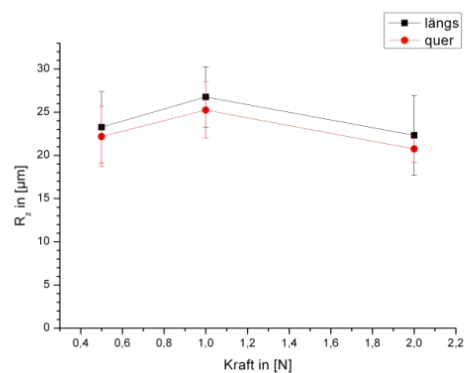


Abb. 5.30: Diagramm Diamant grün Rz

Tab. 5.5: Messwerte Diamant grün definierter Anpressdruck mit Standardabweichung

Schleifer/Polierer	Rmax längs	Rz längs	Rmax quer	Rz quer
Diamant grün 0,5 N	32,09 +/-5,2	18,68 +/-4,14	36,31 +/-5,74	22,18 +/-3,51
Diamant grün 1 N	36,74 +/-6,53	26,77 +/-3,49	37,21 +/-4,9	25,24 +/-3,25
Diamant grün 2 N	33,5 +/-10,18	22,32 +/-4,64	30,34 +/-6,04	20,74 +/-1,5

5.2.2 Ergebnisse Diamant Rotring

Der Rotringdiamant ergab bei 0,5 N definiertem Anpressdruck eine durchschnittliche maximale Rauheit von 11,77 μm und 25,62 μm Rz, bei 1 N wurde ein Wert von Rmax 16,92 μm und Rz von 29,96 μm gemessen. Unter 2 N Anpressdruck wurden für Rmax 11,74 μm und Rz 25,62 μm ermittelt. Die Quermessungen betreffend, ergab sich bei 0,5 N eine durchschnittliche maximale Rauheit von 36,91 μm und 20,79 μm für Rz, bei 1 N ein Rmax von 47,18 μm und 29,96 μm für Rz. Die Ergebnisse bei 2 N Anpressdruck lieferten die Werte Rmax 39,44 μm und 25,62 μm für Rz.

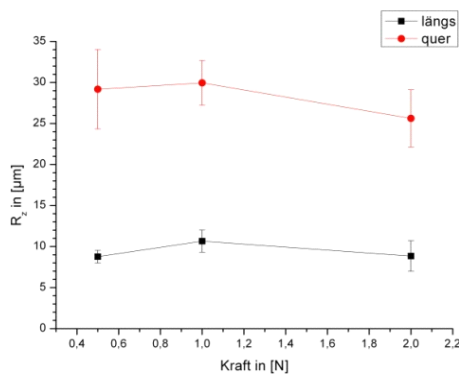


Abb. 5.31: Diagramm Diamant rot Rmax

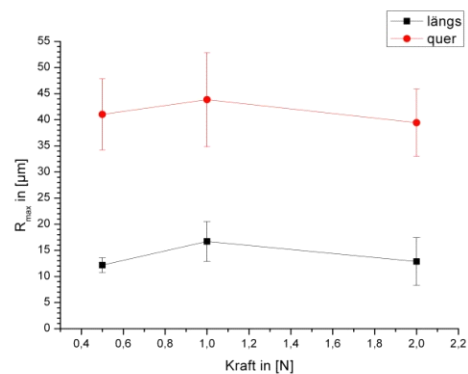


Abb. 5.32: Diagramm Diamant rot Rz

Tab. 5.6: Messwerte Diamant rot definierter Anpressdruck mit Standardabweichung

Rmax längs	Schleifer/Polierer	Rz längs	Rmax quer	Rz quer
12,17 +/-1,41	Diamant rot 0,5 N	8,78 +/-0,77	41,03 +/-6,81	29,18 +/-4,84
16,7 +/-3,8	Diamant rot 1 N	10,66 +/-1,35	43,84 +/-9,01	29,96 +/-2,72
12,85 +/-4,57	Diamant rot 2 N	8,85 +/-1,87	39,44 +/-6,44	25,62 +/-3,48

5.2.3 Ergebnisse Diamant Gelbring

Der Gelbringdiamant ergab bei 0,5 N definiertem Anpressdruck eine durchschnittliche maximale Rauheit von 3,02 μm und 2,28 μm Rz, bei 1 N wurde ein Wert von Rmax 2,78 μm und Rz von 1,97 μm gemessen. Unter 2 N Anpressdruck wurden für Rmax 2,88 μm und Rz 2,29 μm ermittelt. Die Quermessungen betreffend, ergab sich bei 0,5 N eine durchschnittliche maximale Rauheit von 27,42 μm und 22,5 μm für Rz, bei 1 N ein

Rmax von 37,58 μm und 23,73 μm für Rz. Die Ergebnisse bei 2 N Anpressdruck lieferten die Werte Rmax 52,61 μm und 32,38 μm für Rz.

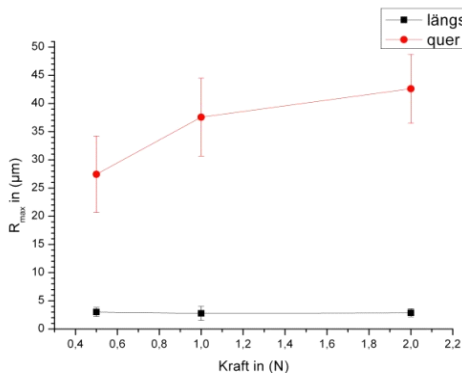


Abb. 5.33: Diagramm Diamant gelb Rmax

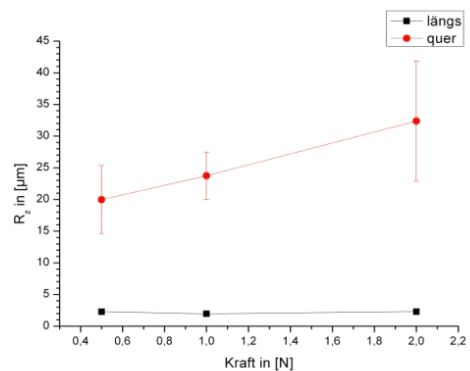


Abb. 5.34: Diagramm Diamant gelb Rz

Tab. 5.7: Messwerte Diamant gelb definierter Anpressdruck mit Standardabweichung

Schleifer/Polierer	Rmax längs	Rz längs	Rmax quer	Rz quer
Diamant gelb 0,5 N	3,02 +/-0,81	2,28 +/-0,2	27,43 +/-6,8	19,98 +/-5,4
Diamant gelb 1 N	2,78 +/-1,22	1,97 +/-0,42	37,58 +/-6,91	23,73 +/-3,76
Diamant gelb 2 N	2,88 +/-0,71	2,29 +/-0,44	42,61 +/-6,1	32,38 +/-9,5

5.2.4 Ergebnisse Keramikpolierer Ceraglaze grob (grün)

Der Keramikpolierer Ceraglaze grob ergab bei 0,5 N definiertem Anpressdruck eine durchschnittliche maximale Rauheit von 4,11 μm und 3,28 μm Rz, bei 1 N wurde ein Wert von Rmax 4,13 μm und Rz von 3,37 μm gemessen. Unter 2 N Anpressdruck wurden für Rmax 3,87 μm und Rz von 3,29 μm ermittelt. Die Quermessungen betreffend, ergab sich bei 0,5 N eine durchschnittliche maximale Rauheit von 8,81 μm und 6,6 μm für Rz, bei 1 N ein Rmax von 7,11 μm und 5,55 μm für Rz. Die Ergebnisse bei 2 N Anpressdruck lieferten die Werte Rmax 8,59 μm und 5,82 μm für Rz.

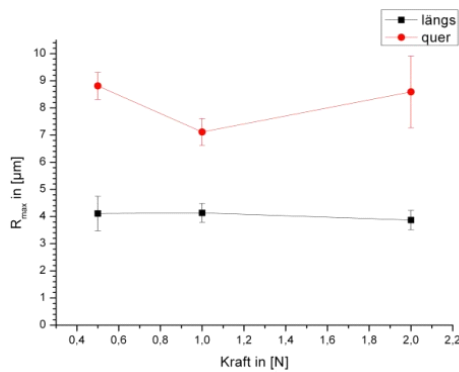


Abb. 5.35: Diagramm Ceraglaze grob Rmax

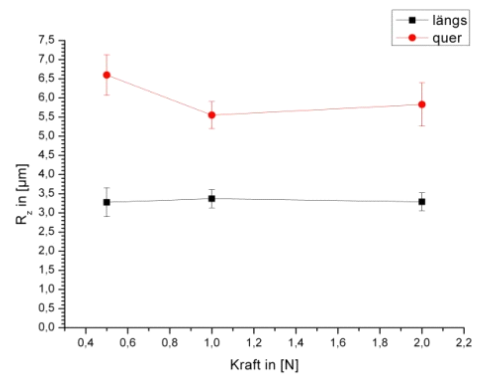


Abb. 5.36: Diagramm Ceraglaze grob Rz

Tab 5.8: Messwerte CeraGlaze grob def. Anpressdruck mit Standardabweichung

Schleifer/Polierer	Rmax längs	Rz längs	Rmax quer	Rz quer
Ceraglaze grob 0,5 N	4,11 +/-0,63	3,28 +/-0,38	8,81 +/-0,5	6,6 +/-0,53
Ceraglaze grob 1 N	4,14 +/-0,34	3,37 +/-0,23	7,11 +/-0,49	5,55 +/-0,35
Ceraglaze grob 2 N	3,87 +/-0,36	3,29 +/-0,24	8,59 +/-1,32	5,83 +/-0,57

5.2.5 Ergebnisse Keramikpolierer Ceraglaze mittel (blau)

Der Keramikpolierer Ceraglaze mittel ergab bei 0,5 N definiertem Anpressdruck eine durchschnittliche maximale Rauheit von 2,66 μm und 2,21 μm R_z , bei 1 N wurde ein Wert von R_{max} 2,8 μm und R_z von 2,37 μm gemessen. Unter 2 N Anpressdruck wurden für R_{max} 2,94 μm und R_z 2,53 μm ermittelt. Die Quermessungen betreffend, ergab sich bei 0,5 N eine durchschnittliche maximale Rauheit von 11,8 μm und 6,31 μm für R_z , bei 1 N ein R_{max} von 5,07 μm und 4,22 μm für R_z . Die Ergebnisse bei 2 N Anpressdruck lieferten die Werte R_{max} 5,34 μm und 3,83 μm für R_z .

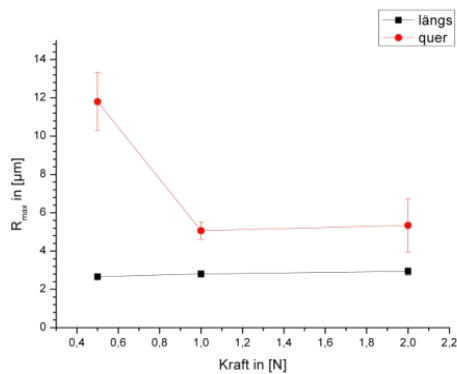


Abb. 5.37: Diagramm Ceraglaze mittel Rmax

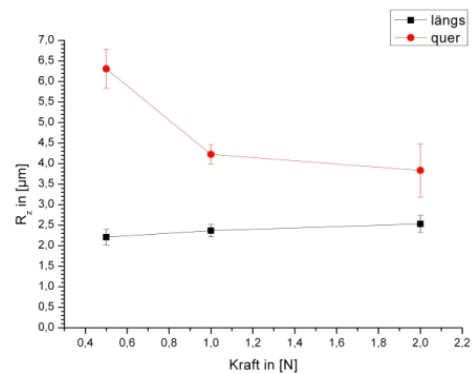


Abb. 5.38: Diagramm Ceraglaze mittel Rz

Tab. 5.9: Messwerte CeraGlaze mittel def. Anpressdruck mit Standardabweichung

Schleifer/Polierer	Rmax längs	Rz längs	Rmax quer	Rz quer
Ceraglaze mittel 0,5 N	2,66 +/-0,17	2,21 +/-0,19	11,8 +/-1,53	6,31 +/-0,47
Ceraglaze mittel 1 N	2,8 +/-0,17	2,37 +/-0,15	5,07 +/-0,45	4,22 +/-0,23
Ceraglaze mittel 2 N	2,94 +/-0,2	2,53 +/-0,21	5,34 +/-1,39	3,83 +/-0,65

5.2.6 Ergebnisse Keramikpolierer Ceraglaze fein (gelb)

Der Keramikpolierer Ceraglaze fein ergab bei 0,5 N definiertem Anpressdruck eine durchschnittliche maximale Rauheit von 1,28 μm und 0,99 μm Rz, bei 1 N wurde ein Wert von Rmax 0,92 μm und Rz von 0,75 μm gemessen. Unter 2 N Anpressdruck wurden für Rmax 2,02 μm und Rz von 0,75 μm ermittelt. Die Quermessungen betreffend, ergab sich bei 0,5 N eine durchschnittliche maximale Rauheit von 5,36 μm und 3,94 μm für Rz, bei 1 N ein Rmax von 2,46 μm und 1,85 μm für Rz. Die Ergebnisse bei 2 N Anpressdruck lieferten die Werte Rmax 3,2 μm und 2,61 μm für Rz.

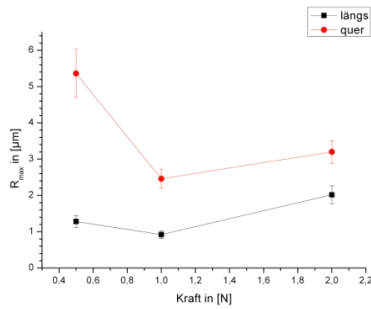


Abb. 5.39: Diagramm Ceraglaze fein Rmax

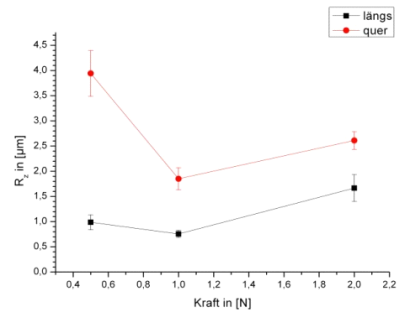


Abb. 5.40: Diagramm Ceraglaze fein Rz

Tab 5.10: Messwerte CeraGlaze fein def. Anpressdruck mit Standardabweichung

Schleifer/Polierer	Rmax längs	Rz längs	Rmax quer	Rz quer
Ceraglaze fein 0,5 N	1,28 +/-0,16	0,99 +/-0,15	11,8 +/-0,66	6,31 +/-0,46
Ceraglaze fein 1 N	0,92 +/-0,1	0,76 +/-0,07	5,07 +/-0,26	4,22 +/-0,22
Ceraglaze fein 2 N	2,02 +/-0,25	1,67 +/-0,27	5,34 +/-0,31	3,83 +/-0,18

5.2.7 Ergebnisse Keramikpolierer OptraFine 1 (hellblau)

Der Keramikpolierer OptraFine 1 ergab bei 0,5 N definiertem Anpressdruck eine durchschnittliche maximale Rauheit von 3,17 µm und 2,61 µm Rz, bei 1 N wurde ein Wert von Rmax 4,59 µm und Rz von 3,59 µm gemessen. Unter 2 N Anpressdruck wurden für Rmax 4,04 µm und Rz 3,43 µm ermittelt. Die Quermessungen betreffend, ergab sich bei 0,5 N eine durchschnittliche maximale Rauheit von 5,38 µm und 4,23 µm für Rz, bei 1 N ein Rmax von 6,23 µm und 5,18 µm für Rz. Die Ergebnisse bei 2 N Anpressdruck lieferten die Werte Rmax 4,42 µm und 3,47 µm für Rz.

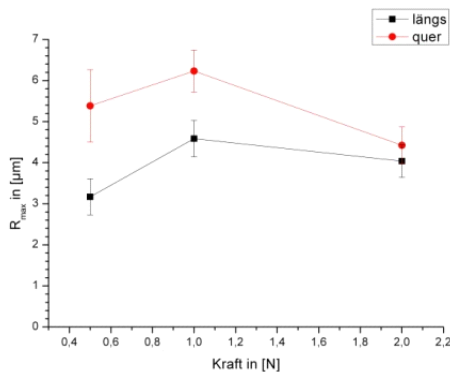


Abb. 5.41: Diagramm Optrafine 1 Rmax

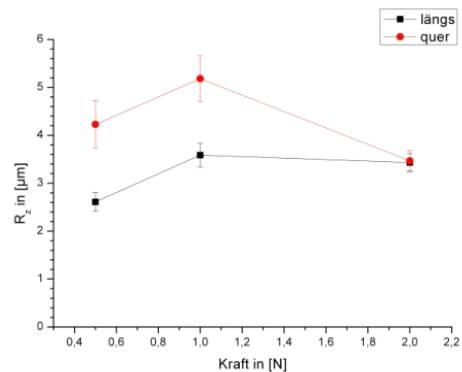


Abb. 5.42: Diagramm Optrafine 1 Rz

Tab 5.11: Messwerte Optrafine 1 def. Anpressdruck mit Standardabweichung

Schleifer/Polierer	Rmax längs	Rz längs	Rmax quer	Rz quer
OptraFine 1 0,5 N	3,17 +/-0,44	2,61 +/-0,2	5,38 +/-0,88	4,23 +/-0,49
OptraFine 1 1 N	4,59 +/-0,44	3,59 +/-0,25	6,23 +/-0,51	5,18 +/-0,47
OptraFine 1 2 N	4,04 +/-0,4	3,43 +/-0,19	4,42 +/-0,45	3,47 +/-0,21

5.2.8 Ergebnisse Keramikpolierer OptraFine 2 (dunkelblau)

Der Keramikpolierer OptraFine 2 ergab bei 0,5 N definiertem Anpressdruck eine durchschnittliche maximale Rauheit von 2,92 μm und 2,15 μm Rz, bei 1 N wurde ein Wert von Rmax 3,39 μm und Rz von 2,72 μm gemessen. Unter 2 N Anpressdruck wurden für Rmax 3,69 μm und Rz 2,87 μm ermittelt. Die Quermessungen betreffend, ergab sich bei 0,5 N eine durchschnittliche maximale Rauheit von 2,47 μm und 1,86 μm für Rz, bei 1 N ein Rmax von 3,3 μm und 2,58 μm für Rz. Die Ergebnisse bei 2 N Anpressdruck lieferten die Werte Rmax 3,8 μm und 2,99 μm für Rz.

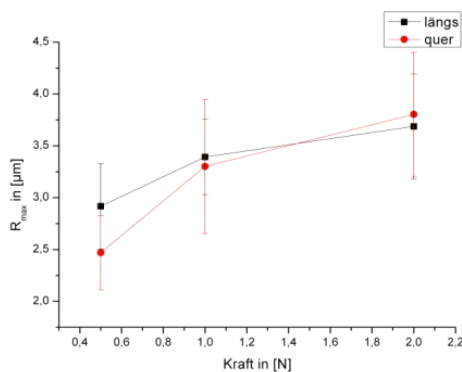


Abb. 5.43: Diagramm Optrafine 2 Rmax

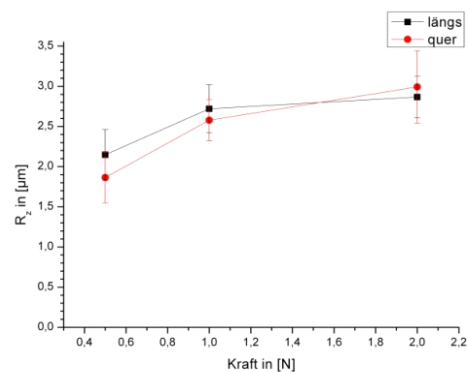


Abb. 5.44: Diagramm Optrafine 2 Rz

Tab. 5.12: Messwerte Optrafine 2 mit Standardabweichung

Schleifer/Polierer	Rmax längs	Rz längs	Rmax quer	Rz quer
OptraFine 2 0,5 N	2,92 +/-0,41	2,15 +/-0,31	2,47 +/-0,36	1,86 +/-0,31
OptraFine 2 1 N	3,39 +/-0,36	2,72 +/-0,3	3,3 +/-0,65	2,58 +/-0,26
OptraFine 2 2 N	3,69 +/-0,51	2,87 +/-0,26	3,8 +/-0,6	2,99 +/-0,45

5.2.9 Ergebnisse Polierbürste OptraFine 3 (Bürste mit Diamantpaste)

OptraFine 3 (Polierbürste mit Diamantpaste) ergab bei 0,5 N definiertem Anpressdruck eine durchschnittliche maximale Rauheit von 1,78 μm und 1,25 μm Rz, bei 1 N wurde ein Wert von Rmax 1,17 μm und Rz von 0,82 μm gemessen. Unter 2 N Anpressdruck wurden für Rmax 1,3 μm und Rz 0,83 μm ermittelt. Die Quermessungen betreffend, ergab sich bei 0,5 N eine durchschnittliche maximale Rauheit von 1,62 μm und 1,16 μm für Rz, bei 1 N ein Rmax von 1,04 μm und 0,79 μm für Rz. Die Ergebnisse bei 2 N Anpressdruck lieferten die Werte Rmax 1,31 μm und 1,08 μm für Rz.

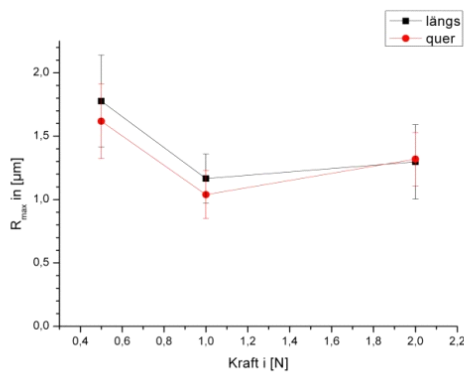


Abb. 5.45: Diagramm Optrafine 3 Rmax

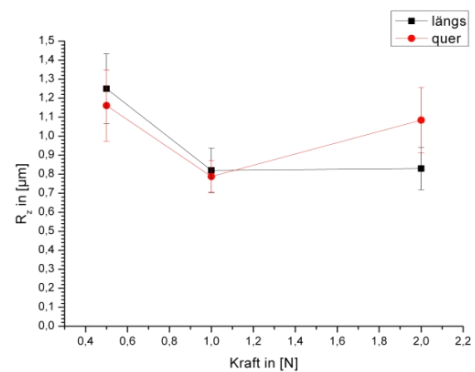


Abb. 5.46: Diagramm Optrafine 3 Rz

Tab 5.13: Messwerte Optrafine 3 def. Anpressdruck mit Standardabweichung

Schleifer/Polierer	Rmax längs	Rz längs	Rmax quer	Rz quer
OptraFine 3 0,5 N	1,78 +/-0,36	1,25 +/-0,18	1,62 +/-0,29	1,16 +/-0,19
OptraFine 3 1 N	1,17 +/-0,19	0,82 +/-0,11	1,04 +/-0,19	0,79 +/-0,08
OptraFine 3 2 N	1,3 +/-0,29	0,83 +/-0,11	1,32 +/-0,21	1,08 +/-0,17

5.3 Ergebnisse der Rauheitsreduktion der Schleif- und Poliersysteme

Um die Ergebnisse der Rauheitsreduktion anschaulich darzustellen wurden diese in prozentuale Reduktion umgerechnet und zwar nach folgender Formel:

$$100 - [(Rauheit \text{ vor d. Bearbeitung} / Rauheit \text{ nach d. Bearbeitung}) * 100] =$$

Reduktion [%]

5.3.1 Diamantschleifer

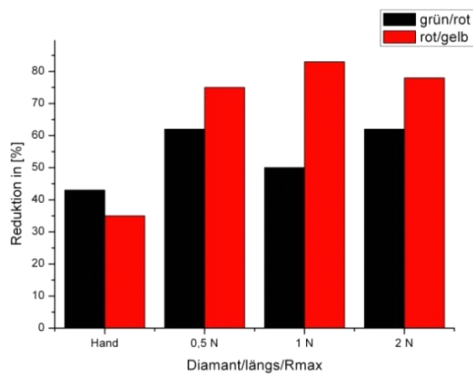


Abb. 5.47: Diagramm Rauheitsreduktion Diamant/längs/Rmax

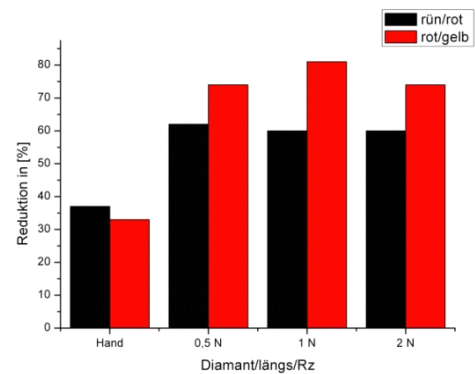


Abb. 5.48: Diagramm Rauheitsreduktion Diamant/längs/Rz

Tab. 5.14: Messwerte Rauheitsreduktion Diamant längs Rmax

Bearbeitungsinstrument	Reduktion in [%]
Diamant grün/rot längs/Rmax	
Hand	43
0,5 N	62
1 N	50
2 N	62
Diamant rot/gelb	
Hand	35
0,5 N	75
1 N	83
2 N	78

Tab. 5.15: Messwerte Rauheitsreduktion Diamant längs Rz

Bearbeitungsinstrument	Reduktion in [%]
Diamant grün/rot längs/Rz	
Hand	37
0,5 N	62
1 N	60
2 N	60
Diamant rot/gelb	
Hand	33
0,5 N	74
1 N	81
2 N	74

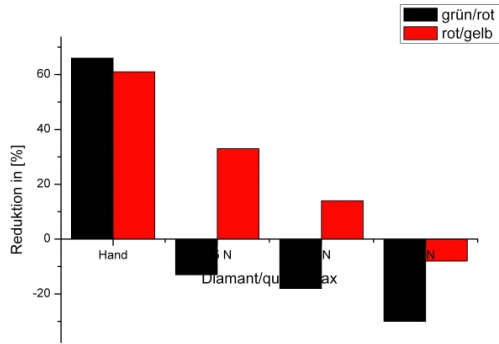


Abb. 5.49: Diagramm Rauheitsreduktion Diamant/quer/Rmax

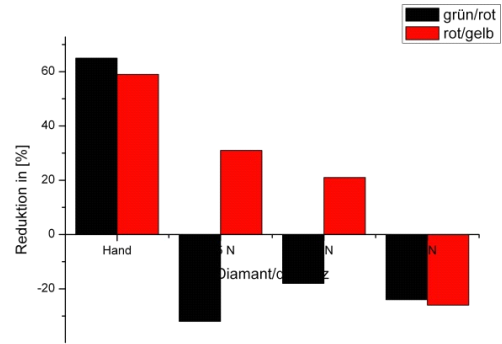


Abb. 5.50: Diagramm Rauheitsreduktion Diamant/quer/Rz

Tab. 5.16: Messwerte Rauheitsreduktion Diamant quer Rmax

Bearbeitungsinstrument	Reduktion in [%]
Diamant grün/rot quer/Rmax	
Hand	66
0,5 N	-13
1 N	-18
2 N	-30
Diamant rot/gelb	
Hand	61
0,5 N	33
1 N	14
2 N	-8

Tab. 5.17: Messwerte Rauheitsreduktion Diamant quer Rz

Bearbeitungsinstrument	Reduktion in [%]
Diamant grün/rot quer/Rz	
Hand	65
0,5 N	-32
1 N	-18
2 N	-24
Diamant rot/gelb	
Hand	59
0,5 N	31
1 N	21
2 N	-26

Bilder Grünringdiamant

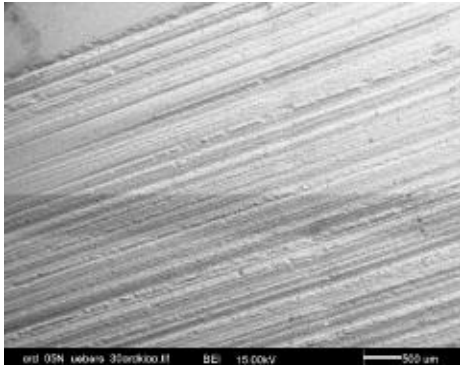


Abb. 5.51: Schleifmuster Grünringdiamant 100fach

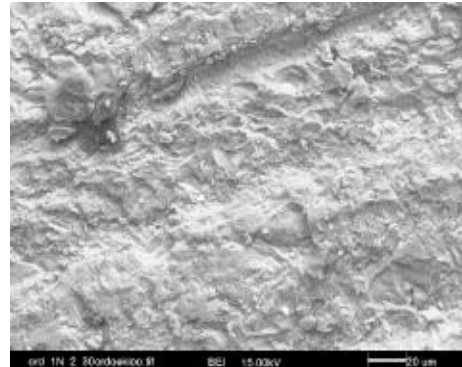


Abb. 5.52: Schleiffurchen Grünringdiamant 1000fach

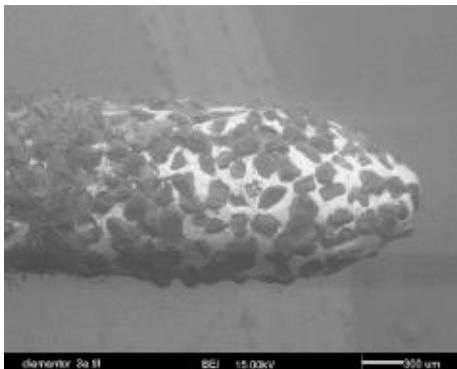


Abb. 5.53: Übersicht Grünringdiamantschleifer verschlissen

Bilder Rotringdiamant

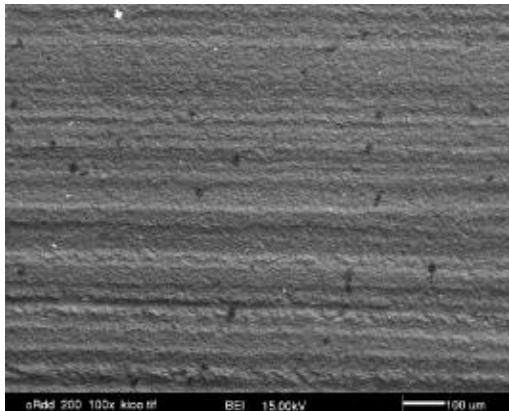


Abb. 5.54: Schleifmuster Rotringdiamant 100fach

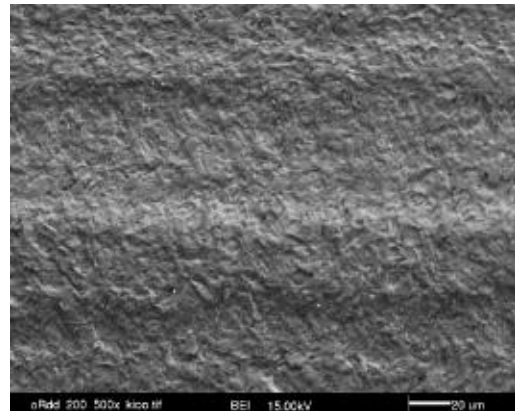


Abb. 5.55: Schleiffurchen Rotringdiamant 1000fach

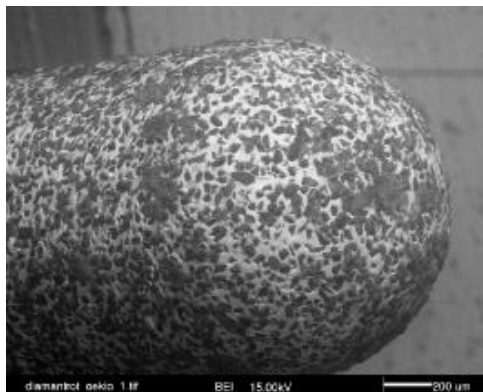


Abb. 5.56: Übersicht Rotringdiamantschleifer verschlissen

Bilder Gelbringdiamant

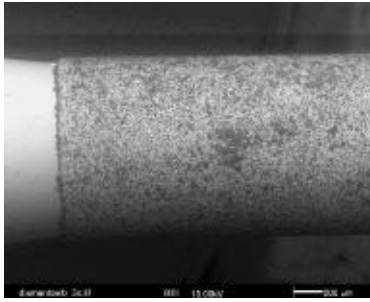


Abb. 5.57: Übersicht Rotringdiamantschleifer mit Schleifpartikelresten

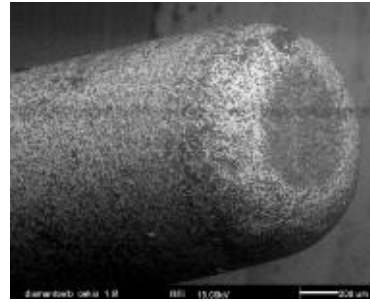


Abb. 5.58: Übersicht Rotringdiamantschleifer Walze

5.3.1.1 Grünringdiamant

Die Diamantschleifer bilden den ersten Schritt der Oberflächenbearbeitung.

Die Bearbeitung der Keramikfläche mit den Grünringdiamanten zeigen erhebliche Unterschiede bezüglich der Rauheit. Mit der Testvorrichtung werden signifikant höhere Rauheiten erzeugt, dessen Maximum bei 1 N Druck liegt (Abb. 5.1; 5.2; 5.29; 5.30), als mit der Hand. Bei noch höherem Druck sinkt die Rauheit wieder. Auffällig sind die stark streuenden Minimal- und Maximalwerte, unabhängig von der Bearbeitungsmethode. Ursache dafür sind wahrscheinlich die starre Position des Schleifers in der Testvorrichtung und die grobe Schleifkornstruktur (Abb. 5.53), die eine schroffe und stark zerklüftete Oberfläche erzeugen (Abb. 5.52).

Die oben beschriebenen Rauheiten nach Bearbeitung mit dem Grünringdiamant sind als gut erkennbare, parallel verlaufende Rillen in Abbildung 5.51 dargestellt. Der handbearbeitete Block zeigte diese Gleichmäßigkeit der Oberfläche nicht, bedingt durch die vielen unterschiedlichen Schleifrichtungen. Das REM Bild der Abbildung 5.52 zeigt aus der Keramikoberfläche herausgebrochene Schleifpartikel. In der 1000fachen Vergrößerung konnten Mikrofrakturen auf der Keramikoberfläche beobachtet werden (Abb. 5.52).

Der Abfall der Rauheit in der höchsten Druckstufe könnte bereits auf einen schnellen Verschleiß des Schleifers deuten, das heißt mit mechanischem Herauslösen von Karbidkristallen (Abb. 5.53). Markant sind auf diesem REM Übersichtsbild die großen räumlichen Abstände zwischen den abrasiven Schleifpartikeln. Diese Abstände korrelieren mit den erzeugten Rillen in der Abbildung 5.51.

Über die Effektivität der Rauheitsreduktion können in diesem Schritt keine Ergebnisse geliefert werden.

5.3.1.2 Rotringdiamant

Der Rotringdiamant zeigt stark signifikante Unterschiede bezüglich der beiden Messrichtungen. Während bei der Längsrichtung ähnlich wie beim Grünringdiamanten bei 1 N Anpressdruck ein Maximum der Rauheit erreicht wird, heben sich die Quermessungen krass davon ab. Die Messwerte sind vergleichbar mit denen des größten Diamanten. In 5.4.1 wird darauf präziser eingegangen.

Die Handbearbeitung zeigt sowohl bei R_{max} , als auch R_z signifikant geringere Rauheiten.

Der Rotringdiamant zeigt im REM Bild deutlich feinere Schleifkörper auf der Instrumentoberfläche als der Grünringdiamant (Abb. 5.56). Die Räume zwischen den Schleifkörpern sind ebenfalls deutlich kleiner (Abb. 5.56). Neben partiellen Verlusten von Karbidkristallen sind Ablagerungen vorhanden, die eine Art Schmierfilm auf dem Instrument bilden (Abb. 5.56). In der Abbildung 5.55 wird ein Phänomen deutlich, welches sich bei den folgenden Instrumenten immer wieder zeigt und folgendermaßen aussieht. In der oberen Hälfte von Abbildung 5.55 fand ein Substanzabtrag statt, der die Bearbeitungsspuren des Grünringdiamanten fast vollständig einebnen konnte. In der unteren Hälfte lassen die tiefen Rillen des Grünringdiamanten deutlich erkennen. Bei der Abbildung handelt es sich um eine Probe, die mit Hand bearbeitet wurde. Mit jeder weiteren Finierbeziehungsweise Polierstufe wird es immer weniger wahrscheinlich, dass diese Rillen eingeebnet werden, da der Substanzabtrag kontinuierlich sinkt. Die Abbildung 5.54 vermittelt eine deutlich feinere Oberflächenstruktur, als in der vorherigen Stufe (Abb. 5.52). Im unteren Drittel der Abbildung des Rotringdiamanten lässt sich eine rissähnliche Struktur erkennen, die sich als eine Mikrofraktur interpretieren lässt.

Bezüglich der Effektivität der Rauheitsreduktion lassen sich mit der maschinellen

Methode signifikant höhere Werte erzielen als bei der Handbearbeitung. Die mittlere Druckapplikation (1N) zeigt sich als die Stufe mit der geringsten Effektivität. Das widersprüchliche Phänomen, dass sich bei den Quermessungen die Rauheit erhöht, anstatt verringert wird in 5.4.1 ausgewertet.

5.3.1.3 Gelbringdiamant

Dezidierte Unterschiede in der Hand- und Maschinenbearbeitung zeigt der Gelbringdiant. Der undefinierte Druck erzeugt signifikant höhere Messwerte, als die Applikation von definierter Kraft auf die Probe in der Testvorrichtung.

Definierter Anpressdruck hat in dem Bereich von 0,5 N bis 2 N nur einen geringen Einfluss auf die resultierende Oberflächenrauheit. Das betrifft ebenfalls die Unterschiede zwischen Rz und Rmax. Die optische Begutachtung der per Hand und per Maschine geschliffenen Keramikflächen zeigte hingegen kaum sichtbare Unterschiede. Betrachtet man die Messwerte, liegt die Vermutung nahe, dass einige per Hand beschliffenen Bereiche nicht tief genug nivelliert wurden, was sich in den Extrema der Rauheit zeigt. Übrig gebliebene Rillen der vorherigen Instrumente sind wahrscheinlich nicht ausreichend reduziert worden. Diese Kerben in der Oberfläche

können auch aus der ersten Bearbeitungsstufe mit dem Grünringdiamanten herrühren. Die REM Bildern konnte dieser Verdacht nicht bestätigen. Die Messwerte der Testvorrichtung zeigen deutlich, dass viel kleinere Rauheiten erreichbar sind, wenn ein definierter Druck angewendet wird (Abb. 5.5; 5.6; 5.33; 5.34).

Neben dem oben erwähnten Verschmieren des Schleifers ist den Schleifpartikeln ebenfalls eine gewisse, undefinierte Reduktion der Rauheit zuzuschreiben. Nicht abtransportierte Schleifpartikel kommen erneut mit dem Werkstoff in Berührung verändern die Oberfläche. Das heißt, sie können ebenfalls als Schleifkörper dienen. Die REM Bilder (siehe Abb. 5.57 und 5.58) zeigen sichtbare Partikelreste.

Bezüglich der Effektivität der Rauheitsreduktion zeigt sich in diesem Bearbeitungsschritt ein signifikant höheres Reduktionsvermögen bei der Handbearbeitung.

5.3.2 Cera Glaze Polierer

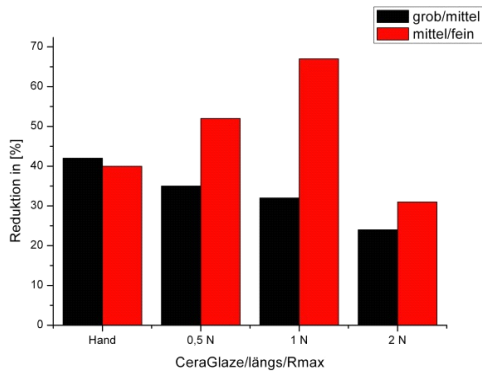


Abb. 5.59: Diagramm Raueitsreduktion CeraGlaze/längs/Rmax

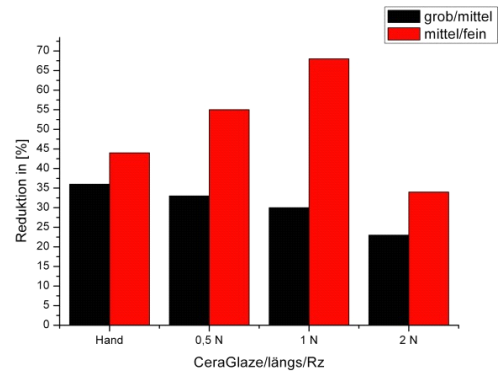


Abb. 5.60: Diagramm Raueitsreduktion CeraGlaze/längs/Rz

Tab. 5.18: Messwerte Raueitsreduktion CeraGlaze längs Rmax

Bearbeitungsinstrument	Reduktion in [%]
CeraGlaze grob/mittel längs/Rmax	
Hand	42
0,5 N	35
1 N	32
2 N	24
CeraGlaze mittel/fein	
Hand	40
0,5 N	52
1 N	67
2 N	31

Tab. 5.19: Messwerte Raueitsreduktion CeraGlaze längs Rz

Bearbeitungsinstrument	Reduktion in [%]
CeraGlaze grob/mittel längs/Rz	
Hand	36
0,5 N	33
1 N	30
2 N	23
CeraGlaze mittel/fein	
Hand	44
0,5 N	55
1 N	68
2 N	34

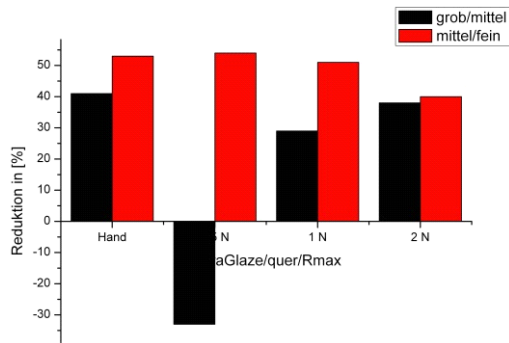


Abb. 5.61: Diagramm Rauheitsreduktion Ceraglaze/quer/Rmax

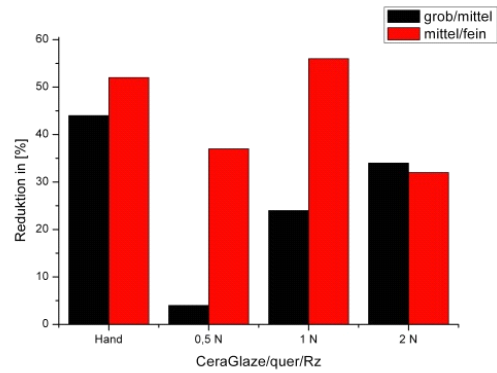


Abb. 5.62: Diagramm Rauheitsreduktion Ceraglaze/quer/Rz

Tab. 5.20: Messwerte Rauheitsreduktion Ceraglaze quer Rmax

Bearbeitungsinstrument	Reduktion in [%]
Ceraglaze grob/mittel quer/Rmax	
Hand	41
0,5 N	-33
1 N	29
2 N	38
Ceraglaze mittel/fein	
Hand	53
0,5 N	54
1 N	51
2 N	40

Tab. 5.21: Messwerte Rauheitsreduktion Ceraglaze quer Rz

Bearbeitungsinstrument	Reduktion in [%]
Ceraglaze grob/mittel quer Rz	
Hand	44
0,5 N	4
1 N	24
2 N	34
Ceraglaze mittel/fein	
Hand	52
0,5 N	37
1 N	56
2 N	32

Bilder CeraGlaze grob

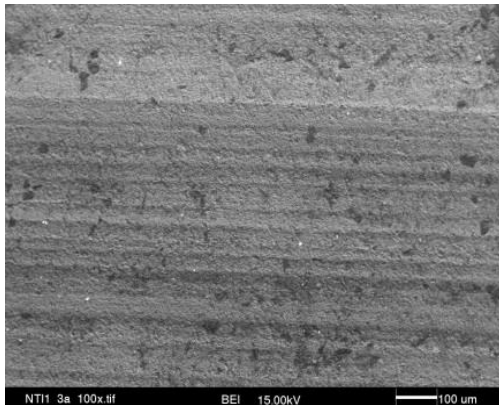


Abb. 5.63: Schleifmuster CeraGlaze grob 100fach

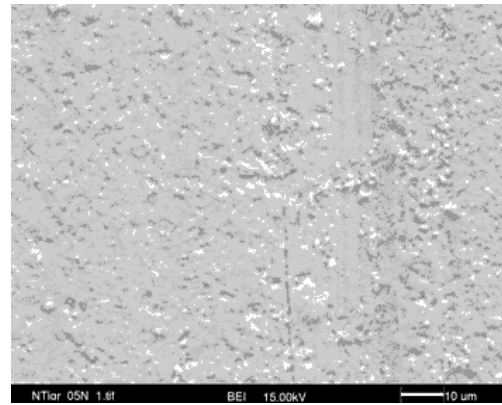


Abb. 5.64: verbliebene Rille vom Diamanten nach CeraGlaze grob Behandlung



Abb. 5.65: Übersicht CeraGlaze grob Instrument

Bilder CeraGlaze mittel

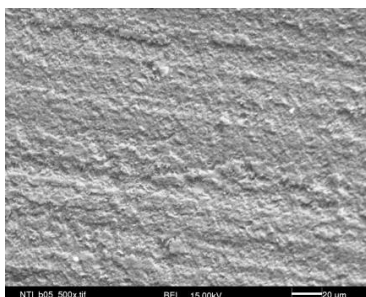


Abb. 5.66: Oberfläche nach CeraGlaze mittel Behandlung 500fach

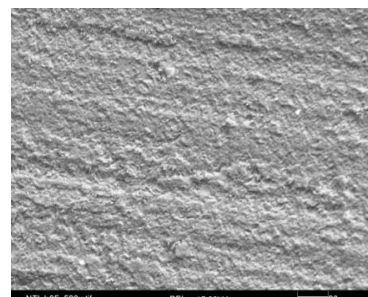


Abb. 5.67: Oberfläche nach CeraGlaze mittel Behandlung (0,5 N) 500fach

Bilder CeraGlaze fein

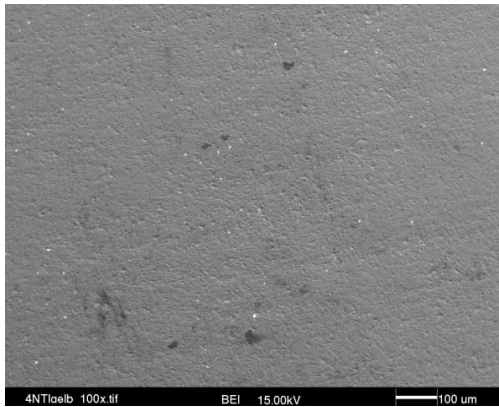


Abb. 5.68: Oberfläche nach CeraGlaze fein Behandlung 100fach

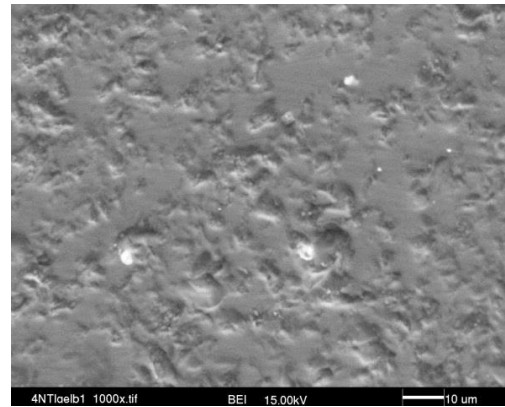


Abb. 5.69: Oberfläche nach CeraGlaze fein Behandlung 1000fach

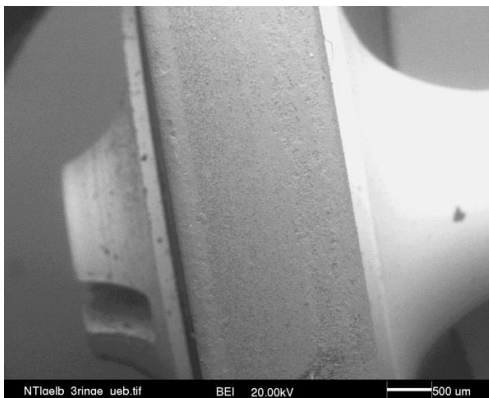


Abb. 5.70: Übersicht CeraGlaze fein Instrument

5.3.2.1 CeraGlaze grob

Der grobe NTI CeraGlaze Polierer erzeugt in den Handversuchen eine signifikant höhere Rauheit, als die maschinelle Bearbeitung es vermag (Abb. 5.17; 5.18). Davon ausgenommen sind die Ergebnisse der Quermessungen unter definiertem Anpressdruck. Bei 0,5 N zeigt sich die größte Rauheit, was damit zusammenhängt, dass der Polierer die Rillen der Vorbehandlung mit den Diamanten nicht ausreichend eibnen kann (Abb.5.35; 5.36).

Bei 1 N kommen die Messwerte nahe an die Rauheit der Handbearbeitung. Höherer Anpressdruck führt wiederum zur Erhöhung der Rauheit. Vermutlich werden hier bereits neue Rillen in der gemessenen Querrichtung produziert (Erklärung siehe 5.4.1). In der Längsrichtung hat der definierte Anpressdruck nur sehr geringe Auswirkung. Steigender Druck zeigt eine geringe Tendenz zur Verringerung der Rauheit.

In Abb. 5.53 sind markante Rillen auf der REM Aufnahme sichtbar, die streng entlang der Bearbeitungsrichtung verlaufen. Bei 1000facher Vergrößerung sind stellenweise immer noch Rillen erkennbar (Abb. 5.64), die definitiv nicht eingeebnet wurden, sondern vermutlich von einem der vorhergehenden Diamanten stammen. Die Übersichtsaufnahme in Abb. 5.65 zeigt die eingebetteten, abrasiven Partikel. Die Größe der Schleifpartikel korreliert mit den erzeugten Rillen auf der Keramikoberfläche. Mit dem Auge sind außer der matten Oberfläche keinerlei Strukturen erkennbar.

5.3.2.2 CeraGlaze mittel

Die mittlere Polierstufe der NTI Polierer zeigt bei den Längsmessungen unter kontrollierten Druckbedingungen eine signifikant geringere Rauheit als die Handbearbeitung (Abb. 5.19; 5.20; 5.37; 5.38). Mit steigendem Anpressdruck steigen die Messwerte geringfügig. Anders verhalten sich die Ergebnisse der Quermessungen. Bereits 1 N verringert die Rauheit stark (Abb. 5.38). Über 1N Druck verändert sich die Rauheit nur gering. Daraus lässt sich schließen, dass für die Reduktion von Unebenheiten auf der Oberfläche ein adäquat applizierter Druck die Rauheiten der vorhergehenden Polierstufe reduzieren kann.

Die REM Bilder zeigen homogene Oberflächen (Abb. 5.66 und 5.67). Ansatzweise sind die Bearbeitungsspuren des Polierers in horizontaler Richtung zu erkennen. Mit dem Auge ist ein seidenmatter Glanz zu erkennen, ohne dass eine Bearbeitungsrichtung bei einer der beiden Bearbeitungsmethoden sichtbar wäre.

Bezüglich der Effizienz der Rauheitsreduktion sind folgende Ergebnisse feststellbar. In der Längsrichtung sinkt die prozentuale Reduktion kontinuierlich mit dem Anpressdruck, während in der Querrichtung das Gegenteil messbar ist. Bei 0,5 N vermag der Polierer die Rillen des groben NTI Instruments nicht zu verringern. Per Hand lässt sich in diesem Arbeitsschritt die höchste prozentuale Reduktion erreichen (Abb.5.61; 5.62).

5.3.2.3 CeraGlaze fein

Die feinste Polierstufe der Ceraglaze Polierer zeigt in seinen Ergebnissen einige Besonderheiten. Die Handbearbeitung zeigt zwischen den Längs- und Querwerten signifikante Unterschiede (Abb. 5.23; Abb. 5.24). Die maschinelle Politur kann sowohl zu deutlich höheren, als auch zu niedrigeren Rauheiten führen, was vom applizierten Anpressdruck abhängt (Abb. 5.39; Abb. 5.40). Bei 0,5 N werden wie in der mittleren Po-

lierstufe die höchsten Rauheiten erzeugt, wenn man die Quermessungen heranzieht. Eine massive Reduktion der Rauheit tritt bei Erhöhung des Anpressdrucks ein. Auch die Längsmessungen zeigen diesen Trend. Das Minimum der Rauheit stellt sich bei 1 N und liegt damit signifikant unter den Messwerten der Handpolitur. Mit steigendem Druck bis 2 N steigt sowohl bei den Quer-, als auch bei den Längsmessungen die Rauheit wieder an und endet bei Messwerten, die über denen der Handbearbeitung liegen. In keiner der anderen Polierer hat der Anpressdruck eine so entscheidende Rolle für das Resultat der Oberfläche. Die REM Bilder (Abb. 5.68; 5.69) bestätigen eine sehr konstante, homogene Oberfläche. Die 1000fache Vergrößerung (Abb. 5.69) zeigt keine Bearbeitungslinien in einer Hauptrichtung, lediglich Poren mit Schleifmittelrückständen charakterisieren die Oberfläche. In der Übersichtsaufnahme des Polierers sind keine Unterschiede zwischen Polierkörper und Trägermaterial zu erkennen (Abb. 5.70). Die optische Kontrolle der Proben mit dem Auge zeigt bei beiden Bearbeitungsmethoden einen perfekten Hochglanz.

Bezüglich der Effizienz der Reduktion der Rauheit zeigt sich, dass bis auf eine Ausnahme (1N/quer/Rmax) der finale Bearbeitungsschritt bei 1 N Anpressdruck den effizientesten des Polierers darstellt (Abb. 5.61; 5.62). Diese Ergebnisse spiegeln sich auch in den gemessenen Oberflächenrauheiten wieder.

5.3.3 Optrafine Polierer

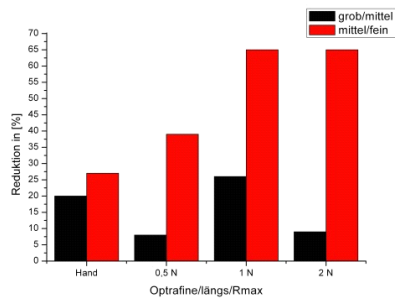


Abb. 5.71: Diagramm Rauheitsreduktion Optrafine/längs/Rmax

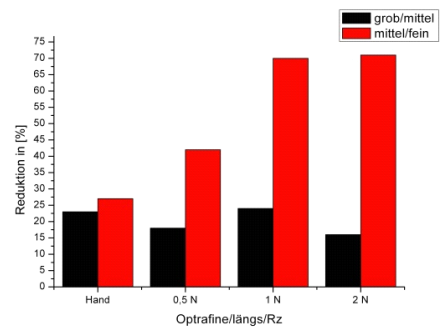


Abb. 5.72: Diagramm Rauheitsreduktion Optrafine/längs/Rz

Tab. 5.22: Messwerte Rauheitsreduktion Optrafine längs Rmax

Bearbeitungsinstrument	Reduktion in [%]
Optrafine grob/mittel längs/Rmax	
Hand	20
0,5 N	8
1 N	26
2 N	9
Optrafine mittel/fein	
Hand	27
0,5 N	39
1 N	65
2 N	65

Tab. 5.23: Messwerte Rauheitsreduktion Optrafine längs Rz

Bearbeitungsinstrument	Reduktion in [%]
Optrafine grob/mittel längs/Rz	
Hand	23
0,5 N	18
1 N	24
2 N	16
Optrafine mittel/fein	
Hand	27
0,5 N	42
1 N	70
2 N	71

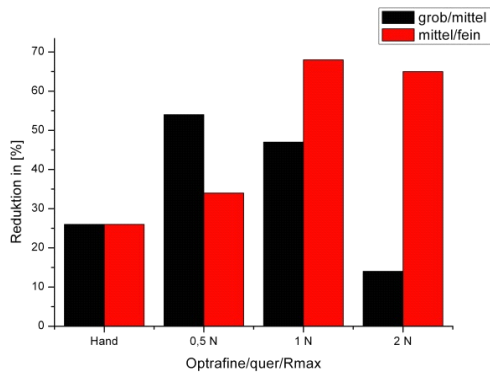


Abb. 5.73: Diagramm Rauheitsreduktion Optrafine/quer/Rmax

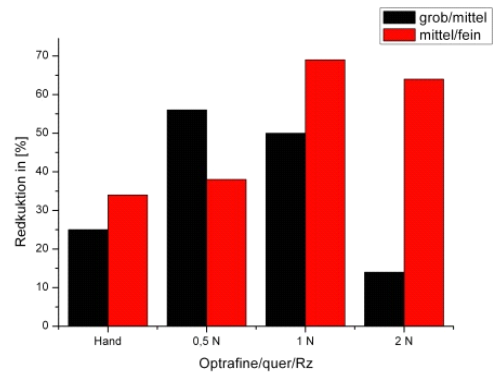


Abb. 5.74: Diagramm Rauheitsreduktion Optrafine/quer/Rz

Tab. 5.24: Messwerte Rauheitsreduktion Optrafine quer Rmax

Bearbeitungsinstrument	Reduktion in [%]
Optrafine grob/mittel quer/Rmax	
Hand	26
0,5 N	54
1 N	47
2 N	14
Optrafine mittel/fein	
Hand	26
0,5 N	34
1 N	68
2 N	65

Tab. 5.25: Messwerte Rauheitsreduktion Optrafine quer Rz

Bearbeitungsinstrument	Reduktion in [%]
Optrafine grob/mittel quer/Rz	
Hand	25
0,5 N	56
1 N	50
2 N	14
Optrafine mittel/fein	
Hand	34
0,5 N	38
1 N	69
2 N	64

Bilder Optrafine grob

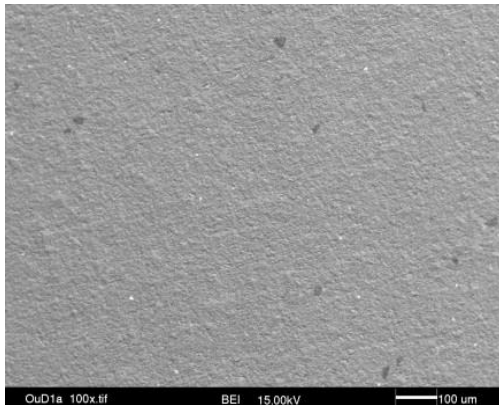


Abb. 5.75: Oberfläche nach CeraGlaze grob Behandlung 100fach

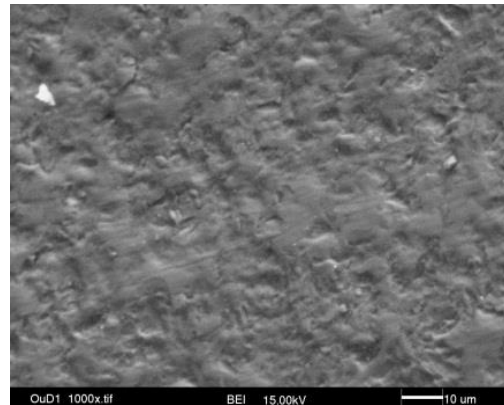


Abb. 5.76: Oberfläche nach CeraGlaze grob Behandlung 1000fach

Bilder Optrafine mittel

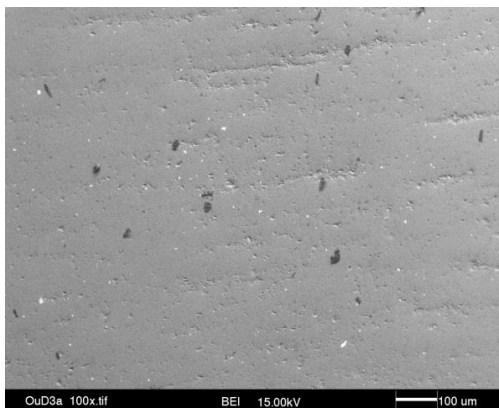


Abb. 5.77: Oberfläche nach CeraGlaze mittel Behandlung 100fach

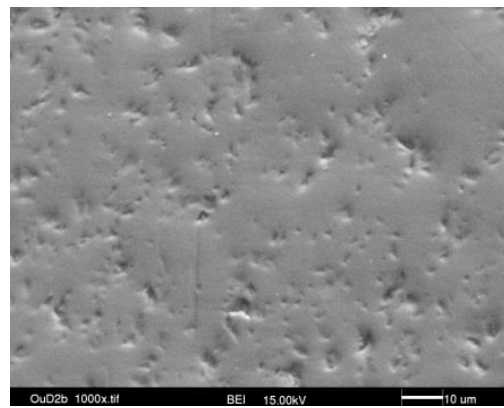


Abb. 5.78: Oberfläche nach CeraGlaze mittel Behandlung 1000fach

Bilder Optrafine fein

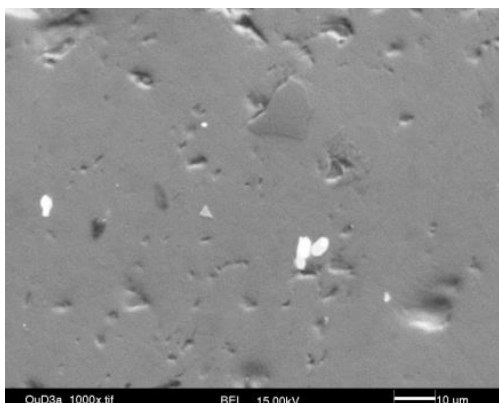


Abb. 5.79: Oberfläche nach CeraGlaze fein Behandlung 1000fach

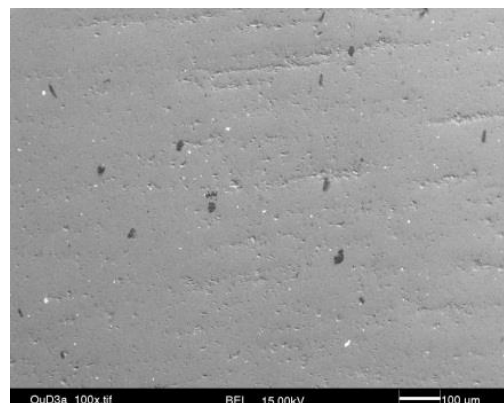


Abb. 5.80: Oberfläche nach CeraGlaze fein Behandlung 100fach

5.3.3.1 Optrafine grob

Der erste Polierer in der Optrafine Reihe zeigt Besonderheiten, was den kontrollierten Anpressdruck betrifft. Zwischen den Längs- und den Quermessungen bestehen signifikante Unterschiede bezüglich der Rauheit (Abb. 5.23; 5.24; 5.41; 5.42). Ähnlich wie bei den Diamantfinierern und dem NTI – System liegen diese höher. Beide Poliermethoden zeigen, dass bei 0,5 N die geringsten Rauheiten erzeugt werden. Steigender Anpressdruck führt zu einer größeren Rauheit. Diese verringert sich wiederum, wenn der Druck weiter bis 2 N steigt (Abb. 5.41; 5.42). Die Messwerte für die Handversuche liegen teilweise über und teilweise unter den Rauheiten des kontrollierten Anpressdrucks.

Die REM Bilder weisen bereits in der ersten Polierstufe eine sehr gleichmäßige Oberflächenstruktur auf, das betrifft auch die 1000fache Vergrößerung (Abb. 5.75; 5.76). Rillen aus den vorhergehenden Bearbeitungsstufen waren nicht zu erkennen. Mit dem Auge konnte die homogene Oberfläche ebenfalls beobachtet werden mit einem stumpfen, reflexionsfreien Glanz.

5.3.3.2 Optrafine mittel

Die mittlere Polierstufe der Optrafine Reihe verhält sich in ihren Messergebnissen mit einer anderen Tendenz als der grobe Polierer. Steigender Anpressdruck führt sowohl bei den Längs-, als auch bei den Quermessungen zu kontinuierlich steigender Rauheit (Abb. 5.43; 5.44). Bei 0,5 N werden die geringsten R_{max} und R_z Werte gemessen, ähnlich wie bei dem Optrafine grob Polierer. Eine Besonderheit ist, dass die Messwerte in der Querrichtung bei 0,5 N und 1 N kleiner sind, als bei den Längsmessungen, das betrifft auch die Handpolitur (Abb. 5.25; 5.26).

Die REM Aufnahmen zeigen glatte Oberflächen, die mit Poren durchsetzt ist. Bereits die vorherige Polierstufe ließ keine Rillen erkennen, die auch hier nicht erkennbar sind (Abb. 5.77; 5.78). Mit dem Auge lässt sich ein matter Glanz feststellen.

Bezüglich der Effizienz der Rauheitsreduktion findet von groben zum mittleren Polierer eine vergleichsweise geringe prozentuale Verminderung der Rauheit statt, welche bei 1 N (R_{max} und R_z) am höchsten ist. Die prozentuale Reduktion ist bei den R_z Werten signifikant größer (Abb. 5.71; 5.72; 5.73; 5.74)

5.3.3.3 Optrafine fein

Die auf einer Polierpaste basierende feinste Stufe der Optrafine Reihe zeigt ein anderes Verhalten als beide vorhergehende Polierstufen. Die Rauheit der Oberfläche ist signifikant abhängig vom Anpressdruck. 0,5 N erzeugt die höchsten Messwerte, die bei steigendem Druck und bei 1 N ihr Minimum erreichen. Ähnlich wie beim mittleren Polierer sind die Quermessungen bis 1 N mit geringeren Rauheiten behaftet und liegen bei 2 N über den Werten der Längsmessungen (Abb. 5.27; 5.28; 5.45; 5.46).

Die REM Bilder zeigen eine glatte Oberfläche mit wenigen verbliebenen Poren. Teilweise sind diese Poren mit einer schuppenartigen Substanz zugesetzt. Hierbei könnte es sich um Rückstände der Polierpaste handeln (Abb. 5.79). Ein Hochglanz ist auf der bearbeiteten Fläche sichtbar.

Die Effizienz der prozentualen Rauheitsreduktion fällt sehr unterschiedlich aus. Die Handpolitur zeigt sich als die am wenigsten effizienteste Methode. Ein kontrollierter Anpressdruck von 0,5 N ergibt eine signifikant höhere Reduktion, als die Handpolitur. Mit steigendem Anpressdruck steigt die Effizienz stark an und ändert sich über 1 N gering (Abb 5.71; 5.72; 5.73; 5.74).

5.3.3.4 SofLex Scheiben grob/mittel/fein/superfein/Diamantpolierpaste

Die Ergebnisse der SofLex Scheiben sind auf die Handversuche beschränkt.

Die groben SofLex Scheiben erzeugen in ihrem 4-stufigen System eine kontinuierliche Reduktion der Rauheit. Auffällig bei allen Scheiben, einschließlich der Diamantpolierpaste ist die große Standardabweichung beziehungsweise großen Maximalwerte bei R_{max} (Abb. 5.7 bis 5.16). Besonders bemerkenswert tritt dies bei der Diamantpolierpaste auf. Es handelt sich hierbei vermutlich um eine nicht ausreichend eingeebnete Rille, die von einer vorhergehenden Polierstufe stammt. Die R_z Werte liegen signifikant unter denen der R_{max} Werte. Die Unterschiede der Messwerte zwischen den Längs- und Quermessungen sind ebenfalls deutlich geringer.

Bezüglich der Effektivität stellt sich die SofLex superfein als die effektivste heraus. Die Diamantpolierpaste vermag die Oberflächenrauheit der superfeinen Scheiben nochmals signifikant zu verringern (Abb. 5.13; 5.16).

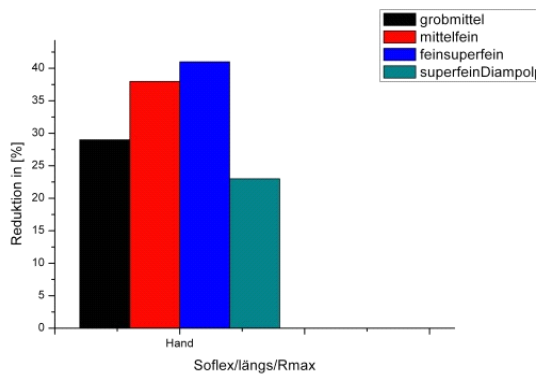


Abb. 5.81: Diagramm Rauheitsreduktion SofLex/Rmax

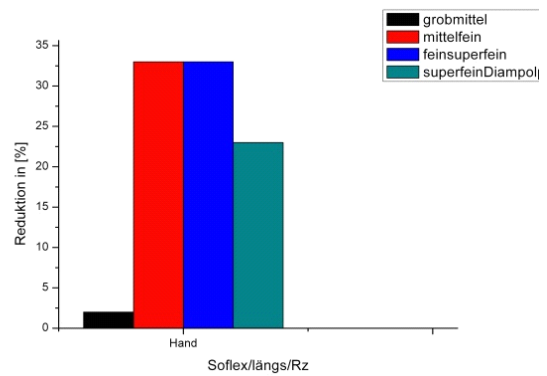


Abb. 5.82: Diagramm Rauheitsreduktion SofLex/Rz

Tab. 5.26: Messwerte Rauheitsreduktion SofLex längs Rmax

Bearbeitungsinstrument	Reduktion in [%]
Hand	
Soflex grob/mittel längs/Rmax	29
Hand	
Soflex mittelfein	38
Hand	
Soflex feinsuperfein	41
Hand	
Soflex superfein/Diam.pol.paste	23
Hand	

Tab. 5.27: Messwerte Rauheitsreduktion SofLex längs Rz

Bearbeitungsinstrument	Reduktion in [%]
Hand	
Soflex grob/mittel längs/Rz	20
Hand	
Soflex mittelfein	33
Hand	
Soflex feinsuperfein	33
Hand	
Soflex superfein/Diam.pol.paste	23
Hand	

Tab. 5.28: Messwerte Rauheitsreduktion SofLex quer Rmax

Bearbeitungsinstrument	Reduktion in [%]
Soflex grob/mittel quer/Rmax	38
Hand	
Soflex mittel/fein	29
Hand	
Soflex fein/superfein	44
Hand	
Soflex superfein/Diam.pol.paste	6
Hand	

Tab. 5.29: Messwerte Rauheitsreduktion SofLex quer Rz

Bearbeitungsinstrument	Reduktion in [%]
Soflex grob/mittel quer/Rz	20
Hand	
Soflex mittel/fein	38
Hand	
Soflex fein/superfein	29
Hand	
Soflex superfein/Diam.pol.paste	23
Hand	

5.4 Auswertung der Diagramme, Tabellen, REM Bilder und Fotos

Besonderheiten

Betrachtet man die prozentuale Reduktion aller Poliersysteme und Bearbeitungsmethoden, dann stellt man bei allen Längsmessungen eine Verringerung der Rauheit fest.

Wie zum Beispiel aus der Tabelle 5.20 hervorgeht, ergeben sich Reduktionen von – 33%. Jeder Minuswert bedeutet, dass die Rauheit innerhalb des Poliersystems zu-, anstatt abnimmt. Diese Werte zeigen sich ausschließlich bei den Quermessungen.

Dieses widersprüchliche Phänomen wird wie folgt erklärt:

Die Ergebnisse der Quermessungen zeigen sehr große Unterschiede zu den Längsmessungen, zumindest was die Testvorrichtung betrifft. Der Grund liegt im angewendeten Bearbeitungsverfahren. Nach 5 (3) Schleifzyklen, ergab sich ein entsprechender Materialabtrag. Um eine ausreichende Fläche für die Messungen mit dem Perthometer zu erhalten, musste weitere Probenfläche bearbeitet werden, bis eine Messstrecke von mindestens 5,6 mm erreicht war. Der Schleifer/Polierer der Testvorrichtung wurde dazu in der y – Richtung versetzt und die Bearbeitung wurde fortgesetzt. Der Versatz in der y – Richtung macht sich als sichtbare Stufe auf der bearbeiteten Fläche deutlich, die während den Messungen vom Instrument überstrichen wurde. Die Bilder 5.83 und 5.84 verdeutlichen den Sachverhalt visuell:

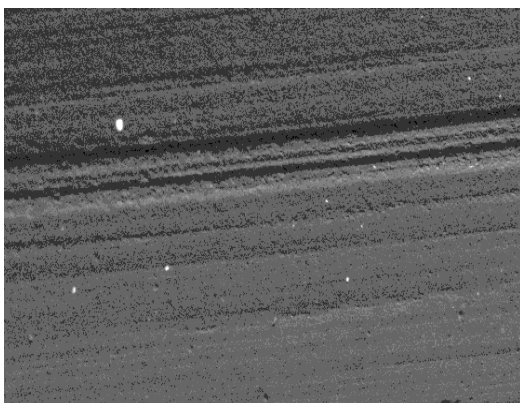


Abb. 5.83: REM Aufnahme behandelter Keramikblock mit Rillen 100fach



Abb. 5.84: Foto Keramikblock nach Politur mit Rillen

6 Diskussion

Der Übersicht halber bezieht sich die Darstellung der Ergebnisse zunächst auf die jeweils eingesetzten Schleif- und Poliersysteme. In diesem Abschnitt sollen die Ergebnisse aus Sicht der sogenannten Handbearbeitung verglichen werden.

Dazu wird zwischen Längs- und Quermessungen der Rauheit unterschieden.

Anschließend werden die unter kontrollierten Bedingungen durchgeführten Bearbeitungen verglichen und einer Bewertung unterzogen.

Es erscheint interessant, die beiden Systeme, sowohl die Hand- als auch die maschinelle Politur, direkt vergleichend zu bewerten.

Daraus sollten dann Schlussfolgerungen über die Leistungsfähigkeit der Systeme zur Oberflächenbearbeitung von Feldspatkeramiken gezogen und ein Ranking aufgestellt werden können. Hinzu kommt eine kritische Bewertung des Testarbeitsplatzes.

6.1 Diskussion der Handbearbeitung

Wie in den Ergebnissen schon beschrieben, führen alle Bearbeitungssysteme zu einer Reduktion der Oberflächenrauheit. Zu dieser Erkenntnis kommen auch anderen Studien [40, 56-59]. Das betrifft die Handbearbeitung und die verschiedenen Testvorrichtungen. Die bei den Handbearbeitungen eingesetzten Personen verfügten stets über praktische Erfahrung und waren mit dem Thema Polituren vertraut [47, 56, 57]. Alkhiary [39] erstellte ein Politurprotokoll, welches aus 8 erfahrenen Prothetikern bestand. Die Parameter des Politurprotokolls wurden direkt auf eine Testvorrichtung übertragen.

Die Ergebnisse der manuellen Bearbeitung werden nicht erwähnt und konnten so nicht herangezogen werden. Es fand sich nur eine Studie, die vom grobkörnigen Diamanten bis zur Hochglanzpolitur Evaluierungen durchführte [58], allerdings ohne Nennung der Bearbeitungsparameter. Ergebnisse aus Studien, bei denen weder Anpressdruck und Polierdauer festgelegt war [56] sind eingeschränkt aussagekräftig. Camacho et al. [57] prüften die Effektivität von Diamantpolierpasten. Alle Proben waren, anders als in der vorliegenden Arbeit, schon bis zur Hochglanzpolitur maschinell vorbehandelt.

Für jede Probe wurden neue, nicht verschlissene Polierer verwendet. Der Verschleißzustand könnte eine bedeutende Rolle spielen und sollte weitestgehend eliminiert werden.

Die Sof-Lex Scheiben unterliegen einem sehr raschen Verschleiß, der stark vom angewendeten Anpressdruck abhängt. Es erscheint wie eine automatische Limitation des Anpressdrucks durch Deformation. Belegt werden konnte das jedoch nicht, da mit dem Drucksensor keine aussagekräftige Bewertung möglich war.

Keine Erklärung konnte gefunden werden, weshalb in Längs- und Querrichtung die Reduktionsfaktoren variieren. Bezüglich der Diamanten und NTI Polierer liegen sie signifikant höher. Auch bei den Sof-Lex Scheiben traten Unterschiede auf. Die Proben wurden in keiner Vorzugsrichtung bearbeitet.

Im Hinblick auf die Effektivität von Diamantpolierpaste wäre es interessant gewesen alle Polituren mit Diamantpolierpaste zum Abschluss zu bringen, um die Aussage von Martinez-Gomis [58] zu bestätigen oder zu widerlegen. Dieser stellte fest, dass die Verwendung von Diamantpolierpaste nur R_{max} verringern könnte und somit zweifelhaft in ihrer Anwendung sei.

Im Optrafine System ist sie ein essentieller Bestandteil der Politur und zeigt eine signifikante Verringerung von R_{max} und R_z . Die Reihe Sof-Lex Scheiben + Diamantpolierpaste reduziert R_{max} hingegen nur sehr gering, dafür R_z signifikant. Der Grund könnte die geringe Korngröße von 1μ der feinsten Sof-Lex Scheibe sein, welche in der gleichen Größenordnung wie die Diamantpolierpaste liegt.

Auffällig ist die große Standardabweichung, beziehungsweise große Streuung der Messwerte im Vergleich zur Testvorrichtung. Die Proben wurden an unterschiedlichen Wochentagen und Tageszeiten bearbeitet, so wie es in der Praxis vorkommt, mit allen wechselnden Faktoren des Behandlers, wie zum Beispiel Motivation, Zeitdruck und Ermüdungszustand.

6.1.1 Diskussion der Testvorrichtung unter kontrollierten Bedingungen

Eine Vielzahl von Studien beschäftigt sich mit Polituren und deren vielfältigen Auswirkungen. Im Fokus steht häufig die Biegefestigkeit der Keramikproben vor und nach der Bearbeitung [5-9, 12], die Plaqueakkumulation [16] und ästhetische Komponenten, wie zum Beispiel der Glanz [61]. Über die Effektivität von Poliersystemen findet sich, wie oben schon erwähnt, wenig Literatur. Selten wurden standardisierte Parameter für die Oberflächenbearbeitung festgelegt, was Ahmad et al. ebenfalls erkannten. Angaben wie „leichter“, „keiner“ oder „geringer“ Druck bei der Politur [28, 40, 56, 57, 64] besitzen nur bedingte Aussagekraft für eine vergleichende Bewertung.

Die Anwendung von Poliermaschinen für die standardisierte Oberflächenbearbeitung ist in der Literatur wenig bekannt und wird von selten eingesetzt [65-67]. Die Oberflächenbeschaffenheit vor der Politur hat ebenfalls einen wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis nach der Bearbeitung. Im klinischen Alltag werden mit grobkörnigen Diamanten Defekte in der Keramikoberfläche verursacht, die selbst mit einem abrasiven Poliersystem meist nicht mehr vollständig eingeebnet werden können. In-vitro Studien benutzen häufig Sandpapierscheiben für die Vorphitur, was nicht unbedingt der klinischen Realität entspricht. Die oben aufgeführten Punkte machen einen objektiven Vergleich problematisch, wenn nicht unmöglich. Die wenigen Studien, die sich mit dieser Problematik beschäftigen haben, werden im weiteren Verlauf diskutiert.

Als erster verwendete Alkhiary et al. [39] ein Politurprotokoll, die aus klinischen Daten gewonnen wurden und wendete diese für seine Probenbearbeitung an.

Die Untersuchung von Ahmad et al. [12] übernahm das gleiche Politurprotokoll von Alkhiary et al.[39](2003). Die Proben wurden mit zwei verschiedenen Drehzahlen (10.000 und 20.000 U/min) bearbeitet. Anpressdrücke von 0,6 N; 1 N; 1,3 N wurden als angemessen betrachtet. Die Politurzeiten ergaben sich aus der Anzahl der Bearbeitungszyklen, für die gesamte Politur ca. 5 Minuten für alle drei Instrumente zusammen. Die Vorschubgeschwindigkeit wurde mit 499 mm/min festgelegt. In der vorliegenden Arbeit finden sich ähnliche Parameter. 20.000 U/min liegen für die Polierinstrumente über den Empfehlungen des Herstellers, das wird jedoch in praxi nicht immer exakt eingehalten. Pro Zwischenschritt wurden hier 3 ½ Minuten als ausreichend für eine sehr gute Politur eingeschätzt.

Schwer einschätzbar ist, warum eine so hohe Vorschubgeschwindigkeit gewählt wurde. Sie liegt etwa um den Faktor 10 höher liegt als in dieser Untersuchung.

Song et al. [42, 54, 55]stellten in eigenen Studien fest, dass in der klinischen Praxis ab 60 mm/min schon als zu schnell bewertet wurde. Diese Einschätzung kann durch unsere Erfahrung bestätigt werden.

Der Vorschubgeschwindigkeit schreibt Song et al. einen großen Stellenwert zu. Seine Ergebnisse zeigen, dass die oberflächennahen Defekte dabei signifikant zunahmen.

Ein weiteres Ergebnis von Ahmad et al. ist die Erkenntnis, dass bei doppelter Drehzahl (20.000 U/min) die Oberfläche zwar glatter wurde, die biaxiale Bruchfestigkeit jedoch signifikant abnahm. Es wurde mit der Bildung von zunehmenden Rissen in der Oberfläche gerechnet, ferner ist ein nicht kalkulierbarer Wärmeeintrag zu befürchten

De Jager et al. [38] kamen zu gegenteiligen Ergebnissen. Bei einer angewendeten Drehzahl von 80.000 U/min (!) stellte er fest, dass eine glattere Oberfläche, mit einer bruchfesteren Probe korrelierte. Vorschubgeschwindigkeit und Anpressdruck wurden jedoch nicht erwähnt.

Giordano et al. [6] berichteten über eine signifikante Steigerung der Biegefestigkeit um 15% bis 30% nach Polituren von keramischen Proben. Sie verwendeten eine industrielle Poliermaschine mit einer Anpresskraft von 680 N (!) und die Rotationsgeschwindigkeit bei 350 U/min, die jedoch wenig aussagekräftig ist, weil der Durchmesser des Polierinstruments nicht bekannt ist.

Die Arbeitsgruppe von Curry et al. machte bezüglich des Wärmeeintrags in das Material eine sehr interessante Untersuchung. Er konnte mittels einer Infrarotkamera Temperaturen um die 3000 K feststellen, während der Bearbeitung von MgO-ZrO₂ Keramiken mit SiC Schleifscheiben und Wasserkühlung. Auch wenn die Bedingungen und Materialien deutlich von der hier vorgestellten Testvorrichtung abweichen, ist dieser Punkt wichtig und sollte in einer weiterführenden Studie untersucht werden.

Heintze et al. [61] stellte die Hypothese auf, dass Glanz und Oberflächenrauheit eine Funktion des Anpressdrucks und Polierzeit darstellt. Dazu polierte er einheitlich ange-raute Keramikscheiben für 30 Sekunden je Arbeitsschritt mit einem Anpressdruck von 2 N und 4 N. Die Drehzahl wurde auf 10.000 U/min festgelegt. Weshalb diese Einstellung

der Parameter erfolgte, wurde nicht deutlich. Er kam zu der Schlussfolgerung, dass bei 4 N eine höhere Rauheit entstand, als bei 2 N. In klinische Anwendungen erscheinen 4 N die obere Grenze zu sein, können jedoch problemlos erreicht, vermutlich sogar überschritten werden. Song et al. erreichte bei der 60 mm/min Vorschubgeschwindigkeit 3,6 N.

Die älteste gefundene Literaturstelle, die von einem definierten Anpressdruck spricht, setzt sich mit der Oberflächenrauheit von dentalen Materialien mit Prophylaxe- und Polierpasten auseinander. Der Anpressdruck wurde mit 2 N angegeben, aber nicht erläutert, weshalb er so gewählt wurde. Eine Abweichung von $\pm 0,25$ N konnten von der Versuchsperson nur mit Mühen über einen Zeitraum von 45 Sekunden bei 120 U/min gehalten werden. Die vergleichbar geringe Drehzahl ist bei diesen Polituren üblich, genauso wie die festgelegte Zeit, die für einen zu reinigenden Zahn realistisch einzustufen ist. Für die vorliegende Studie ist das von geringerer Relevanz.

6.1.2 Bewertung der optimalen Politur mit der Testvorrichtung und der optimalen Politur der Handversuche

Die Handversuche mit den geringsten erzielten Rauheiten sollen mit denen der maschinell möglichen Politur verglichen werden. Als Parameter sollen sowohl R_{max} , als auch R_z herangezogen werden. Unter der Versuchsreihe der Handpolituren lassen sich mit dem Optrafine System die geringsten Oberflächenrauheiten erreichen. Bei der maschinellen Bearbeitung erzeugt das NTI System geringere Messwerte. Beide Poliersysteme bedienen sich anderer Konzepte und zwar insofern, dass die letzte Politurstufe der Optrafine Polierer mittels Polyamidbürstchens und Diamantpolierpaste realisiert wird, während das NTI System einen gummiähnlichen Träger besitzt.

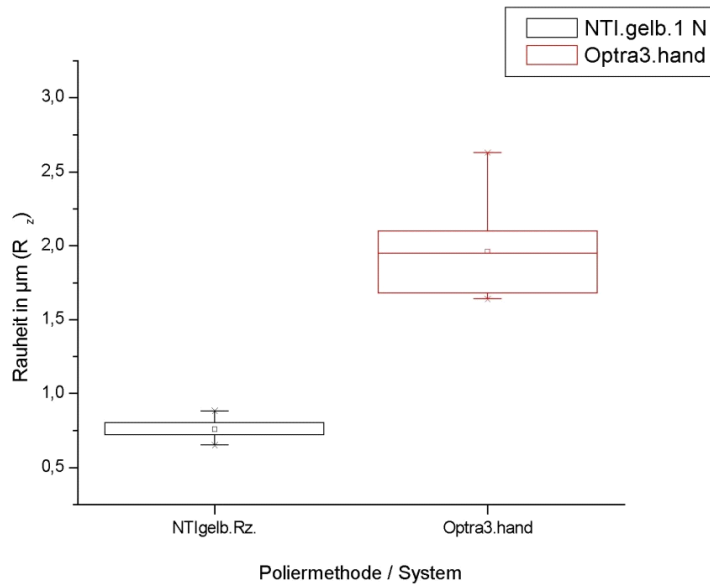


Abb. 6.1: Diagramm Gegenüberstellung optimale Hand-/Maschinenpolitur

Wie aus der Abbildung 6.1 zu erkennen ist, sind signifikante Unterschiede in den Ergebnissen der jeweiligen Poliermethode vorhanden. Es stellt sich die Frage, ob die Verwendung von Polierbürstchen plus Diamantpolierpaste generell einen Vorteil bei Handpolituren bietet und die nur zweistufige Körnung der Polierer kompensiert. Das die maschinelle Bearbeitung mit festen, beziehungsweise wenig flexiblen Trägermaterialien grundsätzlich bessere Politurergebnisse bringt ist, ist durchaus erklärbar. In der Testvorrichtung ließ sich zwar auch mit dem Polyamidbürstchen ein definierter Druck applizieren, jedoch musste häufig nachjustiert werden, weil das Bürstchen mit der Zeit stark deformiert wurde. Eventuell konnte deshalb kein optimales Ergebnis erzielt werden. Obwohl das Bürstchen in einem festen Winkel von ca. 45° montiert war kamen nicht alle Borstenflächen mit der Probe innig in Kontakt.

6.2 Schleif- und Poliermethodik unter Berücksichtigung des gewählten Anpressdrucks

In der Testvorrichtung sind reproduzierbare Schleif- und Polierbewegungen in y-Achse möglich. Sie beschränken sich auf ziehende und schiebende Bewegungen. Schiebend gegen die Rotationsbewegung, ziehend mit der Rotationsrichtung des Schleifers. Diese Bewegungen sind in praxi zwar üblich, jedoch kann die Komplexität einer Handpolitur in einer Testvorrichtung nur begrenzt wiedergegeben werden.

Es handelt sich um eine limitierte Bewegung unabhängig von äußeren Bedingungen, was ausdrücklich in dieser Untersuchung beabsichtigt ist.

In der vorliegenden Arbeit wurden drei verschiedene Stufen des Anpressdrucks festgelegt, die sich nach jeder Stufe jeweils um den Faktor 2 erhöht. Die drei Stufen von 0,5 N, 1 N und 2 N spiegeln keinesfalls das ganze Spektrum wieder, welches in der Praxis vorkommt.

Wie sich in den Messwerten zeigt, sind bei 1 N die geringsten Rauheiten festgestellt worden. Keinesfalls ist jedoch die Aussage zutreffend, dass dieser Anpressdruck von 1 N das tatsächliche Optimum für den jeweiligen Polierer darstellt. Einen Überblick mit eindeutiger Tendenz für eine sinnvolle Druckapplikation gewinnt man mit den drei Kräften.

Herstellen wie NTI, fis und Komet [45, 46](Lit.stellen!) weisen in ihren Datenblättern darauf hin, dass eine Druckapplikation von mehr als 2 N zu vermeiden ist. In dem Datenblatt der Firma fis wird bei überhöhtem Anpressdruck von gleichem Materialabtrag bei zunehmender Erwärmung gesprochen.

Für den Grünringdiamanten stellte sich die 2 N Messreihe als problematisch dar, da der Substanzabtrag enorm und der eingesetzte Keramikblock zu dünn war. Die Schleifzyklen mussten hier auf 3 reduziert werden, um eine Beschädigung der Apparatur zu vermeiden. Einen Einfluss auf die Messwerte ist hierbei nicht auszuschließen.

6.3 Messverfahren

Die bearbeiteten Keramikblöcke werden fest in eine Haltevorrichtung eingespannt und je drei Längs- sowie drei Quermessungen vorgenommen. Die Ausrichtung erfolgt dabei nach Augenmaß. Besonders bei den groben Schleifern und Polierern traten Rillen entlang der Vorschubrichtung der Instrumente auf. Bewegt sich der Konus der Messeinrichtung nicht exakt parallel zur Rotationsrichtung des Instruments, sind erhöhte Messwerte der Rauheit wahrscheinlich, da der Messkonus über „Täler und Berge“ fährt. Als nicht sinnvoll haben sich dabei die Quermessungen erwiesen, wo die „Täler und Berge“ vom Konus überfahren wurden.

Bei den Handversuchen wurde ein Schnellläufer, beziehungsweise ein Reduzierstück und in der Testvorrichtung ein Zahntechnikerhandstück verwendet. Die Diamantschleifer werden praxisüblich höchsttourig eingesetzt. Die Testvorrichtung lieferte hingegen maximal 10.000 U/min. Die Verschleißerscheinungen sind im letzteren Fall geringer, was die Diamantschleifer betrifft. Die Drehzahl hat auf die keramische Probe einen unmittelbaren Einfluss hinsichtlich der Wärmeentwicklung. (Shih). Yin und Song benutzten für ihre Studien eine Turbinenwinkelstück mit etwa 400.000 U/min im unbelasteten Zustand. Unter Last sank die Drehzahl um etwa 5%. Das zahnärztliche Reduzierstück und der Technikermotor besitzen deutlich mehr Drehmoment, was direkte Auswirkung auf die spezifisch aufgewendete Energie hat [68].

Der Schnellläufer bei den Handversuchen besitzt einen dreistrahligen Wasserspray, die Spraydüsen sind jeweils im 120° Winkel angebracht. Die Testvorrichtung weist nur einen einzelnen Wasserstrahl auf, ähnlich wie es bei der Turbine in den Versuchsanordnungen von Yin und Song der Fall ist. Die oben genannte Tatsache hat nicht nur einen Einfluss auf die Kühlung des Schleifers, sondern auch einen Effekt bezüglich des Abtransports von Schleifpartikeln. Schleifpartikel, die das Schleifinstrument verschmieren können den Instrumentenverschleiß erhöhen [44, 69].

Die verwendeten Schleif- und Poliersysteme zeigten besonders bei der höchsten Druckapplikation einen hohen Verschleiß. Der massive Substanzabtrag führte zu einem stetigen Abfall des angezeigten Anpressdruckes. Eine kontinuierliche manuelle Neujustierung war erforderlich, ein zu jedem Zeitpunkt konstanter Anpressdruck war nicht realisierbar. Gerade der steigende Anpressdruck hat bei den grobkörnigen Schleifern einen Einfluss auf die produzierte Rauheit. In welcher Größenordnung sich die Schwankungen des Anpressdruckes bewegen, ist nicht verifizierbar.

Eine weitere Fehlerquelle ist das undefinierte Durchbiegen des Schleifers beziehungsweise des Polierers während der Bearbeitung. Dieser Effekt erhöht sich mit steigendem Anpressdruck.

Die groben Schleifer und Polierer hinterließen eine erhebliche, makroskopische Stufenbildung, bedingt durch den hohen Substanzabtrag. Die erzeugten Stufen entsprachen in der Breite jeweils dem Versatz der Schleifer und Polierer in y-Richtung nach jedem durchlaufenen Zyklus.

Neben der kühlenden Funktion des Wassers, findet ferner ein Abtransport der Schleifpartikel statt. Trotz der ständigen Berieselung mit der empfohlenen Wassermenge, setzte ein Verschmieren beziehungsweise ein Zusetzen des Schleifers ein, welches den Abtrag und dann auch die Rautiefen verringert.

Alle Keramikblöcke wurden nach ihrer Politur kurz und kräftig mit Wasserspray und Druckluft gereinigt. Verbliebene Keramikpartikel und Reste von Bestandteilen der Polierkörper sind auf den Proben dennoch vorhanden. Die REM Aufnahmen belegen das anschaulich. Nach dem Einsatz von Diamantpolierpaste zeigte sich eine stark wasserabweisende, glänzende Schicht, welche einen Einfluss auf die Oberflächenrauheit haben könnte. Dieser Effekt ist jedoch nicht messbar und könnte auf einem "Zuschmieren" von Poren beruhen.

7 Zusammenfassung

Dentalkeramiken müssen häufig nach der Insertion eingeschliffen werden. Bei chairside hergestellten Versorgungungen ist eine nachträgliche Politur stets erforderlich. Das geschieht in der Regel mit Feinkorndiamanten und einem meist mehrstufigen, abgestimmten Poliersystem. Eine klinische Beurteilung der Politur ist kaum möglich, der Oberflächenglanz allein gibt keine sichere Auskunft, ob die Politur erfolgreich war.

In der vorliegenden Arbeit wurde eine Feldspatkeramik einmal mit Hand und einmal maschinell mit drei verschiedenen, definierten Anpressdrücken (0,5 N; 1 N; 2 N) bearbeitet. Dieser Druckbereich wurde nach Literaturrecherchen festgelegt. Deutlich höhere Kräfte sind jedoch auch möglich.

Im Bereich des klinisch realistischen Andrucks, der während des intraoralen Beschleifens auftritt, wurde eigens dafür eine Testvorrichtung entwickelt. Mit dieser konnte unter konstanten Bedingungen die Keramikoberfläche bearbeitet werden. So konnte ein Vergleich zwischen definiertem Druck und Handpolitur hergestellt und die verwendeten Poliersysteme in ihrer Effizienz beurteilt werden. Ausgenommen davon waren die SofLex Scheiben.

Die eingesetzten Poliersysteme sind geeignet, keramischen Oberflächen in klinisch relevantem Umfang zu polieren. Die erreichte Verringerung der Rauheit kann dem einer Glasur gleichkommen.

Mit einigen Ausnahmen, lagen die Rauheiten nach der Politur in der Testvorrichtung unter denen der Handversuche. Das war zu vermuten und wurde auch in der bisherigen Literatur bestätigt.

Wiederum konnten auch in den Handversuchen Ergebnisse erzielt werden, die eine effiziente Hochglanzpolitur im Mund erlauben. Das ist von ganz entscheidender Bedeutung für den Einsatz von CAD/CAM-Systemen, wo eine maschinell ausgearbeitete Oberfläche nach adhäsiver Insertion im Mund poliert wird. Aber auch die notwendigen Einschleifmaßnahmen auf glasierten Keramikoberflächen bedingen eine intraorale Politur.

Ob die in Publikationen und von Herstellern empfohlenen Anpressdrücke optimal sind, konnte in dieser Arbeit nicht berücksichtigt werden und sollte Gegenstand weiterer Untersuchungen werden.

Ebenfalls ist es denkbar, dass die Art der Kühlung (Spray, Berieselung oder ohne Wasser) von Bedeutung, sowohl für die Effizienz als auch für thermischer Risiken ist. Auch hier wären ergänzende Experimente interessant.

Bezüglich der unterschiedlichen Poliersysteme konnten signifikante Unterschiede festgestellt werden.

Mit Sof-Lex Discs wurden die geringsten Rauheiten erreicht (nur Handversuch möglich). Die Scheiben haben einen Aluminiumoxid-Polierkörper in vier verschiedenen Korngrößen.

Bei den Gummipolierern wurden etwa gleich gute Ergebnisse, sowohl mit dem dreifach als auch mit zweifach abgestuften Diamantkorn erzielt, wenn bei letzterem mit einer Diamantpolierpaste nachpoliert wurde.

Literaturverzeichnis

1. Tinschert, J., et al., *Fracture resistance of lithium disilicate-, alumina-, and zirconia-based three-unit fixed partial dentures: a laboratory study*. Int J Prosthodont, 2001. **14**(3): p. 231-8.
2. Reiss, B., *Long-term clinical performance of CEREC restorations and the variables affecting treatment success*. Compend Contin Educ Dent, 2001. **22**(6 Suppl): p. 14-8.
3. Ritter, A.V. and M.F. Nunes, *Longevity of ceramic inlays/onlays: Part II*. J Esthet Restor Dent, 2003. **15**(1): p. 60-3.
4. Ritter, A.V., M.F. Nunes, and E.J. Swift, Jr., *Longevity of ceramic inlays/onlays, Part I*. J Esthet Restor Dent, 2002. **14**(6): p. 377-9.
5. Anusavice, K.J. and B. Hojjatie, *Effect of thermal tempering on strength and crack propagation behavior of feldspathic porcelains*. J Dent Res, 1991. **70**(6): p. 1009-13.
6. Giordano, R.A., 2nd, S. Campbell, and R. Pober, *Flexural strength of feldspathic porcelain treated with ion exchange, overglaze, and polishing*. J Prosthet Dent, 1994. **71**(5): p. 468-72.
7. Williamson, R.T., R.E. Kovarik, and R.J. Mitchell, *Effects of grinding, polishing, and overglazing on the flexure strength of a high-leucite feldspathic porcelain*. Int J Prosthodont, 1996. **9**(1): p. 30-7.
8. Chu, F.C., N. Frankel, and R.J. Smales, *Surface roughness and flexural strength of self-glazed, polished, and reglazed In-Ceram/Vitadur Alpha porcelain laminates*. Int J Prosthodont, 2000. **13**(1): p. 66-71.
9. Guazzato, M., et al., *Influence of grinding, sandblasting, polishing and heat treatment on the flexural strength of a glass-infiltrated alumina-reinforced dental ceramic*. Biomaterials, 2004. **25**(11): p. 2153-60.
10. Kitazaki, H., et al., *Effect of amount of grinding on flexural strength of dental ceramics*. J Med Dent Sci, 2001. **48**(1): p. 7-13.
11. Sindel, J., et al., *Evaluation of subsurface damage in CAD/CAM machined dental ceramics*. J Mater Sci Mater Med, 1998. **9**(5): p. 291-5.
12. Ahmad, R., et al., *An evaluation of the effects of handpiece speed, abrasive characteristics, and polishing load on the flexural strength of polished ceramics*. J Prosthet Dent, 2005. **94**(5): p. 421-9.
13. Fairhurst, C.W., et al., *The effect of glaze on porcelain strength*. Dent Mater, 1992. **8**(3): p. 203-7.
14. Ghazal, M. and M. Kern, *The influence of antagonistic surface roughness on the wear of human enamel and nanofilled composite resin artificial teeth*. J Prosthet Dent, 2009. **101**(5): p. 342-9.
15. Monasky, G.E. and D.F. Taylor, *Studies on the wear of porcelain, enamel, and gold*. J Prosthet Dent, 1971. **25**(3): p. 299-306.
16. Bollen, C.M., et al., *The influence of abutment surface roughness on plaque accumulation and peri-implant mucositis*. Clin Oral Implants Res, 1996. **7**(3): p. 201-11.
17. Jones, C.S., R.W. Billington, and G.J. Pearson, *The in vivo perception of roughness of restorations*. Br Dent J, 2004. **196**(1): p. 42-5; discussion 31.
18. Wirz, J., K. Jager, and F. Schmidli, *[The polishing of ceramic surfaces]*. Schweiz Monatsschr Zahnmed, 1987. **97**(7): p. 906-14.

19. [Alexis Duchateau, pharmacist, inventor of porcelain teeth]. *Rev Odontostomatol (Paris)*, 1974. **3**(5): p. 423-6.
20. Gatzka, K., [Not Available]. *Zahnarztl Welt*, 1949. **4**(4): p. 83-8.
21. van Dijken, J.W., *All-ceramic restorations: classification and clinical evaluations*. *Compend Contin Educ Dent*, 1999. **20**(12): p. 1115-24, 1126 passim; quiz 1136.
22. Gaglio, M.A., *Esthetic restorations designed with confidence and predictability*. *Compend Contin Educ Dent*, 2001. **22**(6 Suppl): p. 30-4.
23. Hayashi, M., et al., *Systematic review of ceramic inlays*. *Clin Oral Investig*, 2003. **7**(1): p. 8-19.
24. Blatz, M.B., *Long-term clinical success of all-ceramic posterior restorations*. *Quintessence Int*, 2002. **33**(6): p. 415-26.
25. Perry, R.D. and G. Kugel, *Success with inlays/onlays: the seven essentials*. *Compend Contin Educ Dent*, 2002. **23**(3 Suppl 1): p. 30-5.
26. van Dijken, J.W., et al., *Restorations with extensive dentin/enamel-bonded ceramic coverage. A 5-year follow-up*. *Eur J Oral Sci*, 2001. **109**(4): p. 222-9.
27. Roulet, J.F., *Benefits and disadvantages of tooth-coloured alternatives to amalgam*. *J Dent*, 1997. **25**(6): p. 459-73.
28. van Dijken, J.W. and I.E. Ruyter, *Surface characteristics of posterior composites after polishing and toothbrushing*. *Acta Odontol Scand*, 1987. **45**(5): p. 337-46.
29. Hickel, R. and J. Manhart, *Longevity of restorations in posterior teeth and reasons for failure*. *J Adhes Dent*, 2001. **3**(1): p. 45-64.
30. Scheibenbogen, A., et al., *One-year clinical evaluation of composite and ceramic inlays in posterior teeth*. *J Prosthet Dent*, 1998. **80**(4): p. 410-6.
31. Qin, F., et al., *Evaluation of machinability and flexural strength of a novel dental machinable glass-ceramic*. *J Dent*, 2009. **37**(10): p. 776-80.
32. Krejci, I., F. Lutz, and M. Reimer, *Wear of CAD/CAM ceramic inlays: restorations, opposing cusps, and luting cements*. *Quintessence Int*, 1994. **25**(3): p. 199-207.
33. Di Rocco, D., [Use of the CEREC system in dental practices. Esthetic reconstruction of the anterior teeth--a case report]. *Schweiz Monatsschr Zahnmed*, 2009. **119**(7): p. 717-29.
34. Christensen, G.J., *Esthetic dentistry-2008*. *Alpha Omegan*, 2008. **101**(2): p. 69-70.
35. Ivoclar, *Report Nr. 6, in Nr.6*. 1990.
36. Mecholsky, J., *Effect of grinding on flaw geometry and fracture of glass*. *J Am Dent Assoc*, 1977. **60**(3): p. 114-7.
37. Dalkiz, M., C. Sipahi, and B. Beydemir, *Effects of six surface treatment methods on the surface roughness of a low-fusing and an ultra low-fusing feldspathic ceramic material*. *J Prosthodont*, 2009. **18**(3): p. 217-22.
38. de Jager, N., A.J. Feilzer, and C.L. Davidson, *The influence of surface roughness on porcelain strength*. *Dent Mater*, 2000. **16**(6): p. 381-8.
39. Alkhiary, Y.M., S.M. Morgano, and R.A. Giordano, *Effects of acid hydrolysis and mechanical polishing on surface residual stresses of low-fusing dental ceramics*. *J Prosthet Dent*, 2003. **90**(2): p. 133-42.
40. Krejci, I., F. Lutz, and R. Boretti, *Resin composite polishing--filling the gaps*. *Quintessence Int*, 1999. **30**(7): p. 490-5.
41. Albakry, M., M. Guazzato, and M.V. Swain, *Effect of sandblasting, grinding, polishing and glazing on the flexural strength of two pressable all-ceramic dental materials*. *J Dent*, 2004. **32**(2): p. 91-9.
42. Song, X.F. and L. Yin, *Subsurface damage induced in dental resurfacing of a feldspar porcelain with coarse diamond burs*. *J Biomech*, 2009. **42**(3): p. 355-60.

43. Freesmeyer, W.B., *Klinische Prothetik Band 1*. 1995.
44. Siegel, S.C. and J.A. von Fraunhofer, *Dental cutting with diamond burs: heavy-handed or light-touch?* J Prosthodont, 1999. **8**(1): p. 3-9.
45. NTI-Kahla, G., *Anwendungshinweise für rotierende zahnärztliche und chirurgische Instrumente*.
46. fis, B.E.
47. Roulet, J.F. and T.K. Roulet-Mehrens, *The surface roughness of restorative materials and dental tissues after polishing with prophylaxis and polishing pastes*. J Periodontol, 1982. **53**(4): p. 257-66.
48. Roulet-Mehrens, T. and J.F. Roulet, *Smoke stain accumulation on restorative dental materials and hard tooth tissues after polishing with prophylaxis pastes*. SSO Schweiz Monatsschr Zahnheilkd, 1982. **92**(5): p. 487-96.
49. Yin, L., et al., *Surface integrity and removal mechanism in simulated dental finishing of a feldspathic porcelain*. J Biomed Mater Res B Appl Biomater, 2006. **79**(2): p. 365-78.
50. Yin, L., *Abrasive machining of glass-infiltrated alumina with diamond burs*. Mach Sci Technol, 2001. **5**: p. 43-61.
51. Yin, L., *Abrasive machining of porcelain and zirconia with a dental handpiece*. Wear, 2003. **255**: p. 975-989.
52. Yin, L., *Effects of fluids on the simulated clinical dental machining of a glass ceramic*. J Am Ceram Soc, 2004. **87**: p. 173-175.
53. Dong, X., *Abrasive machining of glass-ceramics with a dental handpiece*. Mach Sci Technol, 2000. **4**: p. 209-233.
54. Song, X.F., et al., *Micro-fine finishing of a feldspar porcelain for dental prostheses*. Med Eng Phys, 2008. **30**(7): p. 856-64.
55. Song, X.F., et al., *In vitro rapid intraoral adjustment of porcelain prostheses using a high-speed dental handpiece*. Acta Biomater, 2008. **4**(2): p. 414-24.
56. Giampaolo, E.T., et al., *Different methods of finishing and polishing enamel*. J Prosthet Dent, 2003. **89**(2): p. 135-40.
57. Camacho, G.B., et al., *Surface roughness of a dental ceramic after polishing with different vehicles and diamond pastes*. Braz Dent J, 2006. **17**(3): p. 191-4.
58. Martinez-Gomis, J., et al., *Comparative evaluation of four finishing systems on one ceramic surface*. Int J Prosthodont, 2003. **16**(1): p. 74-7.
59. Pistorius, A., *Zum Einfluss von rotierendem Präparationsinstrumentarium auf die Oberflächenbeschaffenheit von humanem Zahnschmelz*. Deutsche Zahnärztliche Zeitschrift, 2006. **61**(4).
60. Bronson, M.R., T.J. Lindquist, and D.V. Dawson, *Clinical acceptability of crown margins versus marginal gaps as determined by pre-doctoral students and prosthodontists*. J Prosthodont, 2005. **14**(4): p. 226-32.
61. Heintze, S.D., M. Forjanic, and V. Rousson, *Surface roughness and gloss of dental materials as a function of force and polishing time in vitro*. Dent Mater, 2006. **22**(2): p. 146-65.
62. Peterson, I.M., et al., *Mechanical characterization of dental ceramics by hertzian contacts*. J Dent Res, 1998. **77**(4): p. 589-602.
63. Deng, Y., B.R. Lawn, and I.K. Lloyd, *Characterization of damage modes in dental ceramic bilayer structures*. J Biomed Mater Res, 2002. **63**(2): p. 137-45.
64. Hoelscher, D.C., et al., *The effect of three finishing systems on four esthetic restorative materials*. Oper Dent, 1998. **23**(1): p. 36-42.

65. Turkun, L.S. and M. Turkun, *The effect of one-step polishing system on the surface roughness of three esthetic resin composite materials*. Oper Dent, 2004. **29**(2): p. 203-11.
66. Tate, W.H., E.J. DeSchepper, and T. Cody, *Quantitative analysis of six composite polishing techniques on a hybrid composite material*. J Esthet Dent, 1992. **4 Suppl**: p. 30-2.
67. Chung, K.H., *Effects of finishing and polishing procedures on the surface texture of resin composites*. Dent Mater, 1994. **10**(5): p. 325-30.
68. Hwang, T.W., *Size effect for specific energy in grinding of silicon nitride*. Wear, 1999. **225-229**: p. 862-867.
69. Siegel, S.C. and J.A. von Fraunhofer, *The effect of handpiece spray patterns on cutting efficiency*. J Am Dent Assoc, 2002. **133**(2): p. 184-8.

Anhang

Anhangsverzeichnis

	<u>Seite</u>
Tab. 5.1:	X
Tab. 5.2	X
Tab. 5.3	XI
Tab. 5.4	XI
Tab. 5.5	XI
Tab. 5.6	XII
Tab. 5.7	XII
Tab. 5.8	XIII
Tab. 5.9	XIII
Tab. 5.10	XIV
Tab. 5.11	XIV
Tab. 5.12	XV
Tab. 5.13	XV
Tab. 5.15	XVI
Tab. 5.16	XVII
Tab. 5.17	XVII
Tab. 5.18:	XVIII
Tab. 5.19:	XVIII
Tab. 5.20:	XIX
Tab. 5.21	XIX
Tab. 5.22:	XX
Tab. 5.23:	XX
Tab. 5.24:	XXI
Tab. 5.25:	XXI
Tab. 5.26:	XXII
Tab. 5.27:	XXII
Tab. 5.28:	XXIII
Tab. 5.29:	XXIII

Tabellen aus dem Ergebnisteil

Tab. 5.1:

Schleifer/Polierer	Rmax längs	Rmax quer	Rz längs	Rz quer
Diamant				
grün	24,88 ± 5,4	30,04 ± 5,4	18,68 ± 3,32	20,7 ± 3,01
rot	14,07 ± 4,93	10,1 ± 1,97	11,88 ± 4,45	7,21 ± 1,39
gelb	9,09 ± 3,02	3,01 ± 0,71	8 ± 3,02	2,94 ± 0,79

Tab. 5.2

Schleifer/Polierer	Rmax längs	Rmax quer	Rz längs	Rz quer
Sof-Lex				
Grob	4,29 ± 2,56	4,38 ± 1,99	2,02 ± 0,49	2,02 ± 0,34
Mittel	3,09 ± 1,11	2,8 ± 1,32	1,98 ± 0,7	1,98 ± 0,53
Fein	1,9 ± 0,87	2,01 ± 0,6	1,31 ± 0,44	1,27 ± 0,45
Superfein	1,11 ± 0,29	1,08 ± 0,31	0,87 ± 0,2	0,91 ± 0,23
Superfein+Diam.pol.paste	0,93 ± 0,24	1,01 ± 0,4	0,7 ± 0,13	0,68 ± 0,11

Tab. 5.3

Schleifer/Polierer	Rmax längs	Rmax quer	Rz längs	Rz quer
Ceraglaze				
grob	8,73 ± 1,71	6,01 ± 0,71	7,22 ± 0,77	5,81 ± 0,6
mittel	5,06 ± 0,72	4,23 ± 0,4	4,24 ± 0,55	3,25 ± 0,09
fein	3,05 ± 0,42	2,38 ± 0,4	2,81 ± 0,23	2,71 ± 0,09

Tab. 5.4

Schleifer/Polierer	Rmax längs	Rmax quer	Rz längs	Rz quer
Optrafine				
1 hellblau	4,16 ± 0,49	3,28 ± 0,46	3,48 ± 0,27	2,63 ± 0,24
2 dunkelblau	3,33 ± 0,33	2,42 ± 0,38	2,68 ± 0,18	1,96 ± 0,26
Nylonbürste+Paste	2,46 ± 0,43	1,81 ± 0,45	1,96 ± 0,32	1,29 ± 0,25

Tab. 5.5

Schleifer/Polierer	Rmax längs	Rz längs	Rmax quer	Rz quer
Diamant grün 0,5 N	32,09 ± 5,2	18,68 ± 4,14	36,31 ± 5,74	22,18 ± 3,51
Diamant grün 1 N	36,74 ± 6,53	26,77 ± 3,49	37,21 ± 4,9	25,24 ± 3,25
Diamant grün 2 N	33,5 ± 10,18	22,32 ± 4,64	30,34 ± 6,04	20,74 ± 1,5

Tab. 5.6

Rmax längs	Schleifer/Polierer	Rz längs	Rmax quer	Rz quer
12,17 ± 1,41	Diamant rot 0,5 N	8,78 ± 0,77	41,03 ± 6,81	29,18 ± 4,84
16,7 ± 3,8	Diamant rot 1 N	10,66 ± 1,35	43,84 ± 9,01	29,96 ± 2,72
12,85 ± 4,57	Diamant rot 2 N	8,85 ± 1,87	39,44 ± 6,44	25,62 ± 3,48

Tab. 5.7

Schleifer/Polierer	Rmax längs	Rz längs	Rmax quer	Rz quer
Diamant gelb 0,5 N	3,02 ± 0,81	2,28 ± 0,2	27,43 ± 6,8	19,98 ± 5,4
Diamant gelb 1 N	2,78 ± 1,22	1,97 ± 0,42	37,58 ± 6,91	23,73 ± 3,76
Diamant gelb 2 N	2,88 ± 0,71	2,29 ± 0,44	42,61 ± 6,1	32,38 ± 9,5

Tab. 5.8

Schleifer/Polierer	Rmax längs	Rz längs	Rmax quer	Rz quer
Ceraglaze grob 0,5 N	$4,11 \pm 0,63$	$3,28 \pm 0,38$	$8,81 \pm 0,5$	$6,6 \pm 0,53$
Ceraglaze grob 1 N	$4,14 \pm 0,34$	$3,37 \pm 0,23$	$7,11 \pm 0,49$	$5,55 \pm 0,35$
Ceraglaze grob 2 N	$3,87 \pm 0,36$	$3,29 \pm 0,24$	$8,59 \pm 1,32$	$5,83 \pm 0,57$

Tab. 5.9

Schleifer/Polierer	Rmax längs	Rz längs	Rmax quer	Rz quer
Ceraglaze mittel 0,5 N	$2,66 \pm 0,17$	$2,21 \pm 0,19$	$11,8 \pm 1,53$	$6,31 \pm 0,47$
Ceraglaze mittel 1 N	$2,8 \pm 0,17$	$2,37 \pm 0,15$	$5,07 \pm 0,45$	$4,22 \pm 0,23$
Ceraglaze mittel 2 N	$2,94 \pm 0,2$	$2,53 \pm 0,21$	$5,34 \pm 1,39$	$3,83 \pm 0,65$

Tab. 5.10

Schleifer/Polierer	Rmax längs	Rz längs	Rmax quer	Rz quer
Ceraglaze fein 0,5 N	1,28 ± 0,16	0,99 ± 0,15	11,8 ± 0,66	6,31 ± 0,46
Ceraglaze fein 1 N	0,92 ± 0,1	0,76 ± 0,07	5,07 ± 0,26	4,22 ± 0,22
Ceraglaze fein 2 N	2,02 ± 0,25	1,67 ± 0,27	5,34 ± 0,31	3,83 ± 0,18

Tab. 5.11

Schleifer/Polierer	Rmax längs	Rz längs	Rmax quer	Rz quer
OptraFine 1 0,5 N	3,17 ± 0,44	2,61 ± 0,2	5,38 ± 0,88	4,23 ± 0,49
OptraFine 1 1 N	4,59 ± 0,44	3,59 ± 0,25	6,23 ± 0,51	5,18 ± 0,47
OptraFine 1 2 N	4,04 ± 0,4	3,43 ± 0,19	4,42 ± 0,45	3,47 ± 0,21

Tab. 5.12

Schleifer/Polierer	Rmax längs	Rz längs	Rmax quer	Rz quer
OptraFine 2 0,5 N	2,92 ±0,41	2,15 ±0,31	2,47 ±0,36	1,86 ±0,31
OptraFine 2 1 N	3,39 ±0,36	2,72 ±0,3	3,3 ±0,65	2,58 ±0,26
OptraFine 2 2 N	3,69 ±0,51	2,87 ±0,26	3,8 ±0,6	2,99 ±0,45

Tab. 5.13

Schleifer/Polierer	Rmax längs	Rz längs	Rmax quer	Rz quer
OptraFine 3 0,5 N	1,78 ±0,36	1,25 ±0,18	1,62 ±0,29	1,16 ±0,19
OptraFine 3 1 N	1,17 ±0,19	0,82 ±0,11	1,04 ±0,19	0,79 ±0,08
OptraFine 3 2 N	1,3 ±0,29	0,83 ±0,11	1,32 ±0,21	1,08 ±0,17

Tab. 5.14

Bearbeitungsinstrument	Reduktion in [%]
Diamant grün/rot längs/Rmax	
Hand	43
0,5 N	62
1 N	50
2 N	62
Diamant rot/gelb	
Hand	35
0,5 N	75
1 N	83
2 N	78

Tab. 5.15

Bearbeitungsinstrument	Reduktion in [%]
Diamant grün/rot längs/Rz	
Hand	37
0,5 N	62
1 N	60
2 N	60
Diamant rot/gelb	
Hand	33
0,5 N	74
1 N	81
2 N	74

Tab. 5.16

Bearbeitungsinstrument	Reduktion in [%]
Diamant grün/rot quer/Rmax	
Hand	66
0,5 N	-13
1 N	-18
2 N	-30
Diamant rot/gelb	
Hand	61
0,5 N	33
1 N	14
2 N	-8

Tab. 5.17

Bearbeitungsinstrument	Reduktion in [%]
Diamant grün/rot quer/Rz	
Hand	65
0,5 N	-32
1 N	-18
2 N	-24
Diamant rot/gelb	
Hand	59
0,5 N	31
1 N	21
2 N	-26

Tab. 5.18:

Bearbeitungsinstrument	Reduktion in [%]
Ceraglaze grob/mittel längs/Rmax	
Hand	42
0,5 N	35
1 N	32
2 N	24
Ceraglaze mittel/fein	
Hand	40
0,5 N	52
1 N	67
2 N	31

Tab. 5.19:

Bearbeitungsinstrument	Reduktion in [%]
Ceraglaze grob/mittel längs/Rz	
Hand	36
0,5 N	33
1 N	30
2 N	23
Ceraglaze mittel/fein	
Hand	44
0,5 N	55
1 N	68
2 N	34

Tab. 5.20:

Bearbeitungsinstrument	Reduktion in [%]
Ceraglaze grob/mittel quer/Rmax	
Hand	41
0,5 N	-33
1 N	29
2 N	38
Ceraglaze mittel/fein	
Hand	53
0,5 N	54
1 N	51
2 N	40

Tab. 5.21

Bearbeitungsinstrument	Reduktion in [%]
Ceraglaze grob/mittel quer Rz	
Hand	44
0,5 N	4
1 N	24
2 N	34
Ceraglaze mittel/fein	
Hand	52
0,5 N	37
1 N	56
2 N	32

Tab. 5.22:

Bearbeitungsinstrument	Reduktion in [%]
Optrafine grob/mittel längs/Rmax	
Hand	20
0,5 N	8
1 N	26
2 N	9
Optrafine mittel/fein	
Hand	27
0,5 N	39
1 N	65
2 N	65

Tab. 5.23:

Bearbeitungsinstrument	Reduktion in [%]
Optrafine grob/mittel längs/Rz	
Hand	23
0,5 N	18
1 N	24
2 N	16
Optrafine mittel/fein	
Hand	27
0,5 N	42
1 N	70
2 N	71

Tab. 5.24:

Bearbeitungsinstrument	Reduktion in [%]
Optrafine grob/mittel quer/Rmax	
Hand	26
0,5 N	54
1 N	47
2 N	14
Optrafine mittel/fein	
Hand	26
0,5 N	34
1 N	68
2 N	65

Tab. 5.25:

Bearbeitungsinstrument	Reduktion in [%]
Optrafine grob/mittel quer/Rz	
Hand	25
0,5 N	56
1 N	50
2 N	14
Optrafine mittel/fein	
Hand	34
0,5 N	38
1 N	69
2 N	64

Tab. 5.26:

Bearbeitungsinstrument	Reduktion in [%]
Soflex grob/mittel längs/Rmax	29
Hand	
Soflex mittel/fein	38
Hand	
Soflex fein/superfein	41
Hand	
Soflex super- fein/Diam.pol.paste	23
Hand	

Tab. 5.27:

Bearbeitungsinstrument	Reduktion in [%]
Soflex grob/mittel längs/Rz	20
Hand	
Soflex mittel/fein	33
Hand	
Soflex fein/superfein	33
Hand	
Soflex super- fein/Diam.pol.paste	23
Hand	

Tab. 5.28:

Bearbeitungsinstrument	Reduktion in [%]
Soflex grob/mittel quer/Rmax	38
Hand	
Soflex mittel/fein	29
Hand	
Soflex fein/superfein	44
Hand	
Soflex superfein/Diam.pol.paste	6
Hand	

Tab. 5.29:

Bearbeitungsinstrument	Reduktion in [%]
Soflex grob/mittel quer/Rz	20
Hand	
Soflex mittel/fein	38
Hand	
Soflex fein/superfein	29
Hand	
Soflex superfein/Diam.pol.paste	23
Hand	

Danksagung

Meinem Doktorvater **Prof. (UH). Dr. Wolf-Dieter Müller** danke ich für die Überlassung des spannenden Dissertationsthemas, für die Geduld und für seine immer wieder neue Motivation und Begeisterung für das Thema, die für die Umsetzung dieser Arbeit entscheidend waren.

Mein Dank gilt auch Frau Christiane Schöpf für die unkomplizierte Unterstützung während der ganzen Zeit an den Messgeräten und REM Aufnahmen.

Ich danke meiner Familie, auf die ich mich immer verlassen konnte, ohne deren Hilfe ich diese Arbeit hätte nicht beenden können. Lieben Dank meiner Frau, die mir stets den Rücken freihält und mir stets mit viel Verständnis entgegengekommen ist.

Erklärung

„Ich, Robert Neumann, erkläre, dass ich die vorgelegte Dissertationsschrift mit dem Thema: ‚Einfluß des Andruckes beim Beschleifen von Feldspatkeramiken auf deren Rauheit‘ selbst verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt, ohne die (unzulässige) Hilfe Dritter verfasst und auch in Teilen keine Kopien anderer Arbeiten dargestellt habe.“

Datum

Unterschrift

Lebenslauf

Mein Lebenslauf wird aus datenschutzrechtlichen Gründen in der elektronischen Version meiner Arbeit nicht veröffentlicht.