

DISSERTATION

Effizienz approximaler Schmelzreduktion (ASR). Wie vorhersagbar können wir Schmelz abtragen?

Efficiency of interproximal enamel reduction (IPR). How predictable can we reduce enamel?

zur Erlangung des akademischen Grades
Doctor medicinae dentariae (Dr. med. dent.)

vorgelegt der Medizinischen Fakultät
Charité – Universitätsmedizin Berlin

von
Nicola Patricia Altner
aus Berlin

Erstbetreuung: Prof. Dr. Paul-Georg Jost-Brinkmann

Datum der Promotion: 29.11.2024

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis.....	v
Tabellenverzeichnis.....	vi
Abbildungsverzeichnis.....	vii
Materialliste	xii
Zusammenfassung	xiv
Abstract	xv
1 Einleitung.....	1
2 Literaturübersicht.....	4
2.1. Die approximale Schmelzreduktion	4
2.1.1 Begriffsdefinition.....	4
2.1.2 Die Anatomie des Approximalkontaktes.....	4
2.1.3 Geschichte der approximalen Schmelzreduktion in der Kieferorthopädie	5
2.1.4 Indikationen und Kontraindikationen der approximalen Schmelzreduktion	6
2.1.4.1 Indikationen der approximalen Schmelzreduktion	6
2.1.4.2 Kontraindikationen der approximalen Schmelzreduktion.....	8
2.1.5 Vor- und Nachteile der approximalen Schmelzreduktion.....	9
2.1.5.1 Vorteile der approximalen Schmelzreduktion	9
2.1.5.2 Nachteile und Risiken der approximalen Schmelzreduktion.....	10
2.1.6 Übersicht über verschiedene Verfahren der approximalen Schmelzreduktion ..	12
2.1.7 Der klinische Ablauf der approximalen Schmelzreduktion.....	13
2.1.8 Abtragsmengen in der Anwendung der approximalen Schmelzreduktion	15
2.2 Der humane Zahnschmelz	17
2.2.1 Mikroskopische Anatomie des Zahnschmelzes.....	17
2.2.2 Oberflächeneigenschaften natürlicher Zähne.....	17
2.3 Die approximale Attrition	18
2.4 Bisheriger Kenntnisstand in der Literatur	20
2.4.1 Anwendung verschiedener Systeme zur approximalen Schmelzreduktion	20
2.4.2 Abtrag der Schmelzoberfläche	21
2.4.3 Rauheit der Schmelzoberfläche	22
2.4.4 Verschleiß der ASR-Instrumente.....	24
2.5 Messung der Oberflächenrauheit des Zahnschmelzes	25
2.5.1 Oberflächenbearbeitung in der Zahnmedizin	25

Inhaltsverzeichnis

2.5.2 Allgemeine Grundlagen der Rauheitsmessung	25
2.6 Allgemeine Grundlagen der Verschleißmessung	26
3 Zielstellung	28
4 Materialien und Methoden	29
4.1 Herstellung der Prüfkörper	29
4.2 Approximale Schmelzreduktion - Versuchsaufbau	34
4.3 Messung des Schmelzabtrages mit Geomagic Control X	37
4.4 Prinzip der Focusvariation	39
4.4.1 Messung der Rauheit der Schmelzoberflächen mit dem Alicona InfiniteFocus ..	42
4.4.2 Auswertung des Alicona-Datensatzes und Rauheitsmessung nach ISO 25178	44
4.5 Qualitative Beurteilung der Rauheit des Zahnschmelzes	46
4.5.1 Die Rasterelektronenmikroskopie	47
4.5.2 Messeinstellungen für die untersuchten Schmelzproben	48
4.5.3 Qualitative Auswertung der Schmelzoberflächen mit dem ESI-System.....	49
4.6 Messung des Parameters Verschleiß.....	50
4.6.1 Messung des Parameters Verschleiß der verwendeten ASR-Instrumente.....	50
4.7 Datenverarbeitung und Statistik	53
4.8 Auswertung der Messergebnisse	53
4.8.1 Auswertung des Parameters Abtrag.....	53
4.8.2 Auswertung des Parameter Rauheit.....	53
4.8.3 Methodenfehler für den Parameter Abtrag	54
4.8.4 Methodenfehler für die Rauheitsparameter	54
5. Ergebnisse.....	55
5.1 Ergebnisse der Abtragsmessungen	55
5.2 Ergebnisse der Rauheitsmessung des Schmelzes	59
5.2.1 Ergebnisse der Rauheitsmessung Prüfgruppe Prämolaren	63
5.2.2 Ergebnisse der Rauheitsmessung Prüfgruppe Frontzähne	70
5.2.3 Ergebnisse der qualitative Auswertung mit dem ESI-Score	77
5.3 Ergebnisse der Verschleißmessungen.....	82
5.3.1 Qualitative und quantitative Auswertung des ASR-Instruments Profin lila zur Ermittlung des Verschleißverhaltens	82
5.3.2 Qualitative und quantitative Auswertung des ASR-Instruments CA grau zur Ermittlung des Verschleißverhaltens.	86

Inhaltsverzeichnis

5.3.3 Qualitative und quantitative Auswertung des ASR-Instruments CA rot zur Ermittlung des Verschleißverhaltens	90
5.3.4 Qualitative und quantitative Auswertung des ASR-Instruments Komet 025 blau zur Ermittlung des Verschleißverhaltens	93
5.3.5 Qualitative und quantitative Auswertung des ASR-Instruments Komet 020 rot zur Ermittlung des Verschleißverhaltens	96
6. Diskussion	98
6.1 Diskussion der Fragestellung	98
6.2 Diskussion von untersuchten Materialien	98
6.2.1 Auswahl der Zähne	98
6.2.2 Einbettverfahren: Herstellung der Prüfkörper	99
6.2.3 Auswahl der ASR-Instrumente	100
6.3 Diskussion der untersuchten Methoden	100
6.3.1 Scanvorgang	100
6.3.2 Versuchsaufbau	101
6.3.3 Messung des Abtrags mit Geomagic Control X.....	102
6.3.4 Messung der Rauheit der Schmelzoberfläche mit dem Alicona InfiniteFocus .	103
6.3.5 Messung der Rauheit der Schmelzoberfläche mit dem Phenom XL	106
6.3.6 Messung des Parameters Verschleiß.....	106
6.3.7 Diskussion der Statistik	107
6.4 Diskussion der Ergebnisse	108
6.4.1 Diskussion der Ergebnisse der Abtragsmessung.....	108
6.4.2 Diskussion der Ergebnisse der Rauheitsmessung	110
6.4.3 Diskussion der Ergebnisse der Verschleißmessung	119
7. Kurzfassung der Ergebnisse und Schlussfolgerungen	120
8. Ausblick	121
9. Literaturverzeichnis	122
10. Anhang	132
10.1 Eidesstattliche Versicherung	132
10.2 Lebenslauf Nicola Patricia Altner.....	133
10.3 Danksagungen	134
10.4 Bescheinigung des Statistikers.....	135

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
ASR	Approximale Schmelzreduktion
BSD	Backscattered Electron Detector
DIN	Deutsches Institut für Normung
et al.	et alii (lateinisch) <i>übersetzt: und andere</i>
g	Gramm
°C	Grad Celsius
°F	Grad Fahrenheit
h	Stunde
IPR	Interproximal Enamel Reduction
ISO	International Organization for Standardization
kN	Kilonewton
µm	Mikrometer
min	Minute
mm	Millimeter
ml	Milliliter
N	Newton
nm	Nanometer
o. g.	oben genannt
POM	Polyoxymethylen
Pa	Pascal
REM	Rasterelektronenmikroskop
s	Sekunde
SED	Secondary Electron Detector
SEM	Scanning Electron Microscope
STL	Standard-Tessellation-Language
t	Zeit
Vol.-%	Volumenprozent
z. B.	Zum Beispiel

Tabellenverzeichnis

Tabellenverzeichnis

		Seite
Tabelle 1	Tabelle 1: Übersicht über die in der Studie verwendeten ASR-Systeme mit Angabe des benutzten Winkelstücks und der eingestellten Umdrehungszahl	35
Tabelle 2	Tabelle 2: Deskriptive Statistik der Schmelzreduktion binnen 30 s bei 2 N für die Prüfgruppe Prämolaren: Mittelwerte, Standardabweichungen und Größe der Subgruppen	55
Tabelle 3	Tabelle 3: Deskriptive Statistik der Schmelzreduktion binnen 30 s bei 2 N für die Prüfgruppe Frontzähne: Mittelwerte, Standardabweichungen und Größe der Subgruppen	57
Tabelle 4	Tabelle 4: Deskriptive Statistik – Rauheitsparameter Sa für die Messungen an Prämolaren	63
Tabelle 5	Tabelle 5: Deskriptive Statistik – Differenz der Rauheitsparameter Sa für die Messungen an Prämolaren	64
Tabelle 6	Tabelle 6: Deskriptive Statistik – Rauheitsparameter Sq für die Messungen an Prämolaren	64
Tabelle 7	Tabelle 7: Deskriptive Statistik – Differenz der Rauheitsparameter Sq für die Messung an Prämolaren	66
Tabelle 8	Tabelle 8: Deskriptive Statistik – Rauheitsparameter Sdr für die Messungen an Prämolaren	66
Tabelle 9	Tabelle 9: Deskriptive Statistik – Differenz der Rauheitsparameter Sdr für die Messungen an Prämolaren	67
Tabelle 10	Tabelle 10: Deskriptive Statistik – Rauheitsparameter Svk für die Messungen an Prämolaren	68
Tabelle 11	Tabelle 11: Deskriptive Statistik – Differenz der Rauheitsparameter Svk für die Messungen an Prämolaren	69
Tabelle 12	Tabelle 12: Deskriptive Statistik – Rauheitsparameter Sa für die Messungen an Frontzähnen	70
Tabelle 13	Tabelle 13: Deskriptive Statistik – Differenz der Rauheitsparameter Sa für die Messungen an Frontzähnen	71
Tabelle 14	Tabelle 14: Deskriptive Statistik – Rauheitsparameter Sq für die Messungen an Frontzähnen	71
Tabelle 15	Tabelle 15: Deskriptive Statistik – Differenz der Rauheitsparameter Sq für die Messungen an Frontzähnen	73
Tabelle 16	Tabelle 16: Deskriptive Statistik – Rauheitsparameter Sdr für die Messungen an Frontzähnen	73
Tabelle 17	Tabelle 17: Deskriptive Statistik – Differenz der Rauheitsparameter Sdr für die Messungen an Frontzähnen	75
Tabelle 18	Tabelle 18: Deskriptive Statistik – Rauheitsparameter Svk für die Messungen an Frontzähnen	75
Tabelle 19	Tabelle 19: Deskriptive Statistik – Differenz der Rauheitsparameter Svk für die Messungen an Frontzähnen	76
Tabelle 20	Tabelle 20: Mittelwerte der ESI-Scores für die Prämolarengruppe nach Auswertung der rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen in tabellarischer Form, Aufschlüsselung der ESI-Scores im Bereich der Fläche und im Randbereich	77
Tabelle 21	Tabelle 21: Mittelwerte der ESI-Scores für die Frontzahngruppe nach Auswertung der rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen in tabellarischer Form, Aufschlüsselung der ESI-Scores im Bereich der Fläche und im Randbereich	79

Abbildungsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

		Seite
Abb. 1	Abbildung 1 a und b: a) natürliche Attritionsfläche, b) Vergleich zwischen der natürlichen Attritionsfläche (1) neben einer (2) Schliiffacette durch approximale Schmelzreduktion; eigene Aufnahmen mit dem Keyence VHX-5000, Japan.	18
Abb. 2	Abbildung 2 a-d: Aufnahmen von vier verschiedenen natürlichen Attritionsflächen, a+b) natürliche Attritionsfläche mit vereinzelt Riefen und Vertiefungen im Schmelz, c+d) natürliche Attritionsfläche mit deutlichen Vertiefungen im Schmelz, eigene Aufnahmen mit dem Alicona InfiniteFocus, Graz.	19
Abb. 3	Abbildung 3: Schematische Darstellung von Schleifen mit einem diamantierten Abrasiv: Darstellung eines in die Matrix eingebetteten Diamantpartikels, welcher über die Zahnschmelzoberfläche in der mit einem Pfeil dargestellten Richtung geführt wird und den Zahnschmelz reduziert, eigene Grafik.	26
Abb. 4	Abbildung 4 a-c: Schematische Darstellung von verschiedenen Verschleißraten der in einer Matrix eingebetteten Diamantpartikel a) Verlust eines Diamantpartikels, b) Makrochipping, c) Mikrochipping; eigene Grafik.	27
Abb. 5	Abbildung 5 a - e: Übersicht über das Einbettverfahren a+b) Ausrichtung des Stellschlüssels mit Fixierung des Stellschlüssels, c-e) Fixierung des Stellschlüssels und Einbetten des Prüfkörpers mit der Stecknadel in Paladur klar, eigene Aufnahmen mit Kamera.	30
Abb. 6	Abbildung 6 a-d: Übersicht über die verwendeten ASR-Instrumente für die Prüfgruppe Prämolaren: a) Komet 045, b) CA grau, c) Profin rot, d) Sof-Lex Scheiben mittel, fein, superfein; eigene Aufnahmen a-c mit dem Keyence, d) mit Kamera.	31
Abb. 7	Abbildung 7 a-d: Übersicht über die verwendete ASR-Instrumente für die Prüfgruppe Frontzähne: a) Komet 030, b) CA rot, c) Profin lila, d) Sof-Lex Scheiben mittel, fein, superfein; eigene Aufnahmen a-c mit dem Keyence, d) mit Kamera.	31
Abb. 8	Abbildung 8 a-e: Übersicht über die untersuchten ASR-Tools für die Prüfreihe Verschleiß: a) Komet 020, b) Komet 025, c) CA grau, d) CA rot, e) Profin lila; eigene Aufnahmen mit dem Keyence.	32
Abb. 9	Abbildung 9: Flussdiagramm über die verschiedenen Versuchsreihen Abtrag/Rauheit und Verschleiß; Anzahl der verwendeten Prüfkörpern und Aufteilung in die verschiedenen Versuchsreihen; detaillierte Beschreibung der Messverfahren im jeweiligen Kapitel; eigene Aufnahmen mit dem Keyence, Phenom XL und Alicona InfiniteFocus.	33
Abb. 10	Abbildung 10 a und b: a) Planungssimulation des Probenhalters (1), auf dem kleinen Probenteller (2) am Probenteller der Zwick (3) befestigt; Konstruktionszeichnung <i>mit freundlicher Genehmigung des Centrums Wissenschaftliche Werkstätten, Erik Ode</i> b) Probenhalter aus POM, drei Schrauben (→) dienen der Fixierung des Prüfkörpers; Probenhalter ist über zwei Schrauben (*) in drei Positionen fixierbar.	34
Abb. 11	Versuchsaufbau in der Universalprüfmaschine für Prüfung von Abtrag, Rauheit und Verschleiß: 1) Chirurgie Motor (KaVo INTRASurg 300 plus) 2) Auffangbecken für Kühlwasser, 3) Einspannvorrichtung für das ASR-Instrument, a) für das Komet-System, b) für das CA-System, c) für das Profin-System. Der Probenhalter wurden mit Zwingen auf dem Probenteller fixiert, 4) das Winkelstück wurde mithilfe von Silikon in einem Aluminiumprofil fixiert und dann mithilfe eines Schraub-	36

Abbildungsverzeichnis

	Probenhalters an der Zwick befestigt, 5) Traverse der Zwick, eigene Aufnahmen mit Kamera.	
Abb. 12	Abbildung 12 a-h.: Übersicht über die Messung des Parameters Abtrag mit Geomagic Control X; eigene Bilder aus den Prüfprotokollen der Hauptversuchsreihe.	38
Abb. 13	Abbildung 13: Übersichtsaufnahme über das verwendete Alicona InfiniteFocus, IFM G4, eigene Aufnahme.	39
Abb. 14	Abbildung 14: Prinzip der Fokusvariation (1) CCD-Sensor, (2) Linse, (3) Polarisator, (4) Linse, (5) Weißlichtquelle (6) Lichtstrahlen der Weißlichtquelle (7) optionaler Analysator (8) semi-transparenter Spiegel (9) Objektiv (Linsen mit begrenzter Tiefenschärfe) (10) Ringlicht (11) vertikale Bewegung der Einheit (12), Schmelzoberfläche (13) Kontrastkurve, eigene Grafik nach Vorbild [134].	40
Abb. 15	Übersicht über die quantitative Rauheitsmessung des Schmelzes mit den Alicona InfiniteFocus, eigene Fotos (1) + (2) und a-j), l) eigene Aufnahme mit dem Keyence, k+l), eigene Aufnahmen mit dem Alicona.	43
Abb. 16	Abbildung 16: Screenshot der Flächentexturmessung einer 500x500 µm großen Fläche mit der Alicona InfiniteFocus Software, eigene Aufnahme.	44
Abb. 17	Abbildung 17 a und b: a) Desktop-Rasterelektronenmikroskop Phenom XL (Firma Thermofisher). Das Gerät steht auf einem Schwingungsdämpfungstisch (1), b) Ansicht des Arbeitsplatzes, eigene Aufnahmen mit Kamera.	47
Abb. 18	Abbildung 18 a-d: Beispiele für die verschiedenen ESI-Scores: a) Score 0, b) Score 1, c) Score 2 und d) Score 3. Score 4 wurde in keiner der untersuchten Proben gefunden, eigene Aufnahmen mit dem Phenom	49
Abb. 19	Abbildung 19: Übersicht über die Verschleißmessung beispielhaft an dem ASR-Instrument Profin lila, eigene Aufnahmen mit dem Phenom und dem Alicona InfiniteFocus.	52
Abb. 20	Abbildung 20: Profilplot: Mittelwert und 95 % Konfidenzintervall des Schmelzabtrags nach 30 s bei 2 N für die Prüfgruppe Prämolaren, Grafik von Helmut Orawa.	56
Abb. 21	Abbildung 21: Profilplot: Mittelwert und 95 % Konfidenzintervall des Schmelzabtrags nach 30 s bei 2 N für die Prüfgruppe Frontzähne, Grafik von Helmut Orawa.	58
Abb. 22	Abbildung 22: repräsentative mikroskopische Aufnahme einer unbehandelten Schmelzprobe mit dem Alicona (Fläche 710 µm x 539 µm, 20x Objektiv) , halbseitige Darstellung in Echt- und Falschfarben, eigene Aufnahme mit dem Alicona InfiniteFocus.	59
Abb. 23	Abbildung 23: repräsentative Aufnahme einer Schmelzoberfläche nach der Bearbeitung mit dem Komet 045 mit dem Alicona (Fläche 710 µm x 539 µm, 20x Objektiv), halbseitige Darstellung in Echt- und Falschfarben, eigene Aufnahme mit dem Alicona InfiniteFocus.	59
Abb. 24	Abbildung 24: repräsentative Aufnahme einer Schmelzoberfläche nach der Bearbeitung mit Profin rot mit dem Alicona (Fläche 710 µm x 539 µm, 20x Objektiv), halbseitige Darstellung in Echt- und Falschfarben, eigene Aufnahme mit dem Alicona InfiniteFocus.	60
Abb. 25	Abbildung 25: repräsentative Aufnahme einer Schmelzoberfläche nach der Bearbeitung mit CA grau mit dem Alicona (Fläche 710 µm x 539 µm, 20x Objektiv), halbseitige Darstellung in Echt- und Falschfarben, eigene Aufnahme mit dem Alicona InfiniteFocus.	60
Abb. 26	Abbildung 26: repräsentative Aufnahme einer Schmelzoberfläche nach der Bearbeitung mit Komet 030 mit dem Alicona (Fläche 710 µm x 539 µm, 20x Objektiv), halbseitige Darstellung in Echt- und Falschfarben, eigene Aufnahme mit dem Alicona InfiniteFocus.	61

Abbildungsverzeichnis

Abb. 27	Abbildung 27: repräsentative Aufnahme einer Schmelzoberfläche nach der Bearbeitung mit Profin lila mit dem Alicona (Fläche 710 µm x 539 µm, 20x Objektiv), halbseitige Darstellung in Echt- und Falschfarben, eigene Aufnahme mit dem Alicona InfiniteFocus.	61
Abb. 28	Abbildung 28: repräsentative Aufnahme einer Schmelzoberfläche nach der Bearbeitung mit CA rot mit dem Alicona (Fläche 710 µm x 539 µm, 20x Objektiv), halbseitige Darstellung in Echt- und Falschfarben, eigene Aufnahme mit dem Alicona InfiniteFocus.	62
Abb. 29	Abbildung 29: repräsentative Aufnahme einer Schmelzoberfläche nach der Politur mit dem Alicona (Fläche 710 µm x 539 µm, 20x Objektiv), halbseitige Darstellung in Echt- und Falschfarben, eigene Aufnahme mit dem Alicona InfiniteFocus.	62
Abb. 30	Abbildung 30: Boxplot-Darstellung des Rauheitsparameters Sa in Abhängigkeit vom verwendeten ASR-Instruments zu den Zeitpunkten T0, T1 und T2, Grafik von Ulrike von Hehn.	63
Abb. 31	Abbildung 31: Boxplots- Prämolaren – Rauheitsparameter Sq in Abhängigkeit vom verwendeten ASR-Instrument zu den Zeitpunkten T0, T1 und T2, Grafik von Ulrike von Hehn.	65
Abb. 32	Abbildung 32: Boxplots- Darstellung des Rauheitsparameters Sdr in Abhängigkeit vom verwendeten ASR-Instruments zu den Zeitpunkten T0, T1 und T2, Grafik von Ulrike von Hehn.	67
Abb. 33	Abbildung 33: Boxplot-Darstellung des Rauheitsparameters Svk in Abhängigkeit vom verwendeten ASR-Instrument zu den Zeitpunkten T0, T1 und T2, Grafik von Ulrike von Hehn.	69
Abb. 34	Abbildung 34: Boxplot-Darstellung des Rauheitsparameters Sa in Abhängigkeit vom verwendeten ASR-Instruments zu den Zeitpunkten T0, T1 und T2, Grafik von Ulrike von Hehn.	70
Abb. 35	Abbildung 35: Boxplots-Darstellung des Rauheitsparameters Sq in Abhängigkeit vom verwendeten ASR-Instruments zu den Zeitpunkten T0, T1 und T2, Grafik von Ulrike von Hehn.	72
Abb. 36	Abbildung 36: Boxplot-Darstellung des Rauheitsparameters Sdr in Abhängigkeit vom verwendeten ASR-Instrument zu den Zeitpunkten T0, T1 und T2, Grafik von Ulrike von Hehn.	74
Abb. 37	Abbildung 37: Boxplot-Darstellung des Rauheitsparameters Svk in Abhängigkeit vom verwendeten ASR-Instruments zu den Zeitpunkten T0, T1 und T2, Grafik von Ulrike von Hehn.	76
Abb. 38	Abbildung 38: Ergebnisse des ESI-Score für die Prüfgruppe Prämolaren nach Auswertung der rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen in % im Bereich der Fläche, eigene Grafik.	78
Abb. 39	Abbildung 39: Ergebnisse des ESI-Score für die Prüfgruppe Prämolaren nach Auswertung der rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen in % im Randbereich, eigene Grafik.	78
Abb. 40	Abbildung 40: Ergebnisse des ESI-Score für die Prüfgruppe Frontzähne nach Auswertung der rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen in % im Bereich der Fläche, eigene Grafik.	79
Abb. 41	Abbildung 41: Ergebnisse des ESI-Score für die Prüfgruppe Frontzähne nach Auswertung der rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen in % im Randbereich, eigene Grafik.	80
Abb. 42	Abbildung 42: Berechnung des Schleifwegs für die verschiedenen Systeme zur approximalen Schmelzreduktion; eigene Aufnahmen mit dem Keyence, Bewegungseffekte mithilfe von Adobe Photoshop	81
Abb. 43	Abbildung 43 a-d: grafische Darstellung der Rauheitsparameter a) Sa, b) Sq, c) Sdq und d) Spk für acht zufällig verteilte Topografien des ASR-Instruments Profin lila zu den Zeitpunkten T0, T1 und T2, eigene Grafik.	83

Abbildungsverzeichnis

Abb. 44	Abbildung 44: Qualitative Untersuchung des ASR-Instrumentes Profin lila- Die obere Kurve zeigt die Anzahl der Partikel zu T0, T1 und T2, die unteren Kurven zeigen den Verlust der Partikel und Makrochipping zu T0, T1 und T2, eigene Grafik.	83
Abb. 45	Abbildung 45: Qualitative Untersuchung des Verschleiß am Beispiel von Topografie 4 von Profin lila, eigene Grafik.	84
Abb. 46	Abbildung 46 a-c): a) rasterelektronische Übersichtsaufnahmen des Instruments Profin lila zu a) T0, b) T1 und C) T2; bei Abb. 46 b) musste die Scale-Bar mit ImageJ konstruiert werden aufgrund Softwarefehler. Eigene Aufnahmen mit dem Phenom XL.	85- 86
Abb. 47	Abbildung 47: grafische Darstellung der Rauheitsparameter a) Sa, b) Sq, c) Sdq und d) Spk für acht zufällig verteilte Topografien des ASR-Instruments Profin lila zu den Zeitpunkten T0, T und T2, eigene Grafik.	87
Abb. 48	Abbildung 48: qualitative Untersuchung des ASR-Instrumentes CA grau. Die obere Kurve zeigt die Anzahl der Partikel zu T0, T1 und T2. Die unteren Kurven zeigen den Verlust der Partikel und Makrochipping zu T0, T1 und T2, eigene Grafik.	87
Abb. 49	Abbildung 49 a-c : rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen zeigen den progredienten Verschleiß in Topografie 4 zu a) T0, b) T1 und c) T2. Sichtbar ist der Verlust von Partikeln, Makrochipping und Mikrochipping, eigene Aufnahme mit dem Phenom XL.	88
Abb. 50	Abbildung 50 a-c: rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen zeigen den progredienten Verschleiß im Bereich der Topografie 5 zu a)T0, b)T1, und c) T2. Sichtbar ist der Verlust von Partikeln, Makrochipping und Mikrochipping. Außerdem sieht man eine Verletzung der Klebebasis und folglich der Matrix des Abrasivs, eigene Aufnahme mit dem Phenom XL	88
Abb. 51	Abbildung 51 a-c): a) rasterelektronenmikroskopische Übersichtsaufnahme des ASR-Instruments CA grau zu a) T0, b) T1 und c) T2, eigene Aufnahmen mit dem Phenom XL.	89
Abb. 52	Abbildung 52: Detailausschnitt von CA grau bei T2 man sieht ein Flowing Chip (*). Dieser entsteht durch die plastische Verformung der Matrix des Abrasivs mit Herauslösen der Basis, eigene Aufnahme.	90
Abb. 53	Abbildung 53 a-d: grafische Darstellung der Rauheitsparameter a) Sa, b) Sq, c) Sdq und d) Spk für acht zufällig verteilte Topografien des ASR-Instruments CA rot zu den Zeitpunkten T0, T1 und T2, eigene Grafik.	90
Abb. 54	Abbildung 54: qualitative Untersuchung des ASR-Instrumentes CA rot, die obere Kurve zeigt die Anzahl der Partikel zu T0, T1 und T2. Die untere Kurven zeigen den Verlust der Partikel und Makrochipping zu T0, T1 und T2, eigene Grafik.	91
Abb. 55	Abbildung 55 a-c): a) rasterelektronenmikroskopische Übersichtsaufnahme des ASR-Instruments CA rot zu a) T0, b) T1 und C) T2, eigene Aufnahmen mit dem Phenom XL.	92
Abb. 56	Abbildung 56 a-d: grafische Darstellung der Rauheitsparameter a) Sa, b) Sq, c) Sdr und d) Spk für acht zufällig verteilte Topografien des ASR-Instruments Komet 025 blau zu den Zeitpunkten T0, T1 und T2, eigene Grafik	93
Abb. 57	Abbildung 57: qualitative Untersuchung des ASR-Instrumentes Komet 025. Die obere Kurve zeigt die Anzahl der Partikel zu T0, T1 und T2. Die untere Kurven zeigen den Verlust der Partikel und Makrochipping zu T0, T1 und T2, eigene Grafik.	94
Abb. 58	Abbildung 58 a-c: rasterelektronische Übersichtsaufnahme des ASR-Instruments Komet 025 zu a) T0, b) T1 und c) T2, eigene Grafik.	95

Abbildungsverzeichnis

Abb. 59	Abbildung 59 a-d: grafische Darstellung der Rauheitsparameter a) Sa, b) Sq, c) Sdr und d) Spk für acht zufällig verteilte Topografien des ASR-Instruments Komet 020 zu den Zeitpunkten T0, T1 und T2, eigene Grafik.	96
Abb. 60	Abbildung 60 a-c: rasterelektronische Übersichtsaufnahme des ASR-Instruments Komet 020 zu a) T0, b) T1 und c) T2, eigene Aufnahmen mit dem Phenom XL.	97
Abb. 61	Abbildung 61 a und b: rasterelektronenmikroskopische Aufnahme: a) nach Bearbeitung der Schmelzoberfläche mit Profin lila, b) sichtbare persistierende Riefen und Furchen im Schmelz trotz Politurmaßnahmen, eigene Aufnahme mit dem Phenom XL.	111
Abb. 62	Abbildung 62: rasterelektronenmikroskopische Aufnahme im Randbereich einer Approximalfläche, die mit Profin rot bearbeitet wurde, eigene Aufnahme mit dem Phenom XL.	113
Abb. 63	Abbildung 63: rasterelektronenmikroskopische Aufnahme im Bereich der Fläche einer Approximalfläche, die mit Profin rot bearbeitet wurde, eigene Aufnahme mit dem Phenom XL.	113
Abb. 64	Abbildung 64: rasterelektronenmikroskopische Aufnahme im Randbereich einer Approximalfläche, die mit Profin lila bearbeitet wurde, eigene Aufnahme mit dem Phenom XL.	114
Abb. 65	Abbildung 65: rasterelektronenmikroskopische Aufnahme im Bereich der Fläche einer Approximalfläche, die mit Profin lila bearbeitet wurde, eigene Aufnahme mit dem Phenom XL.	114
Abb. 66	Abbildung 66: rasterelektronenmikroskopische Aufnahme im Randbereich einer Approximalfläche, die mit Komet 045 bearbeitet wurde, eigene Aufnahme mit dem Phenom XL.	115
Abb. 67	Abbildung 67: rasterelektronenmikroskopische Aufnahme im Bereich der Fläche einer Approximalfläche, die mit Komet 045 bearbeitet wurde, eigene Aufnahme mit dem Phenom XL.	115
Abb. 68	Abbildung 68: rasterelektronenmikroskopische Aufnahme im Randbereich einer Approximalfläche, die mit Komet 030 bearbeitet wurde, eigene Aufnahme mit dem Phenom XL.	116
Abb. 69	Abbildung 69: rasterelektronenmikroskopische Aufnahme im Bereich der Fläche einer Approximalfläche, die mit Komet 030 bearbeitet wurde, eigene Aufnahme mit dem Phenom XL.	116
Abb. 70	Abbildung 70: rasterelektronenmikroskopische Aufnahme im Randbereich einer Approximalfläche, die mit dem CA grau-Streifen bearbeitet wurde, eigene Aufnahme mit dem Phenom XL.	117
Abb. 71	Abbildung 71: rasterelektronenmikroskopische Aufnahme im Bereich der Fläche einer Approximalfläche, die mit dem CA grau-Streifen bearbeitet wurde, eigene Aufnahme mit dem Phenom XL.	117
Abb. 72	Abbildung 72: rasterelektronenmikroskopische Aufnahme im Randbereich einer Approximalfläche, die mit dem CA rot-Streifen bearbeitet wurde, eigene Aufnahme mit dem Phenom XL.	118
Abb. 73	Abbildung 73: rasterelektronenmikroskopische Aufnahme im Bereich der Fläche einer Approximalfläche, die mit dem CA grau-Streifen bearbeitet wurde, eigene Aufnahme mit dem Phenom XL.	118

Materialliste

Materialliste

- Mat. 1 Aqua dest.
- Mat. 2 CA® Stripping Tool 60µm twin (grau); SCHEU-DENTAL GmbH, Iserlohn, Deutschland
- Mat. 3 CA® Stripping Tool 40µm twin (rot); SCHEU-DENTAL GmbH, Iserlohn, Deutschland
- Mat. 4 EVA-Winkelstück T1; Sirona Dental Systems GmbH, Bensheim, Deutschland
- Mat. 5 Chloramin-T-Lösung (0,5 %)
- Mat. 6 Ethanol (70 %)
- Mat. 7 Komet® 020, OS20F; Gebr. Brasseler, Lemgo, Deutschland
- Mat. 8 Komet® 025, OS25M; Gebr. Brasseler, Lemgo, Deutschland
- Mat. 9 Komet® 030, OSF; Gebr. Brasseler, Lemgo, Deutschland
- Mat. 10 Komet® 045, OSM; Gebr. Brasseler, Lemgo, Deutschland
- Mat. 11 Winkelstück O-Drive D30, Komet®; Gebr. Brasseler, Lemgo, Deutschland
- Mat. 12 Micro-brush; 3M ESPE©, Seefeld, Deutschland
- Mat. 13 Paladur® klar; Haereus Kulzer©, Hanau, Deutschland
- Mat. 14 Sof-Lex™ extra flache Konturier- und Polierscheiben; 3M ESPE©, Seefeld, Deutschland
- Mat. 15 Superpolish© Paste; Kerr™, Bioggio, Schweiz
- Mat. 16 Stellschlüssel, Dentaurum GmbH & Co KG, Ispringen, Deutschland
- Mat. 17 Supradent-Klebewachs; Oppermann-Schwedler, Bonn, Deutschland
- Mat. 18 Profin® IPR™ rot; Dentatus AB, Spånga, Schweden
- Mat. 19 Profin® IPR™ lila; Dentatus AB, Spånga, Schweden
- Mat. 20 Profin PDX®-Winkelstück; Dentatus AB, Spånga, Schweden
- Mat. 21 Mini-Zwinge AM4; BESSEY® Tool GmbH & Co. KG, Bietigheim-Bissingen, Deutschland
- Mat. 22 Aluminium-U-Profil; Gust. Alberts® GmbH & Co. KG, Herscheid, Deutschland
- Mat. 23 Silaplast Futur; DETAX GmbH & Co. KG, Ettligen, Deutschland
- Mat. 24 Silikonform (2,5 cm x 2,5 cm x 2,5 cm)

Materialliste - Chargennummer

OSM (Komet® 045 blau) - 2 Stück	REF OS2M 000 140 LOT 298736
OS2F (Komet® 030 rot) - 2 Stück	REF OSF 000 140 LOT 295073
OS20F (Komet® 020 rot) - 1 Stück	REF OS20F 000 140 LOT 296480
OS25M (Komet® 025 blau) – 1 Stück	REF OS25M 000 140 LOT 295144
CA® rot – 3 Stück	REF 5350.1 LOT 1621 A
CA® grau – 3 Stück	REF 5347.1 LOT 2121 A
Profin® lila – 3 Stück	REF LTA-P25L/2 LOT 77251
Profin® rot - 2 Stück	REF LTA-P5/2 LOT 75072
Sof-Lex™ Medium	REF 2382M LOT 5325977
Sof-Lex™ Fine	REF 2382F

Materialliste

Sof-Lex™ Superfine

LOT 3175043
REF 2382SF
LOT 4283186

Geräte und Software

Software

Microsoft® Excel® für Microsoft 365 MSO
(Vs. 2312)

IFM G4 Software
testxpert® II V3.2

IBM SPSS® Statistics (Vs. 28)
IBM SPSS® Statistics (Vs. 29.0.0.0)
Adobe® Photoshop Elements 2022

Geomagic® Control X™ (Vs. 2020)

InfiniteFocus Microscopy Alicona 2.0, IFM 2.1
Software, MeasureSuite 5.3.1 (Vs. 2017)
Phenom™ ProSuite Software

ImageJ

Anbieter

Microsoft®, Redmond, WA, USA

Alicona Imaging, Grambach/Graz, Austria
Zwick/Roell, Zwick GmbH & Co.KG, Ulm,
Deutschland

SPSS Inc. an IBM Company, Chicago, IL

Adobe® Systems Software, 345 Park
Avenue, San Jose, CA 95110-2704 USA
3D-Systems GmbH, Moerfelden-Walldorf;
Deutschland

Alicona Imaging, Grambach/Graz, Österreich

ThermoFisher™ Inc., Waltham,
Massachusetts, USA
Wayne Rasband. NIH. USA

Geräte

Alicona InfiniteFocus G4

KEYENCE VHX-5000

Zwick Kraftmessdose: KAP-Z, KI.0.05; 2.0
mV/V= 200N, FNE 02-1289,
Chirurgiemotor INTRAsurg® 300

Zwick/Roell Z005
Trios 3® 3W
Phenom™ XL G2 Desktop SEM

Hochvakuum-Kleinbeschichtungsanlage
MED 010 Turbo

Anbieter

Alicona Imaging GmbH, Grambach/Graz,
Österreich

Keyence Deutschland GmbH, Neu-Isenburg,
Deutschland

Angewandte System-Technik GmbH,
Marschner Str. 26, D-01287 Dresden

KaVo Dental GmbH, Biberach
Deutschland

Zwick GmbH & Co. KG, Ulm, Deutschland
3Shape A/S, Kopenhagen, Dänemark

ThermoFisher™ Inc., Waltham,
Massachusetts, USA

BALZERS Union Limited, Liechtenstein

Im Folgenden wurde auf die Angabe der Warenzeichen ©, ® und ™ verzichtet. Die Kennzeichen ©, ® und ™ der verwendeten Materialien und Geräte sind in dieser Materialliste aufgeführt.

Zusammenfassung

Einleitung

Gegenstand dieser In-vitro-Studie war die Untersuchung von drei verschiedenen Systemen (Komet, Profin, CA) zur approximalen Schmelzreduktion (ASR) hinsichtlich ihrer Effizienz.

Materialien und Methoden

Die Messungen wurden an 50 extrahierten humanen Zähnen in zwei Versuchsreihen an einer Universalprüfmaschine (Zwick Z005) durchgeführt. Die Ermittlung der Effizienz erfolgte durch die Messung des Abtrags pro Zeiteinheit, der Rauigkeit der Schmelzoberflächen sowie des Verschleißverhaltens der ASR-Instrumente. In der ersten Versuchsreihe wurde der Abtrag der ASR-Wabenscheiben (Komet 030, Komet 045), der CA-Streifen (CA grau, CA rot) und des Profin-Systems (Profin lila, Profin rot) in einem Zeitintervall von 30 Sekunden bei einer Kraft von 2 N gemessen. Die Zähne wurden vor und nach der Bearbeitung mit einem Intraoralscanner (Trios 3, 3Shape) gescannt. Der Abtrag wurde mithilfe der Software Geomagic Control X gemessen. Die Schmelzoberflächen wurden ebenfalls quantitativ vor (T0) und nach der Schmelzreduktion (T1) sowie nach anschließender Politur nach 45 Sekunden (T2) mithilfe von drei SofLex Scheiben mit dem Alicona InfiniteFocus und qualitativ mit einem Rasterelektronenmikroskop (Phenom XL) ausgewertet. Es wurden die Flächenparameter Sa, Sq, Sdr und Svk gemessen. Die rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen wurden mithilfe des ESI-Scores ausgewertet. In der zweiten Versuchsreihe wurde der Verschleiß von fünf ASR-Instrumenten (Profin lila, CA grau, CA rot, Komet 025, Komet 020) qualitativ (REM) und quantitativ (Alicona InfiniteFocus) ermittelt. Es wurden die Flächenrauheitsparameter Sa, Sq, Sdq und Spk erhoben. Qualitativ wurden acht zufällig gleichmäßig über die Fläche verteilte Topografien ausgewertet.

Ergebnisse

Das Komet-System konnte signifikant sowohl für die Frontzähne als auch für die Prämolaren einen größeren Abtrag im Vergleich zu dem CA- und Profin-System im gleichen Zeitintervall erzielen ($p < 0,05$). Durch die Bearbeitung kam es in nahezu allen Gruppen zu einem signifikanten Anstieg aller Rauheitsparameter. Nach der Schmelzpolitur bestand jedoch kein signifikanter Unterschied mehr gegenüber der Ausgangssituation. Die Schmelzoberflächen waren wieder so glatt wie unbehandelte Schmelz. Die rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen zeigten überwiegend sehr gut bis gut polierte Schmelzoberflächen, jedoch beim CA- und Profin-System vereinzelt persistierende Riefen im Schmelz, die durch die Politurmaßnahmen nicht verschwanden.

Zusammenfassung

Alle Systeme zeigten Anzeichen von Verschleiß. Das CA- und das Profin-System zeigten bei der qualitativen Analyse Verschleiß durch Verlust von Partikeln, Makrochipping und Mikrochipping. Das Komet-System zeigte Anzeichen von Mikrochipping.

Schlussfolgerungen

Die Wahl des verwendeten ASR-Instruments hat Einfluss auf den Abtrag pro Zeiteinheit. Die bearbeiteten Schmelzoberflächen zeigten eine deutliche Erhöhung aller Rauheitsparameter. Auf eine anschließende Politur ist demnach nicht zu verzichten.

Abstract

Objectives

The present study investigated three different systems for interproximal enamel reduction (Komet, Profin, CA) with regard to their efficiency.

Methods

The measurements were carried out on 50 extracted human teeth in two test series on a universal testing machine (Zwick, Z005). To measure the efficiency, the amount of enamel removal per time unit, the surface roughness of the stripped enamel and the wear of the IPR tool were measured. The first test series measured the amount of enamel reduction of the IPR-Discs (Komet 030, Komet 045), the CA-Strips, (CA grey, CA red) and Profin IPR Tool (Profin lila, Profin red) in a time interval of 30 seconds at a force of 2 N. The teeth were scanned before and after the IPR procedure with an intraoral scanner (Trios 3, 3Shape). The enamel reduction was measured by the software Geomagic Control X. The surfaces were evaluated quantitatively before (T0) and after enamel reduction (T1) and after subsequent polishing after 45 seconds (T2) with three SofLex Discs using Alicona InfiniteFocus and qualitatively with a scanning electron microscope (Phenom XL). The surface parameters Sa, Sq, Sdr und Svk were measured. The scanning electron micrographs were evaluated using the ESI-Score. In the second series of tests, the wear was measured on five IPR instruments (Profin lila, CA grau, CA rot, Komet 025, Komet 020) qualitatively (Phenom XL) and quantitatively (Alicona InfiniteFocus). The surface roughness parameters Sa, Sq, Sdq and Spk were measured. Qualitatively, eight topographies randomly distributed evenly over the surface were evaluated.

Results

The Komet- system could significantly achieve for both the anterior teeth and the premolar teeth a greater enamel removal compared to the CA- and Profin-system in the same time interval ($p < 0,05$). After IPR, there was a significant increase in all roughness parameters (Sa, Sq, Sdr and Svk) in all groups. After polishing, the enamel surfaces

Zusammenfassung

were again as smooth as untreated enamel. The scanning electron micrographs showed very good to well-polished enamel surfaces in the majority, but for the CA and Profin system there were isolated persistent grooves in the enamel that did not disappear after polishing.

All systems showed signs of wear. The CA- and Profin- systems showed wear due to loss of particles, macrochipping and microchipping in the qualitative analysis. The Komet system showed signs of microchipping.

Conclusion

The choice of IPR-instrument used has an influence on the amount of enamel removed per unit of time. The stripped enamel surfaces showed a significant increase in all roughness parameters. Subsequent polishing should therefore not be dispensed with.

1 Einleitung

Platzmangel stellt eine der häufigsten Behandlungsindikationen in der Kieferorthopädie dar. Das liegt unter anderem daran, dass vor allem ein Engstand in der Front einen Einfluss auf die Selbstwahrnehmung und die Lebensqualität der Patient*innen hat [1]. Daher ist das Beseitigen des Engstandes heutzutage eine der häufigsten Motivationen von Patient*innen, sich bei einem Kieferorthopäden vorzustellen.

Das Repertoire der kieferorthopädischen Therapieoptionen zur Auflösung eines Engstandes ist groß. Expansion der Zahnbögen, Distalisation beziehungsweise Derotation von Seitenzähnen im Oberkiefer sowie das Aufrichten gekippter Zähne und die Protrusion von Unterkieferfrontzähnen sind - neben der Extraktionstherapie - nur einige Möglichkeiten zur Platzbeschaffung [2, 3].

Eine weitere und mittlerweile im klinischen Alltag sehr verbreitete Methode ist die approximale Schmelzreduktion, mit der sich durch die Reduktion der Zahnbreiten geringe bis mäßige Engstände und Zahngrößenmissverhältnisse korrigieren lassen [2].

Um das Ausmaß eines Engstandes zu berechnen, gibt es viele verschiedene kieferorthopädische Analyseverfahren. Zum einen werden diagnostische Modelle zur Platzbilanzierung vermessen, zum anderen dienen radiologische Analysen wie die Vermessung des Fernröntgenseitenbildes zur Evaluation der knöchernen Limitationen von geplanten Zahnbewegungen. Dabei sind sowohl die Korrektur der Angulation und Inklination als auch die sagittalen und vertikalen Positionen von Zähnen zu berücksichtigen.

Bei der Platzbeschaffung durch Extraktionstherapie ist der geschaffene Platz durch die mesiodistale Dimension des extrahierten Zahnes exakt vorgegeben. Die Ausnutzung der Lücke wird durch die Art der Verankerung (minimal, moderat und maximal) bestimmt. Das Ausmaß an gewonnenem Platz durch die approximale Schmelzreduktion ist jedoch zunächst nicht so klar zu bemessen.

Für die klinische Anwendung eines Instrumentes bei der approximalen Schmelzreduktion (ASR) sind daher die Vorhersagbarkeit des Abtrags und die Oberflächeneigenschaften des Schmelzes nach der Bearbeitung sowie die Effizienz des verwendeten Systems von entscheidender Bedeutung [4]. Denn das Ziel der approximalen Schmelzreduktion ist, den Schmelz um exakt den Betrag zu reduzieren, der zuvor geplant wurde.

Ein zu großer Zahnhartsubstanzabtrag, iatrogen verursachte Hypersensibilität und eine erhöhte Anfälligkeit für Demineralisationen sind dabei unbedingt zu vermeiden. Ein zu geringer Abtrag ist dagegen nur unerwünscht, bedeutet er doch zusätzlichen Aufwand zur Korrektur [3].

Johner et al. fanden in vitro einen signifikanten Unterschied zwischen dem geplanten und tatsächlichen Schmelzabtrag bei der Anwendung verschiedener Systeme zur

Einleitung

approximalen Schmelzreduktion [5]. Laut De Felice et al. gelingt es auch in vivo nicht präzise eine geplante Schmelzreduktion umzusetzen [6].

Der Abtrag pro Zeiteinheit ist dabei von verschiedenen Faktoren abhängig. Es gibt zum einen die behandler-spezifischen Faktoren wie der ausgeübte Anpressdruck [7], die Positionierung des Instrumentes im Verhältnis zum Kontaktpunkt sowie Patienten-faktoren wie die Härte des Zahnschmelzes [8], die Zahnform und die Zahnbeweglichkeit [6].

Die patientenspezifischen Faktoren begründen sich in der makroskopischen und mikroskopischen Anatomie des humanen Zahnschmelzes sowie des Zahnhalteapparates. Diese Faktoren zu objektivieren, ist weder technisch ohne immensen Aufwand (Vickers Härteprüfung etc.) machbar, noch führt es zu einer besseren Übertragbarkeit von In-vitro-Versuchen in den klinischen Alltag.

Anders verhält es sich mit rein physikalischen, technisch messbaren Größen, die anwenderspezifische Aspekte abstrahieren. Eine Objektivierung des Anpressdrucks und damit der auf die Zahnoberfläche ausgeübten Kraft pro Fläche ist dabei von entscheidender Bedeutung und unter In-vitro-Bedingungen messbar.

Während die applizierte Kraft in verschiedenen Studien nicht angegeben wird [5, 9], haben andere Autoren durch das Ausüben einer konstanten Kraft versucht, eine Vergleichbarkeit und Reproduzierbarkeit der Ergebnisse herzustellen [4].

Natürlich bleibt die Anwendbarkeit von im Labor ermittelten Werten auf den klinischen Alltag in gewisser Hinsicht fraglich. Jedoch bieten Laborbedingungen die Möglichkeit, standardisiert die verschiedenen Verfahren miteinander zu vergleichen, was im Gegensatz zu klinischen Untersuchungen mit einem einzelnen Behandler, der die approximale Schmelzreduktion an allen Zahnflächen durchführt, bessere Vergleichbarkeit schafft.

Des Weiteren sind technische Einflussgrößen wie die Größe der Abrasivpartikel, der Verbund zwischen Abrasivpartikel und Instrument, der Schleifweg und damit verbunden der Verschleiß des Instrumentenendes für die Abtragsleistung von Bedeutung. Verschiedene Studien beschäftigten sich daher auch mit der Fragestellung nach der Effizienz des Instrumentenendes [4, 10]. Dabei wurden ein signifikanter Unterschied zwischen dem ersten und letzten Intervall des Abtrages [4] sowie eine Reduktion des Friktionskoeffizienten um 60 % nach 5 Minuten [10] für die in der jeweiligen Studie untersuchten Systeme festgestellt.

Auch die Dauer der Anwendung ist entscheidend. Dabei sind nicht nur die Arbeitszeiten für die approximale Schmelzreduktion, sondern auch die Zeiten für die Politur zu beachten.

Es sind verschiedene Polierempfehlungen wie z. B. 180 s [11] oder 20 s [9] in der Literatur zu finden. Die Politurdauer ist der Zeit, die für den Abtrag notwendig ist, noch hinzuzufügen.

Einleitung

Ein Instrument zur approximalen Schmelzreduktion sollte daher nicht nur in einem zeitlich klinisch akzeptablen Intervall den Schmelz reduzieren, sondern nach dem Abtrag auch eine Zahnoberfläche hinterlassen, die keine umfangreichen Poliermaßnahmen erfordert oder gar in der Schmelzoberfläche Rillen hinterlässt, die nicht mehr geglättet werden können.

Zum Abschätzen des erreichten Schmelzabtrages stehen Messlehren und das direkte Vermessen mittels Schiebelehre zur Verfügung [2]. Durch die vermehrte Anwendung von intraoralen Scannern ist jedoch auch eine dreidimensionale Erfassung und Überlagerung der Datensätze möglich. Klinisch stehen dem Behandler Messhilfen unterschiedlicher Dicke zur Verfügung mit denen der klinische Erfolg überwacht werden kann [12].

2 Literaturübersicht

2.1. Die approximale Schmelzreduktion

2.1.1 Begriffsdefinition

Bei der approximalen Schmelzreduktion (ASR) wird Schmelz an den mesialen und distalen Approximalflächen eines Zahnes abgetragen. Dabei kommt es zu der Reduktion der Zahnbreite und einer geometrischen Veränderung des Kontaktpunktes zu einer Kontaktfläche [4].

Für dieses Verfahren gibt es viele andere Bezeichnungen wie im deutschsprachigen Raum „Cronoplastie“ [13], „Enameloplastie“ [14], „Schmelzskulpturierung“ [13], „Strippen“ [13] und im Englischen „enamel reduction“ [13], „interdental removal“ [13], „enameloplasty“ [15], „enamel trimming“ [13], „recontouring“ [13], „proximal stripping“ [16], „reproximation“ [13, 17], „key stoning“ [18], „slenderizing“ [13].

Prinzipiell ist die approximale Schmelzreduktion sowohl an Zähnen der ersten als auch der zweiten Dentition anwendbar, wird jedoch meistens an bleibenden Zähnen durchgeführt.

2.1.2 Die Anatomie des Approximalkontaktes

Der Approximalkontakt beschreibt die „punktförmige Berührungsstelle zweier benachbarter Zähne“ und „befindet sich an der erhabensten Stelle der Fades contactus, d. h. an deren Äquator“ [19].

Stomatologisch schreibt man seiner Funktion die Weiterleitung der Kaukräfte in der Horizontalen durch den punktförmigen Kontakt zu. Nach Fillion sichert er „die Kontinuität des Zahnbogens und unterstützt dessen Stabilität“ [13].

Der Approximalkontakt bildet anatomisch die Begrenzung des dreieckigen Interdentalraumes nach okklusal und schützt damit das darunterliegende Gewebe, da die okklusale Kontinuität ein Absinken von Speiseresten verhindert [13]. Rein geometrisch betrachtet handelt es sich jedoch aufgrund der Krümmung der approximalen Flächen der Zähne nicht um einen einzelnen Punkt, sondern um eine ovale bis kreisförmige, eng umschriebene Fläche [20]. Generell befinden sich die Kontaktpunkte anterior im Zahnbogen mehr okklusal und posterior mehr zervikal [21].

2.1.3 Geschichte der approximalen Schmelzreduktion in der Kieferorthopädie

Die Reduktion der mesiodistalen Breite der Zähne ist ein Verfahren in der Kieferorthopädie, welches das erste Mal von Ballard in der Literatur beschrieben wurde. Er propagierte bereits 1944 die sogenannte „approximale Schmelzreduktion“ zur Behebung von Disharmonien der Zahnbreiten [22]. Bolton empfahl die approximale Schmelzreduktion für die Beseitigung von Zahngrößenmissverhältnissen zwischen der Oberkiefer- und Unterkieferdentition [23, 24].

Im Zusammenhang mit der approximalen Schmelzreduktion wird immer wieder Begg's Artikel „Stone Age men's dentition“ von 1954 zitiert, in dem er durch die Untersuchungen von australischen Ureinwohnern die Verkürzung des Zahnbogens durch progressive Abrasionen beschreibt, die nach seiner Meinung Engstände vermeidet und das Entstehen von Malokklusionen durch natürliche Anpassung verhindert. Die Mesialmigration der Zähne führt zum Erhalt der Kontinuität des Zahnbogens [25].

Damit förderte Begg jedoch nicht die approximale Schmelzreduktion, er rechtfertigte seine extensive Extraktionstherapie, was nach dem Erscheinen des Artikels zu einer deutlichen Zunahme der Extraktionsentscheidungen in Amerika führte [13]. In der Folge kam es in der Literatur jedoch zur Infragestellung der vorgelegten Daten [26].

Hudson gab 1956 als erster klinische Hinweise zur Technik der approximalen Schmelzreduktion mit anschließender Politur und Fluoridierung der Schmelzoberfläche. Ebenfalls gab er Empfehlungen zu dem zulässigen Abtrag pro Approximalkontakt auf Basis einer eigens erstellten Tabelle, die auf eigenen Messungen zur Schmelzdicke basierte [27]. Zu beachten ist, dass sowohl Ballard als auch Hudson sich dabei auf die approximale Schmelzreduktion an adulten Unterkieferfrontzähnen bezogen [22, 27].

In der Arbeit von Peck und Peck 1972 konnten die Autoren bei der Vorstellung ihres Index einen Zusammenhang zwischen der Form unterer Schneidezähne und dem Vorliegen eines frontalen Engstandes nachweisen. Bei ausgeformten Zahnbögen waren die Unterkieferincisivi schmaler in mesiodistaler und breiter in bukkooraler Richtung. Daher schlugen sie einen Index zur Erfassung dieses Verhältnisses vor. Bei hohen Index-Werten ist daher nach den Autoren die Behandlung der Wahl die approximale Schmelzreduktion [28].

Ein Meilenstein in der Entwicklung der Technik der approximalen Schmelzreduktion stellten die Arbeiten von Sheridan mit seinem „Air-rotor stripping“ dar. Sheridan war auch der Erste, der die approximale Schmelzreduktion auf die posterioren Zähne erweiterte und daher im Gesamten einen größeren Abtrag pro Kiefer erreichte [29].

Fillion gab in seinem Artikel allgemeine Empfehlungen und eigene Referenzwerte für den maximal möglichen Abtrag pro Fläche je nach Zahnart für den Ober- und den Unterkiefer [13]. Jedoch ist darauf hinzuweisen, dass sich Fillion in seinem Artikel auf

die Anwendung der approximalen Schmelzreduktion bei Erwachsenen und nicht bei Jugendlichen bezog.

Heutzutage stehen dem Behandler eine Fülle von verschiedenen Instrumenten für die approximale Schmelzreduktion zur Verfügung und die Technik wird sowohl bei Erwachsenen als auch bei jüngeren Patient*innen angewandt.

2.1.4 Indikationen und Kontraindikationen der approximalen Schmelzreduktion

2.1.4.1 Indikationen der approximalen Schmelzreduktion

Die wohl am häufigsten genannte Indikation zur approximalen Schmelzreduktion stellt Platzmangel und häufig damit verbunden das Vorliegen anteriorer und posteriorer Engstände im Ober- und Unterkiefer dar [2].

Diesem Platzmangel liegt häufig ein sogenanntes Missverhältnis von Zahn- und Kiefergröße zugrunde. Liegt ein derartiges Missverhältnis vor, spricht man von einem primären Engstand. Doch auch ein sekundärer Engstand, der durch das Aufwandern der Seitenzähne entsteht, stellt häufig eine Behandlungsindikation da, wenn umfangreichere Zahnbewegungen wie zum Beispiel die Distalisation nicht indiziert sind. Des Weiteren wird die approximale Schmelzreduktion auch bei Erwachsenen mit einem tertiären Engstand, der multifaktoriell bedingt ist und erst in späteren Lebensjahren entsteht, angewandt [30]. Bei allen Formen des Engstandes ist zu beachten, dass die approximale Schmelzreduktion vor allem Anwendung in der Auflösung von geringen bis mäßigen Engständen findet [2, 31, 32].

Weitere Indikationen für ASR sind Zahnbreitendiskrepanzen sowohl in unterschiedlichen Kieferhälften [22] als auch das Vorliegen einer sogenannten Bolton-Diskrepanz, also einer Disharmonie zwischen den Zahnbreiten der Ober- und Unterkieferzähne [23, 31-33]. Auch Fillion führt in seinem Artikel als Indikation die Behandlung von „Anomalien“ mit inter- und intramaxillären „Disharmonien“ an [13]. Damit kann eine korrekte Verzahnung sowohl im Seiten- und Frontzahngebiet als auch eine physiologische Frontzahnrelation erreicht werden [31].

Auch Zahnform- und Zahngrößenanomalien (z. B. Makrodontie) können mithilfe der ASR korrigiert werden [34]. Ebenfalls sollte für die Optimierung der Form zum Beispiel bei der Feineinstellung eines Eckzahnes in Position des aplastischen seitlichen Schneidezahns die approximale Schmelzreduktion in Hinblick auf die Verbesserung der dentofazialen Ästhetik in Betracht gezogen werden [33].

Eine weitere Anwendung findet die approximale Schmelzreduktion bei der Reduktion schwarzer interdentaler Dreiecke im Rahmen der kieferorthopädischen Behandlung von Patient*innen mit Parodontopathien und Rezessionen. Dabei stehen die Veränderung

Literaturübersicht

der Zahnkontur und das Verschieben des Kontaktpunktes nach apikal im Vordergrund [11, 31, 32, 34]. Vor allem bei einer dreieckigen Kronenform ist der Abstand zwischen Kontaktpunkt und Alveolarknochen bereits vergrößert. Ein vergrößerter Abstand liegt ebenfalls durch einen Abbau des Alveolarknochens vor. Tarnow beschrieb bereits 1992 dass, wenn der krestale Rand des Alveolarknochens 5 mm oder weniger vom Kontaktpunkt der Zähne entfernt ist, die Papille zu 100 % den interdentalen Raum füllt [35].

Beim Vorliegen einer milden sogenannten bialveolären Protrusion kann durch approximale Schmelzreduktion der Platz zum Retrahieren des anterioren Segmentes geschaffen werden. Gleiches gilt für die Korrektur eines leicht vergrößerten Overjets [36].

Eine weitere Indikation ist die Camouflage-Therapie zum Beispiel bei Vorliegen einer Angle-Klasse-II, bei der durch die Extraktion der Prämolaren im Oberkiefer unter maximaler Verankerung die sagittale Stufe reduziert wird und approximale Schmelzreduktion im Unterkiefer zur Achsenkorrektur und Engstandseseitigung angewandt wird.

Außerdem kann die approximale Schmelzreduktion zum Nivellieren der Spee'schen Kurve angewandt werden, da für das Abflachen derselben Platz benötigt wird [32, 37]. Zuletzt können auch geringe dentale Mittellinienverschiebungen mithilfe der approximalen Schmelzreduktion korrigiert werden.

Häufig ist bei der approximalen Schmelzreduktion auf eine adäquate Verankerung zu achten, damit der gewonnene Platz für die erwünschte Zahnbewegung vollumfänglich genutzt werden kann [12].

All diese Indikationen sind vordergründig Bestandteil der aktiven kieferorthopädischen Behandlung. Doch hat diese Behandlungstechnik auch ihren Nutzen in der sich daran anschließenden Retentionsphase.

Ein häufig vorgebrachtes Argument ist, dass durch das Überführen eines Kontaktpunktes in eine Kontaktfläche eine höhere Stabilität und damit eine Rezidivprophylaxe am Ende einer kieferorthopädischen Behandlung erzielt werden könnte [14, 18, 38-40]. Außerdem wurde eine Korrelation zwischen schmaler mesiodistaler Dimension und regelmäßiger Anordnung der Frontzähne propagiert. Zuerst wurde dies von Peck und Peck für Unterkieferfrontzähne beschrieben [28]. Doch eine Studie von Gilmore und Little zeigte, dass die Assoziation zwischen größerer mesiodistalen Dimension und dem Vorliegen eines Engstands gering war [41]. Fillion widerspricht ebenfalls dieser Ansicht und fasste es in seinem Artikel zur approximalen Reduktion bei Erwachsenen zusammen: „Zusammenfassend kann gesagt werden, daß [sic!] die Skulpturierung des Schmelzes weder dazu durchgeführt wird um ein natürliches Phänomen zu ersetzen, noch um ein Rezidiv zu verhindern, sondern lediglich dazu, eine korrekte Aneinanderreihung der Zähne ohne Extraktion zu ermöglichen, ohne dabei jedoch dem Patienten eine absolute Stabilität versprechen zu

Literaturübersicht

können.“ [13] Daher ist die Indikation der approximalen Schmelzreduktion als Rezidivprophylaxe durchaus umstritten [34, 42].

Jedoch kann die Anwendung der approximalen Schmelzreduktion in der Unterkieferfront auch dem Erhalt der intercaninen Distanz dienen und vermeidet ein Expandieren während der Behandlung in diesem Bereich [31]. Dies trägt zur Stabilisierung des Behandlungsergebnisses bei [43].

Das Herstellen einer physiologischen Frontzahnrelation am Ende einer kieferorthopädischen Behandlung ist nach McLaughlin der 7. Schlüssel einer optimalen Verzahnung [44] und ergänzt die von Andrews propagierten 6 Schlüssel einer idealen Okklusion [45]. Der Schlüssel trägt maßgeblich dazu bei, das erzielte Behandlungsergebnis stabil zu halten.

Zu beachten ist bei der Indikation zur approximalen Schmelzreduktion auch die Zahnform, vor allem im Bereich der Schneidezähne. Laut Bennett gibt es drei verschiedene Kronenformen von Schneidezähnen rhomboid, dreieckig oder tonnenförmig [46]. So eignen sich dreieckige Zähne gut, um ausreichend Platz im Zahnbogen zu schaffen, rechteckige Zähne stellen eher eine Kontraindikation da.

Abschließend ist zu erwähnen, dass die approximale Schmelzreduktion auch an Milchzähnen angewandt werden kann [47].

Der Durchbruch der seitlichen Schneidezähne kann bei Vorliegen eines primären Engstandes erleichtert werden, indem am Milcheckzahn mesial Schmelz reduziert wird [47, 48].

Eine weitere Indikation ist das Prämolarisieren von persistierenden Milchmolaren beim Vorliegen einer Nichtanlage unterer zweiter Prämolaren, um eine Klasse-I-Okklusion einstellen zu können. Beachtet werden dabei muss jedoch die Wurzelmorphologie des Milchmolaren, da bei starker Divergenz der Wurzeln keine Prämolarisierung möglich ist [47].

Die Anwendung der approximalen Schmelzreduktion ist ebenfalls bei der Verwendung eines Funktionsreglers nach Fränkel Typ 2 notwendig, da für die Wirkung dieses Behandlungsgerätes die interdentale Einlagerung obligatorisch ist [47].

2.1.4.2 Kontraindikationen der approximalen Schmelzreduktion

Eine absolute Kontraindikation stellt die approximale Schmelzreduktion an bereits hypersensiblen oder kariösen Zähnen dar, da ein Verstärken der Symptomatik zu erwarten ist [3].

Eine relative Kontraindikation stellt das Vorliegen von ausgeprägten Engständen dar, die nur mithilfe einer Extraktionstherapie aufgelöst werden können [3]. Obwohl sich

Literaturübersicht

verschiedene Autoren uneinig über die maximal zulässige Abtragsmenge des Zahnschmelzes sind, sollte das übermäßige Reduzieren der Zahnbreiten, vor allem bei Jugendlichen, vermieden werden.

Ebenfalls sollte keine approximale Schmelzreduktion an mikroodonten Zähnen oder Zähnen mit abnormer Kronenmorphologie durchgeführt werden [3].

Restaurationen können ebenfalls die Möglichkeit zur approximalen Schmelzreduktion einschränken. Bei einer Kompositfüllung ist die mesiodistale Reduktion meistens möglich, bei Kronen und Brücken sowie im Bereich von Veneers sollte jedoch auf ein Bearbeiten der Approximalfläche verzichtet werden, um die Restauration nicht zu beschädigen. Ist eine Erneuerung der prothetischen Versorgung jedoch geplant, kann in Absprache mit dem behandelnden Zahnarzt eine Neuverteilung des Platzes erfolgen. Aus zahnerhaltenden Gründen sollte der Reduktion der artifiziellen Oberfläche, also des prothetischen Ersatzes, den Vorzug gegeben werden [49].

Auch sollte die Mundhygiene *des*der Patient*in bedacht werden, da durch die potenzielle Erhöhung der Rauheit der Schmelzoberfläche auch eine größere Plaqueakkumulation möglich ist, die bei reduzierter Schmelzdicke schneller zu klinischen Symptomen führt. Eine schlechte Mundhygiene und ein erhöhtes Kariesrisiko stellen ebenfalls Kontraindikationen dar. Auch bei einem schmalen interradikulären Knochen sollte die approximale Schmelzreduktion nicht angewandt werden [3].

2.1.5 Vor- und Nachteile der approximalen Schmelzreduktion

Nach über 80 Jahren kann man ebenfalls Vorteile sowie Nachteile der Behandlungsmethode der approximalen Schmelzreduktion aus klinischer Erfahrung benennen.

2.1.5.1 Vorteile der approximalen Schmelzreduktion

Ein Vorteil der approximalen Schmelzreduktion bei Nichtextraktionsfällen ist die Vermeidung von Überexpansion der Zahnbögen in transversaler und sagittaler Dimension [7, 50]. Durch die approximale Schmelzreduktion können die Zahnbogendimensionen erhalten werden, was auch Rezidiven vorbeugt.

Ein Vorteil im Vergleich zur Extraktionstherapie ist, dass nur genau so viel Schmelz abgetragen wird, wie zur Auflösung des Engstandes benötigt wird. Auch Sheridan et al. führten dies als wesentlichen Vorteil an, da nach der Extraktion häufig unästhetische

Literaturübersicht

Lücken entstehen, die durch festsitzende Apparaturen geschlossen werden müssen [29].

Daher können durch die approximale Schmelzreduktion nicht nur unästhetische Extraktionslücken vermieden werden, sondern es kann auch die Behandlungszeit im Ganzen verkürzt werden, da ein kieferorthopädischer Lückenschluss vermieden wird [31, 51, 52]. Dieser ist vor allem bei Erwachsenen aufgrund von schnellerem Knochenabbau und möglicherweise tiefen Rezessus der Kieferhöhle erschwert [21].

Auch schwarze interdentale Dreiecke würden durch eine Extraktionstherapie nur verstärkt werden, wohingegen man sie durch die approximale Schmelzreduktion reduzieren kann [11, 31, 32, 34].

2.1.5.2 Nachteile und Risiken der approximalen Schmelzreduktion

Zu den Nachteilen und Risiken der approximalen Schmelzreduktion werden ein erhöhtes Kariesrisiko, eine erhöhte Sensibilität und der Verlust des transseptalen Knochens genannt [3, 32, 33].

Die Gefahr der Erhöhung des Kariesrisikos durch die approximale Schmelzreduktion begründet sich zum einen durch das Entfernen der fluoridhaltigen oberen Schmelzschicht [29, 53]. Zum anderen kann die Vergrößerung der Oberfläche durch Erhöhung der Oberflächenrauheit zu einer vermehrten Plaqueakkumulation führen [54].

Eine Studie von Radlanski et al. fand sowohl in vivo als auch in vitro tiefe Riefen im Zahnschmelz nach der manuellen Benutzung von diamantierten Streifen oder diamantierten Bohrern [55-57]. Des Weiteren kam es in vivo zu einer erhöhten Plaqueakkumulation im Bereich der Riefen. Jedoch waren die untersuchten Flächen nicht von Karies betroffen [57].

In einer Studie von El-Mangoury et al. wurden extrahierte Prämolaren 6 Monate nach ASR untersucht. Auf den rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen waren Demineralisationszonen zu sehen. Dennoch schlussfolgerten die Autoren, dass die Erhöhung der Rauheit keine Prädisposition zu Karies bedeutet. Remineralisationen waren nach 9 Monaten sichtbar. Die Autoren schlossen daraus, dass die zusätzliche Applikation eines Versieglers den natürlichen Remineralisationsprozess verzögern würde. Die Applikation von Fluorid empfahlen sie jedoch [58]. Twesme et al. fanden in vitro demgegenüber eine erhöhte Kariesanfälligkeit und eine größere Tiefe der Demineralisation bei Flächen, die mithilfe von Air-rotor stripping behandelt wurden [59].

Bis heute konnten die vorhandenen Studien jedoch keinen Beweis für ein erhöhtes Kariesrisiko nach approximaler Schmelzreduktion finden [31, 60].

Literaturübersicht

Ein systematischer Review fand keinen Unterschied der Kariesanfälligkeit zwischen natürlichem Schmelz und Approximalflächen, die mit ASR behandelt wurden [61].

Zachrisson et al. untersuchten Patient*innen zehn Jahre nach approximaler Schmelzreduktion an den unteren Frontzähnen [62] und in einer weiteren Studie im Seitenzahnbereich [63]. Auch er fand kein erhöhtes Kariesrisiko im untersuchten Patient*innenkollektiv.

Ein weiterer potenzieller Nachteil ist, dass durch das Anwenden der approximalen Schmelzreduktion, die Zahnwurzeln der Zähne näher zusammenrücken. Årtun et al. untersuchten, ob ein dünnes interdentes Knochenseptum zu einem vermehrten Knochenabbau des marginalen Alveolarkamms führt. Dafür wurden erwachsene Patient*innen 16 Jahre nach kieferorthopädischer Behandlung auf ihre parodontale Gesundheit untersucht. Sie konkludierten, dass es keinen Zusammenhang zwischen Nähe der Wurzeln und marginalem Knochenabbau gibt [64].

Auch Boese untersuchte die parodontale Gesundheit von Zähnen nach ASR und supraalveolärer zirkulärer Faserdurchtrennung. Es konnte keine Erhöhung der Sondierungstiefen, Verlust des alveolären Knochens und vermehrte gingivale Rezessionen 4-9 Jahre nach der Behandlung verzeichnet werden [17].

Durch die maschinelle Anwendung von ASR-Geräten kann es außerdem zu einer Temperaturerhöhung im Bereich der Pulpakammer kommen. Nach Zach und Cohen kommt es bei einer Erhöhung der Temperatur in der Pulpakammer um 10 °F zu einer Zerstörung der Odontoblasten und einer Aspiration der Odontoblastenkerne, bei einer Erhöhung um 20 °F kam es zur Nekrose des pulpalen Gewebes [65].

In einer Studie von Baysal et al. konnten bei der Anwendung verschiedener ASR-Systeme eine Temperaturerhöhung über die kritische Gradzahl von 5,5 °C festgestellt werden. Auf eine Kühlung mit Wasser- oder Luftspray sollte daher nicht verzichtet werden [37]. Eine andere Studie fand keine Erhöhung der Temperatur in der Pulpa über den Wert von 5,5 °C [66].

Zuletzt sollte noch erwähnt werden, dass durch die approximale Schmelzreduktion im Bereich der Oberkieferfront es nach Bearbeitung der Approximalfläche vermehrt zu eher rechteckigen Kronenformen kommen kann [11].

2.1.6 Übersicht über verschiedene Verfahren der approximalen Schmelzreduktion

Für die approximale Schmelzreduktion stehen eine Reihe von Materialien und Methoden zur Verfügung. Dabei sind manuelle und maschinelle Verfahren voneinander zu unterscheiden [21].

Bei der manuellen Technik wird ein abrasiver Streifen per Hand direkt oder mittels eines Halters durch den Approximalkontakt geführt. Sie sind in unterschiedlicher Diamantierung, unterschiedlicher Breite, mit oder ohne Perforationen sowie ein- oder beidseitig erhältlich.

Gazzani et al. zufolge sind sie vor allem indiziert, wenn starke Rotationen vorliegen, bei Frontzähnen und für die Rekonturierung von Zähnen [67]. Andere Autoren weisen auf die erschwerte Anwendung im posterioren Bereich sowie auf den erhöhten Zeitaufwand hin [3, 21].

Bei den maschinellen Verfahren können abrasive Scheiben und Streifen sowohl oszillierend als auch rotierend zum Einsatz kommen [21].

Oszillierend werden Wabenscheiben oder diamantierte Streifen verwendet, rotierend diamantierte Scheiben, die jedoch einen zusätzlichen Schutz des Weichgewebes erfordern. Die verwendeten Scheiben und Streifen sind ebenfalls in verschiedener Diamantierung und Dicke verfügbar, was meist durch eine Farbcodierung sichtbar gemacht wird. Auch bei diesen Materialien sind sowohl ein- als auch beidseitige Instrumentenflächen verfügbar. Die diamantierten Wabenscheiben haben den Vorteil, dass sie durch die Schwenkung um 60° keines zusätzlichen Weichgewebsschutz bedürfen und eine gute Sichtbarkeit aufweisen [68].

Außerdem können dünne diamantierte oder Hartmetallbohrer zum Einsatz kommen. Dieses Verfahren propagierte vor allem Sheridan, der dieses „Air-rotor stripping“ nannte [29].

Während die Spannung der diamantierten Streifen die Form der Approximalfläche bestimmt, kann der Behandler mit den Bohrern direkt die Approximalform rekonturieren. Bei den maschinellen Systemen ist auf ausreichend Kühlung zu achten [29].

Neben den diamantierten Bohrern können auch diamantierte Ultraschallspitzen zum Einsatz kommen. Da das Werkstückende nicht flexibel ist, wird die Form daher durch das Instrumentenende vorgegeben. Das sogenannte „konkav-konvex-Strippinstrument“ intendiert dabei eine Umgestaltung der Kontaktfläche, um eine Verbesserung der Stabilität im Unterkieferfrontzahnsegment zu erhalten [69].

Bei der Auswahl des ASR-Tools sollte darauf geachtet werden, dass das System effektiv, reproduzierbar, verlässlich und sicher Schmelz reduziert [49].

2.1.7 Der klinische Ablauf der approximalen Schmelzreduktion

In der klinischen Anwendung wird zunächst durch die Vermessung der diagnostischen Modelle und der Fernröntgenseitenbildanalyse der exakte Betrag des Engstandes und die knöchernen Limitationen der möglichen Zahnbewegung definiert. Wird die Indikation zur approximalen Schmelzreduktion gestellt, muss zunächst festgelegt werden, in welchem Kiefer und an welchen Zähnen diese angewandt werden soll. Grundsätzlich sollte, wie bei der Extraktionstherapie, Platz möglichst dort geschaffen werden, wo er benötigt wird. Dadurch werden umfangreiche Zahnbewegungen vermieden.

In einem digitalen Workflow ist eine Simulation der Behandlungsschritte dreidimensional z. B. bei der Anwendung von ASR und Alignern möglich, analog gibt es die Möglichkeit, mithilfe eines diagnostischen Set-ups die geplanten Zahnbewegungen zu simulieren. Natürlich ist die Wahl des Behandlungsmittels und die Art der Verankerung ebenfalls zu beachten.

In jedem Fall ist es unabdingbar, dass die geplanten Abtragsmengen vom Behandler festgelegt werden und nicht von einer Firma oder einem Zahntechniker, da es sich um eine medizinische Therapie handelt und nur der Behandler die gesamten diagnostischen Unterlagen kennt. Referenzwerte, die in Studien angegeben werden, sollten dabei als Vorlage dienen.

Bei den festgelegten Abtragsmengen ist zum einen auf den benötigten Platz, zum anderen auf die in der Literatur an extrahierten Zähnen ermittelten maximalen Abtragswerte zu achten. Eine individuelle Messung der Schmelzdicke ist noch nicht möglich, eine Messung an Einzelaufnahmen ist einerseits zu ungenau und andererseits nicht mit den Grundprinzipien des Strahlenschutzes vereinbar. Ungenauigkeiten ergeben sich dadurch, dass sowohl die Angulation als auch das Vorhandensein eines Brackets einen signifikanten Einfluss auf die Messung der Schmelzdicke haben [70].

In der klinischen Anwendung sollten die Zähne, bei denen die approximale Zahnfläche durch Angulations- und Rotationsfehlstellungen nicht zugänglich ist, zunächst kieferorthopädisch bewegt werden oder der Kontaktpunkt durch ein Separiergummi aufgelöst werden. Ebenso sollte die Angulation des Zahnes zuvor korrigiert werden, um eine Bearbeitung der Approximalfläche parallel zur Zahnachse zu ermöglichen [21]. Soll eine Nachbarfläche nicht durch approximale Schmelzreduktion bearbeitet werden, ist sie z. B. durch eine Stahlbandmatrize zu schützen [49].

Durch Bearbeitung der Schmelzoberfläche wird deren Rauheit erhöht, was zu einer vermehrten Ablagerung von Plaque in den entstandenen Rillen und Furchen und damit zu einem erhöhten Kariesrisiko führen kann. Daher muss im Anschluss die aufgeraute Oberfläche geglättet werden. Es kann außerdem – vor allem bei der Anwendung von diamantierten Bohrern ohne nicht diamantierte Spitze – approximal zu Stufenbildungen oder einem Waschbrettmuster kommen [12, 32]. In diesem Bereich können iatrogene

Literaturübersicht

Kavitäten entstehen, die die Ablagerung von Nahrungsresten und das Entstehen einer interdentalen Karies begünstigen. Da gerade bei Patient*innen in kieferorthopädischer Behandlung mit einer Multibracketapparatur das Risiko für proximale Karies erhöht ist, ist auf eine anschließende Politur nicht zu verzichten [71]. Dafür stehen unterschiedliche Polierverfahren zur Verfügung.

Neben unterschiedlichen Scheiben und Streifen, mechanischen und manuellen Verfahren wurde von Joseph et al. ein kombiniert chemisch-mechanisches Verfahren propagiert, das 37%ige Orthophosphorsäure einsetzt [72]. Jedoch hat sich dieses Verfahren nicht durchgesetzt, obwohl Untersuchungen der Autoren gezeigt haben, dass glattere Oberflächen erzielt werden können als durch Politur mit Sof-Lex Scheiben [73]. Andere Studien zufolge entstehen jedoch durch die Anwendung von Phosphorsäure rauere Oberflächen im Vergleich zu anderen Verfahren mit anschließender Politur [74, 75].

In der Literatur werden unterschiedliche Politurzeiten angegeben, die von 20 s [9, 53] bis zu 180 s [11] reichen und sowohl manuell [55] als auch maschinell durchgeführt werden. Mehrere Autoren betonten, dass die abschließende Politur der gesamten beschliffenen Fläche wichtig ist [4, 9, 50].

Von Sheridan wurde propagiert, die Schmelzoberfläche im Anschluss an die proximale Schmelzreduktion zu versiegeln [76]. Das Ziel der proximalen Versiegelung ist das Vermeiden von zeitaufwendigen Politurmaßnahmen [77]. Die Probleme der proximalen Versiegelung sind jedoch der schwer zugängliche Approximalebereich und damit die erschwerte Trockenlegung, die Gefahr der Zytotoxizität [78] sowie das Verhindern von natürlichen Remineralisationsprozessen [77]. Remineralisation findet laut einer Studie von El-Mangoury et al. neun Monate nach ASR statt [58].

Im Anschluss an die proximale Schmelzreduktion sollte eine topische Applikation von Fluorid erfolgen [12, 79]. Bei anschließenden alternierenden Demineralisations- und Remineralisationszyklen in-vitro ist die Eindringtiefe der Demineralisation geringer und die Zahnoberfläche glatter [80].

Des Weiteren wird von einigen Autoren die topische Applikation von Casein Phosphopeptide-Amorphes Calciumphosphat (CPP-ACP) empfohlen [81, 82].

2.1.8 Abtragsmengen in der Anwendung der approximalen Schmelzreduktion

Für die klinische Anwendung der approximalen Schmelzreduktion muss berücksichtigt werden, wie viel Schmelz je nach Zahnart maximal entfernt werden kann.

Einigkeit besteht in der Literatur, dass höchstens die Hälfte der natürlichen Schmelzschicht entfernt werden darf, um den Schmelz nicht in seiner Resistenz gegenüber dem Mundhöhlenmilieu zu schwächen [29, 33, 39, 83].

Die empfohlenen Abtragsmengen beziehen sich dabei auf Messungen der Schmelzdicke an extrahierten Zähnen oder Röntgenaufnahmen, wobei die geringste gemessene Schmelzdicke meist als Referenz dient [13, 27, 29, 84, 85].

Der Schmelz ist in der approximalen Region generell dicker und nimmt nach cervical ab. Außerdem ist der Schmelz im Bereich der Seitenzähne dicker als im Frontzahnbereich [21].

Hall et al. fanden eine Korrelation zwischen der Schmelzdicke und der mesiodistalen Breite der Zähne [86]. Eine andere Studie von Hudson negierte einen derartigen Zusammenhang [27].

Auch bezüglich geschlechtsspezifischer Unterschiede gibt es widersprüchliche Angaben. Harris und Hicks fanden geschlechtsabhängige Schmelzdicke, während andere Autoren keine Unterschiede messen konnten [86-89]. Einigkeit herrscht, dass der Zahnschmelz im Bereich der Approximalkontakte distal dicker ist als mesial [84, 86, 87].

Die proximale Attrition ist ein weiterer, natürlich stattfindender dynamischer Prozess, der im Gegensatz zur okklusalen Attrition wenig untersucht worden ist, jedoch in einem durchaus klinisch relevanten Ausmaß – zum Beispiel in Hinblick auf die proximale Schmelzreduktion - stattfindet und dabei einen entscheidenden Faktor für die individuelle Schmelzdicke darstellt [90]. Dies sollte vor allem bei der Behandlung erwachsener Patient*innen beachtet werden.

Studien zur Schmelzdicke wurden nicht nur histologisch, sondern auch anhand von Röntgenaufnahmen wie zum Beispiel Bitewings [88] oder Einzelbildaufnahmen [86, 87] durchgeführt. Angesichts der Variabilität der individuellen Schmelzdicke wurde eine Messung anhand von kalibrierten Röntgenaufnahmen für die Behandlung daraufhin empfohlen [86].

Andere Studien haben jedoch einen statistisch signifikanten Unterschied zwischen radiologischen Messwerten und der tatsächlichen Schmelzdicke nachgewiesen [70, 91], wodurch die Verlässlichkeit dieser Messungen mit Zurückhaltung beurteilt werden sollte.

Literaturübersicht

Eine exakte Bestimmung der Schmelzdicke ist bisher jedoch nur durch histologische Untersuchungen möglich.

Daher überrascht es nicht, dass in der Literatur verschiedene maximale Abtragsmengen angegeben werden. Es besteht jedoch immer noch Uneinigkeit über die Höhe des maximal zu empfehlenden Abtrags [9].

Sheridan und Ledoux empfahlen eine Schmelzreduktion von insgesamt 6,4 mm posterior durch Anwendung des „Air-rotor strippings“ an den Prämolaren und Molaren [76]. Durch den zusätzlichen Schmelzabtrag im anterioren Bereich von 2,5 mm ist insgesamt ein Platzgewinn von 8,9 mm möglich [29]. Stroud et al. empfahlen nach der radiologischen Vermessung von Schmelzdicken von Prämolaren und Molaren eine Reduktion von insgesamt maximal 9,8 mm in dieser Region [84]. Fillion beschrieb einen maximalen Abtrag für Oberkieferschneidezähne von 0,3 mm, 0,2 mm für Unterkieferschneidezähne und 0,6 mm für Prämolaren und Molaren [13].

Eine relativ aktuelle Studie von Sarig et al. untersuchte die Schmelzdicke sowohl der anterioren als auch der posterioren Dentition. Sie fanden dabei einen Anstieg der approximalen Schmelzdicke von anterior zu posterior. Die Schmelzdicke im Frontzahnbereich betrug unter 1 mm, im Seitenzahnbereich 1,2-1,5 mm. Die korrespondierenden Zahnflächen hatten die gleiche Schmelzdicke bis auf den Kontakt zwischen lateralem Schneidezahn und Eckzahn. Daher empfahlen die Autoren eine Reduktion von 0,25 mm pro Approximalfläche im Frontzahnbereich und von 0,5 mm im Seitenzahnbereich [92]. Auch Vellini-Ferreira et al. haben eine Kartierung der Schmelzdicke innerhalb der Dentition unternommen. Auf der Basis ihrer Ergebnisse empfahlen sie einen geringeren Abtrag bei Schneidezähnen und mesialen Flächen [89].

2.2 Der humane Zahnschmelz

2.2.1 Mikroskopische Anatomie des Zahnschmelzes

Zahnschmelz ist die härteste Substanz im menschlichen Körper und besteht zu 95 % (86 Vol.-%) aus Hydroxylapatit [$Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$] [93-95], Proteinen und Wasser. [96] Aufgrund des Fehlens von Fasern und Zellen zählt es per Nomenklatur nicht als Gewebe [93].

Zahnschmelz zeichnet sich durch Härte und Festigkeit aus [97]. Das begründet sich unter anderem in der Orientierung der Schmelzkristalle. Diese sind regelmäßig angeordnet in Schmelzprismen, die von der Schmelz-Dentin-Grenze zur Schmelzoberfläche verlaufen [93]. Zwischen den Prismenstäben befindet sich der interprismatische Schmelz [93]. Das führt dazu, dass das Risiko von Rissen reduziert wird. Die Dichte der Kristalle ermöglicht einen erhöhten Härtegrad [94].

Der Zahnschmelz schützt das Dentin und die Pulpa vor äußeren physikalischen und chemischen Einflüssen, wie z. B. Demineralisationsprozessen [98].

2.2.2 Oberflächeneigenschaften natürlicher Zähne

Die Schmelzoberfläche ist bei mikroskopischer Betrachtung nicht komplett glatt. Ihre Beschaffenheit ist von vielen verschiedenen endogenen und exogenen Faktoren abhängig.

Morphologische und histologische Merkmale werden durch exogene Faktoren wie das Milieu der Mundhöhle sowie durch endogene Faktoren wie das Lebensalter beeinflusst [99] und unterliegen dabei einer inter- und intraindividuellen Variabilität [86]. Je nach Alter des*der Patienten*in findet man Rauheiten durch Perikymatien und natürliche Attritionsfacetten.

Die Schmelzoberfläche zeigt altersabhängige Veränderungen, was sich vor allem im Verlauf der Perikymatien zeigt. Bei einem jungen Patient*innen sind sie im zervikalen Bereich deutlicher ausgeprägt und liegen näher beieinander, wohingegen sie nach inzisal eher flacher ausgeprägt sind [100]. Im Alter werden diese abgeflacht und durch ein Riefenmuster abgelöst. Die natürlichen Schmelzoberflächen adulter Zähne zeigen leichte Rauheiten und Attritionsfacetten [77].

Durch Erosionen, Attrition, Abfraktion und Kaubelastung wird gerade die oberste Schicht des Zahnes – der Schmelz – in seiner Struktur verändert. Daher ergibt sich ein großer Unterschied zwischen der Untersuchung der Schmelzoberfläche eines zum Beispiel retinierten Zahnes, der niemals dem Milieu der Mundhöhle ausgesetzt wurde, und dem eines erst in hohem Alter aus parodontologischen Gründen extrahierten

Literaturübersicht

Zahnes, der durch Erosion und Attrition schon deutlich in seiner Oberfläche verändert wurde.

Der Zahnschmelz dient aufgrund seines hohen Mineralisationsgrades als schützende Schicht an der Außenfläche des Zahnes. Die Dicke des Schmelzmantels variiert in vielen Bereichen des Zahnes von 1,5-2 mm bis hin zu 0,2 mm. Der Zahnschmelz ist in der Regel zervikal und im Bereich der Fissuren besonders dünn [101].

2.3 Die proximale Attrition

Im Laufe des Lebens eines Menschen schleifen sich die Kontaktpunkte zwischen den Zähnen je nach Nahrungsverhalten mehr oder weniger zu Facetten ab. Diese „proximalen Attritionsfacetten“ (PAF) befinden sich in der inzisalen/okklusalen Hälfte der Approximallfläche (siehe Abb. 1 a und b). Dabei sind die mesialen Facetten eher lingual, die distalen Facetten eher bukkal positioniert. In ihrer Ausdehnung nehmen sie von anterior nach posterior zu. Diese Facetten können eine sehr glatte, polierte oder matte, unpolierte Oberfläche haben [90].

Obwohl verschiedene Ursachen nach wie vor diskutiert werden, sprechen immer mehr Untersuchungen dafür, dass die interdentalen Abrasionen durch Auswirkungen der Kaukräfte in Form von Bruxismus oder durch die Mastikation fester Nahrung entstehen [102, 103]. Im Gegensatz zur okklusalen Attrition haben aber feste Nahrungspartikel keinen direkten Einfluss auf die Schmelzoberfläche [104].

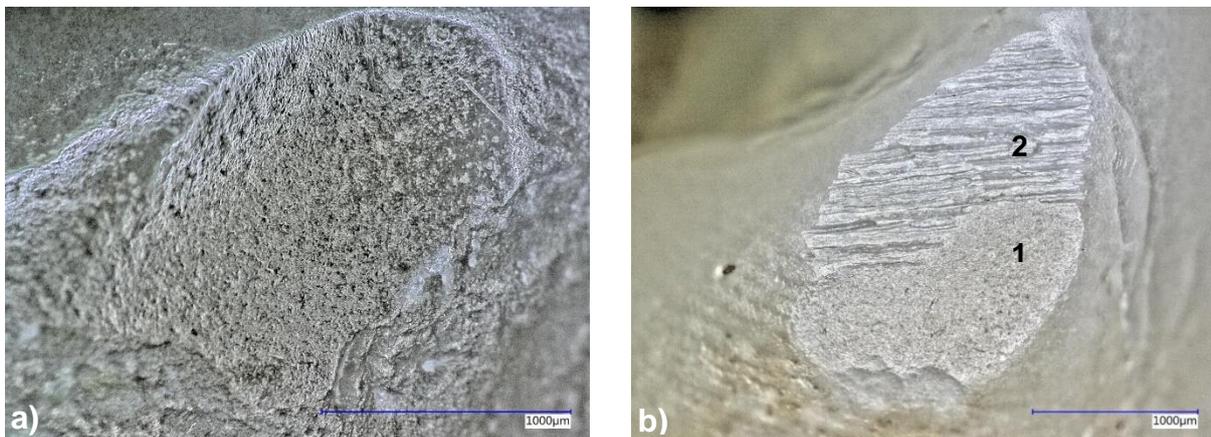


Abbildung 1 a und b: a) natürliche Attritionsfläche, b) Vergleich zwischen der natürlichen Attritionsfläche (1) neben einer (2) Schliiffacette durch proximale Schmelzreduktion; eigene Aufnahmen mit dem Keyence VHX-5000, Japan.

Für diesen dynamischen Prozess sind unter anderem die Zahn- und Wurzelstellung und das Vorliegen eines Engstandes sowie der parodontale Gesundheitszustand der Zähne von Bedeutung [105].

Laut einer Studie von Sarig et al. sind die Größe und Lokalisation der Attritionsfacetten geschlechts- und altersabhängig. Die Facettenfläche kann von 0,5 mm² bis 19 mm²

Literaturübersicht

variieren. Die dominierende Form ist dabei „subrectangular“. Die Facetten können zwischen dem ersten Molaren und zweitem Prämolaren konkav-konvex sein, zwischen dem ersten und zweiten Prämolaren dominiert jedoch der flächige Kontakt. Konkav-konvexe Flächen nehmen mit dem Alter zu [90]. Auch Ihlow et al. beschrieben diese konkav-konvexen Attritionsflächen im Prämolaren – und Molarenbereich bei Steinzeitgebissen und propagierten aus biomechanischen Gründen die vorteilhafte Ausweitung auf den Frontzahnbereich [69]. Die approximale Attrition scheint ab einem Alter von 40-45 Jahren im Gegensatz zur okklusalen Attrition nicht weiter zuzunehmen [105].

Die approximale Attrition führt zu einer Reduktion der mesiodistalen Zahnbreite und damit verbunden auch einer Verkürzung der Zahnreihe. Aufgrund der Änderung der Nahrungsgewohnheiten des modernen Menschen scheint sie jedoch eine eher untergeordnete Rolle zu spielen [106].

Im Bereich der Attritionsflächen sind Vertiefungen von maximal 30-40 µm auf rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen sichtbar [107, 108]. In Abb. 2 sind verschiedene natürliche Attritionsflächen beispielhaft dargestellt.

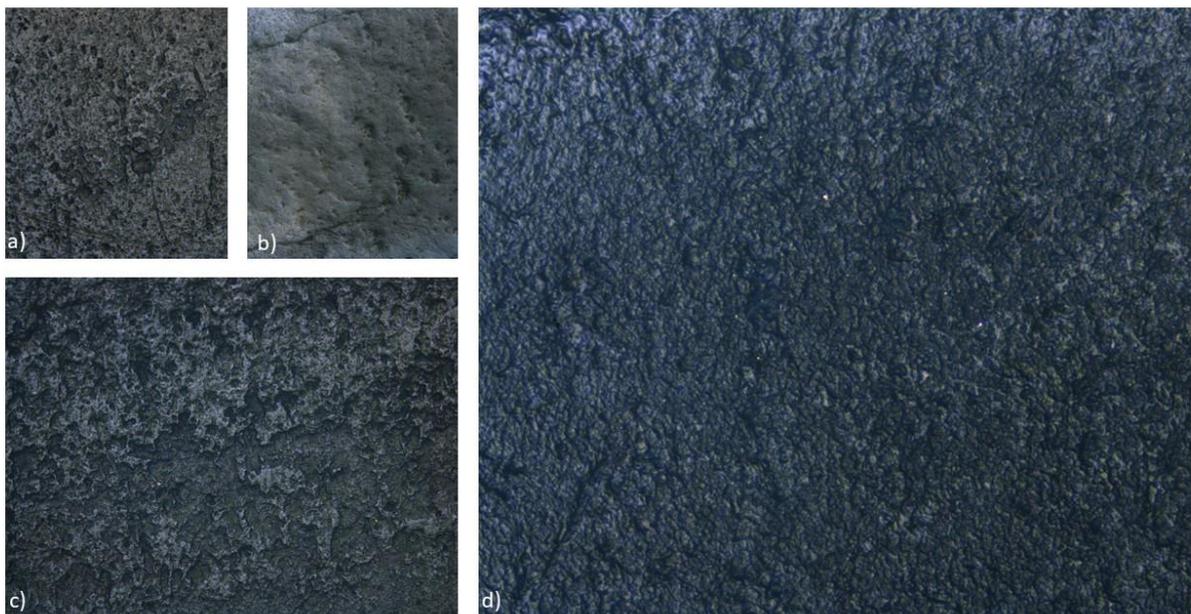


Abb. 2 a-d: Aufnahmen von vier verschiedenen natürlichen Attritionsflächen, a+b) natürliche Attritionsfläche mit vereinzelt Riefen und Vertiefungen im Schmelz, c+d) natürliche Attritionsfläche mit deutlichen Vertiefungen im Schmelz, eigene Aufnahmen mit dem Alicona InfiniteFocus, Graz.

2.4 Bisheriger Kenntnisstand in der Literatur

2.4.1 Anwendung verschiedener Systeme zur approximalen Schmelzreduktion

Etlliche Studien haben verschiedene Systeme zur approximalen Schmelzreduktion untersucht. Es wurden manuelle Systeme wie HORICO® (Hopf, Ringel and Co., Berlin) [57, 77, 109], New Metal Strips (GC, Tokyo, Japan) [9, 80], ContacEZ® (Ortho classic®) [110], Komet USA LLC [109], Dentaurum, Ispringen [75], Dentsply [111] untersucht.

Maschinell wurden oszillierende diamantierte Streifen wie das Intensiv Ortho-Strips-System (INTENSIV®-Swiss System) [9, 34, 80, 110, 112], Orthofile® [7], DiaStrip© (DentaSonic™, Cha, Switzerland) [113], Profin (Dentatus©) [9] und G5ProLign (Swissdentacare©, SDC; Granacia Switzerland) [4] geprüft.

Hartmetallbohrer von Komet (Gebr. Brasseler, Lemgo) [8, 52, 53, 114] und Diamantbohrer von Komet (Gebr. Brasseler, Lemgo) [8, 114], das „Air Rotor standard bur kid“ nach Sheridan (Raintree Essix©, Metarie;La) [9, 80, 115], Dentsply [111] und HORICO® (Hopf, Ringel and Co., Berlin) [68] wurden ebenfalls getestet.

Auch über die Verwendung von diamantierten Scheiben von HORICO® (Hopf, Ringel and Co., Berlin) [53, 68], Komet [75, 114] und Dentsply [111] sowie über die diamantierte Wabenscheiben von Komet [4, 9, 50, 80] wurde von mehreren Arbeitsgruppen geforscht.

Ultraschallsysteme wurden ebenfalls untersucht. Dazu gehörten das SonicLine System (Gebr. Brasseler GmbH 6 Co.KG, Komet; Lemgo,Germany) [4].

Eine Studie von Gazzani et al. verglich manuelle und maschinelle Anwendungen von ASR-Tools. Die Autoren fanden, dass maschinelle Systeme effizienter sind als manuelle Systeme [67].

Auch wurden in der Literatur Empfehlungen zur Anwendung der verschiedenen Systeme gegeben. Miethke und Jost-Brinkmann empfahlen z. B. für den posterioren Bereich ein modifiziertes Protokoll nach Sheridan, bei dem unter anderem ein Hartmetallbohrer mit vertikaler Bewegung zum Einsatz kam. Die vertikale Bewegung des Arbeitendes sollte die trianguläre Form des Kontaktpunktes und damit die Verlagerung nach gingival verhindern. Für die Anwendung anterior empfahlen die Autoren die Anwendung dünner, flexibler diamantierter Scheiben oder Wabenscheibensegmente [49].

2.4.2 Abtrag der Schmelzoberfläche

Einige Studien haben verschiedene Systeme zur approximalen Schmelzreduktion in Hinblick auf ihre Abtragsleistung miteinander verglichen.

In einer Studie von Zingler et al. konnte nicht nur ein signifikanter Unterschied innerhalb eines Systems zur approximalen Schmelzreduktion zwischen den verschiedenen Feilen festgestellt werden, was auf die unterschiedlichen Körnungsgrad des Systems zurückzuführen war. Ferner scheint die Dicke der Scheibe ebenfalls einen Einfluss auf den Abtrag zu haben [4].

Eine Studie von Lombardo et al., die das Orthofile®-System untersuchten, kam zu dem Schluss, dass es im Vergleich länger dauert, die ersten 0,1 mm Schmelz zu entfernen und führten dies auf die höhere Resistenz der Oberfläche und die Auflösung des Kontaktpunktes zurück [7]. Der Abtrag von 0,2 mm ging am schnellsten und das Intervall zum Erreichen ihres Zielabtrags von 0,3 mm dauerte wieder länger. Das erste Phänomen schrieben die Autoren dem Fehlen des Kontaktes zwischen den zwei Approximalflächen zu, das zweite Phänomen der stärkeren Abnutzung des ASR-Instruments. Die bereits zitierte Studie von Zingler et al. zeigte ferner, dass die Abtragsrate in den in dieser Studie untersuchten Intervallen konstant abnahm. Die Autoren führten dies auf die Vergrößerung der beschliffenen Zahnoberfläche während des Schleifprozesses zurück [4]. Johner et al. zufolge gibt es zudem einen signifikanten Unterschied zwischen dem geplanten und tatsächlichen Schmelzabtrag bei der Anwendung verschiedener Systeme zur approximalen Schmelzreduktion. Den Autoren zufolge wird die erreichte mesiodistale Reduktion mit manuellen Streifen durch das Drücken des Streifens oder der Messlehre in den Approximalkontakt mit anschließendem Auslenken der Zähne im Parodontalspalt überschätzt [5].

Lombardo et al. untersuchten verschiedene Feilen des Orthofile®-Systems. Sie kamen zu dem Ergebnis, dass die 25 µm großen Partikel belegten Feilen effizienter sind als die 15 µm belegten Feilen [7].

Durch die Politur der Schmelzoberfläche kommt es gegebenenfalls neben der nötigen Glättung zu einem weiteren Substanzabtrag. Hudson beschrieb einen zusätzlichen Substanzabtrag von 0,12 mm mit feinen Politurstreifen [27]. Dieser liegt jedoch laut einer Studie von Danesh et al. zwischen 0,0 – 0,02 mm bei der Anwendung der dem System entsprechenden Politurmitteln und ist daher vernachlässigbar [9]. Dabei muss jedoch beachtet werden, dass der zusätzliche Abtrag abhängig vom verwendeten Poliermittel, Druck und Schleifweg ist. Daher sind die Ergebnisse der beiden Studien nicht direkt numerisch miteinander zu vergleichen.

Kaaouara et al. untersuchten neben der mikroskopischen Oberflächenbeschaffenheit des Schmelzes auch die makroskopische Topografie der beschliffenen Approximalflächen. Bei den untersuchten manuellen Streifen und bei der Anwendung oszillierender ASR-Streifen (INTENSIV® -Swiss System) befanden sich die

Literaturübersicht

Schliffacetten in der gewünschten Kontaktregion, wohingegen sie bei den diamantierten ContacEZ®-Scheiben und dem ContacEZ©-Streifen leicht abwichen. Gerade bei den diamantierten Scheiben wurde die Zahnachse weniger respektiert [110].

2.4.3 Rauheit der Schmelzoberfläche

Nach der Bearbeitung der Oberflächen im Rahmen der approximalen Schmelzreduktion kommt es zu einer Erhöhung der Rauheit des Schmelzes, die durch anschließende Politur deutlich reduziert werden kann [9, 77].

Zur qualitativen Beurteilung der Schmelzoberfläche wurden oftmals rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen verwendet [7, 9, 11, 50, 52, 53, 68, 72, 75-77, 80, 109, 113-115]. Um die Rauheit der Schmelzoberfläche quantitativ zu beurteilen, wurden Rauheitsparameter taktil und nicht taktil erfasst [9, 75, 77, 80, 112, 113].

In verschiedenen Studien wurden manuelle und maschinelle Verfahren verglichen. Gerade bei der manuellen Anwendung zeigten die Schmelzoberflächen oftmals tiefe, irreguläre Furchen [110, 116]. Diese Riefen waren unregelmäßig verteilt und hatten keine Vorzugsrichtung [110]. In einer Studie von Bhambri et al. jedoch zeigten die Schmelzoberflächen nach Bearbeitung mit einem manuellen ASR-Streifen (30 µm) und anschließender Politur die glattesten Oberflächen [53]. Auch Arman et al. fanden für die Anwendung von diamantierten Streifen die glattesten Schmelzoberflächen [75].

Danesh et al. verglichen die Rauheit der Schmelzoberfläche mehrerer maschineller und eines manuellen ASR-Systems. Diese Studie ergab, dass das „Air-rotor-“ und das Profin-System die rauesten Schmelzoberflächen hinterließen [9].

In einer Studie von Gazzani et al. wurde die Anwendung einer standardisierten ASR-Sequenz mit diamantierten Streifen mit absteigendem Körnungsgrad im Vergleich zur Anwendung eines isolierten Streifens untersucht. Dabei waren die Oberflächen nach der Anwendung eines definierten Protokolls glatter als bei der Anwendung eines einzelnen Streifens. Die Oberflächen zeigten eine deutlich regelmäßige Schmelzoberflächen mit kleinen Riefen im Gegensatz zu deutlich unregelmäßigen und tiefen Riefen. Die Autoren schrieben das unter anderem der hohen Variabilität der Größe der Abrasivpartikel zu [113].

Radlanski et al. untersuchten in vivo Approximalflächen ein Jahr nach approximaler Schmelzreduktion. Ohne Politur waren die Furchen im Schmelz noch sichtbar, nur in Regionen mit direktem Zahn-zu-Zahn-Kontakt gab es durch die natürliche Attrition eine Einebnung dieser. Jedoch fand dieser natürliche Prozess vor allem nicht in den gingival gelegenen Regionen statt [57]. Da Zhong et al. ebenfalls zeigten, dass auch nach der Politur besonders in diesem Bereich noch Riefen sichtbar waren, sollte daher im klinischen Alltag dieser Region besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden. Die

Literaturübersicht

Verwendung einer ausreichend dimensionierten Polierscheibe (z. B. Sof-Lex Scheibe) ist zu empfehlen [68].

Uneinigkeit besteht bei den Ergebnissen nach Politur. Einige Studien zeigten, dass die Schmelzoberflächen nach Politur glatter als unbehandelter Schmelz waren [9, 50, 68, 80, 116], andere Studien konnten dies nicht bestätigen [74, 75, 77].

Eine rasterelektronenmikroskopische Studie fand sowohl Bereiche mit Schmelz, der glatter poliert war als natürlicher Schmelz, aber auch Regionen mit sichtbaren Riefen nach „Air-rotor stripping“ mit anschließender Politur mit Sof-Lex Scheiben. Die sehr gut polierten Bereiche waren jedoch nicht vorherrschend [115]. Eine andere SEM-Studie fand heraus, dass die Anwendung eines Hartmetallbohrers mit anschließender Politur mit Sof-Lex Scheiben zwar zu einer deutlichen Glättung der Schmelzoberfläche führte, jedoch war es nicht möglich alle Riefen zu eliminieren. Auch nach der Anwendung von diamantierten Scheiben mit anschließender Politur mit Sof-Lex Scheiben wurde die Rauheit der Schmelzoberfläche zwar reduziert, jedoch waren die Veränderungen des Schmelzes durch das ASR-Instrument noch sichtbar [53].

In der Studie von Gupta et al. wurden verschiedene Politurverfahren nach approximaler Schmelzreduktion miteinander verglichen. Die Verwendung einer diamantierten Scheibe und Sof-Lex-Scheiben erzielten dabei die glattesten Oberflächen [74]. Auch Bhambri et al. verglichen verschiedene Politurverfahren miteinander und konkludierten, dass glattere Schmelzoberflächen mit Sof-Lex Scheiben als mit diamantierten Bohrern zu erzielen waren [53].

Lombardo et al. zeigten, dass je feiner das verwendete ASR-Tool ist, desto leichter ist die anschließende Politur [7]. Dies steht in Übereinkunft mit der Untersuchung von Zingler et al., die verschiedene ASR-Tools mit unterschiedlicher Körnung verglichen. Sie fanden heraus, dass 30 Sekunden Politur nicht immer ausreichend sind. In dieser Studie wurden die Proben nach verschiedenen Politurzeiten (15 s und 30 s) untersucht [4].

In einer Studie von Luccese et al. wurden die glattesten Oberflächen nach der Anwendung von Hartmetallbohrern mit der anschließenden Politur mit Sof-Lex Scheiben (medium, fein, superfein) erzielt [52].

Eine Studie von Kaswan et al. konkludierte, dass es durch die Anwendung von Versiegeln zu glatteren Schmelzoberflächen kam [77]. Grippaudo empfahl ebenfalls die Anwendung eines Versieglers nach approximaler Schmelzreduktion [109].

2.4.4 Verschleiß der ASR-Instrumente

Livas et al. untersuchten die Oberflächeneigenschaften von fünf ASR-Instrumenten nach fünf aufeinanderfolgenden Anwendungen. Die untersuchten Instrumente wurden nach Herstellerangaben von einem Autor verwendet, ohne eine Angabe der applizierten Kraft. Dabei wurde zwar eine Reduktion der Rauheitsmesswerte, jedoch kein signifikanter Unterschied zwischen unterschiedlich diamantierten Instrumenten gefunden. Ebenfalls wurde der Einfluss der unterschiedliche Dicke der verwendeten ASR-Instrumente auf den Verschleiß untersucht. Dabei konnte bestätigt werden, dass dickere Streifen weniger Verschleißzeichen zeigten als dünnere [117]. Grippaudo et al. fanden auf rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen unterschiedliches Abrasionsverhalten zwischen den untersuchten ASR-Streifen. Wohingegen bei der Benutzung des HORICO-Streifens ein deutlicher Verschleiß mit Verlust der meisten Abrasivpartikel zu sehen war, zeigte der gröbere Komet-Streifen nur erste Verschleißzeichen mit dem Erhalt der Diamantpartikel in der Matrix. Der mittlere und feinere Komet-Streifen zeigte deutliche Verschleißzeichen, die jedoch nicht so stark ausgeprägt waren wie bei den Horico-Streifen [109].

Lione et al. untersuchten das Abrasionsverhalten der ASR-Instrumente mithilfe eines Tribometer und mit rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen. Dabei wurden unter in vitro Bedingungen 2 N Kraft appliziert. Den Autoren zufolge kommt es nach 5 Minuten Anwendung zu einer 60%igen Reduktion der Schleifwirkung in vitro. In vivo kam es noch zu einem schnelleren Verschleiß des ASR-Instruments, der damit begründet wurde, dass bei der initialen Applikation ohne bereits aufgelösten Kontaktpunkt in vivo höhere Kräfte aufgewendet wurden [10].

Die Studie von Gazzani et al. untersuchte unter anderem den Einfluss des Verschleißes bei mehrmaliger Anwendung. Dabei wurde eine Abnahme der Abtragsmenge festgestellt. Dies war vor allem bei der Verwendung manueller Streifen der Fall. Es zeigte sich eine Ablösung von Diamantpartikeln und Ansammlung von Debris besonders bei manuellen Streifen. Dies kann jedoch auch durch das Fehlen von Perforationen und das Fehlen der Wasserkühlung für den Abtransport von Schmelz erklärt werden [67].

2.5 Messung der Oberflächenrauheit des Zahnschmelzes

2.5.1 Oberflächenbearbeitung in der Zahnmedizin

In der Zahnheilkunde gibt es verschiedene Verfahren zur Bearbeitung von Oberflächen. Es wird zwischen spanhebenden und spanlosen Bearbeitungen unterschieden. Die sogenannten „spanabhebenden Verfahren“ werden nach der DIN 8580 im Fertigungsverfahren 3-Trennen in die Untergruppen „Spanen mit geometrisch bestimmten Schneiden“ und „Spanen mit geometrisch unbestimmten Schneiden“ (ISO 8589-0) unterteilt [118].

Der Zahnschmelz wird häufig aufgrund seiner großen Härte mit diamantierten Schleifmitteln abgetragen. Das sogenannte „Schleifen“ ist ein spanabhebendes Verfahren mit Werkzeugen mit geometrisch unbestimmten Schneiden. Diese Schleifkörper sind in der Regel in eine Matrix gebunden und zählen daher zu den mehrschneidigen Werkstücken [118, 119].

2.5.2 Allgemeine Grundlagen der Rauheitsmessung

Die Oberflächenrauheit wird definiert als „Oberflächenunregelmäßigkeiten mit relativ kleinen Abständen“ [120].

Nach der DIN 4760 werden verschiedene Gestaltabweichungen definiert. Die 1. Ordnung beschreibt die Formabweichung, die 2. Ordnung, die Welligkeit und die 3. bis 5. Ordnung die Rauheit [120, 121]. Daher muss für die Charakterisierung der Rauheit zunächst die Formabweichung und Welligkeit durch geeignete Filter aus dem Profil entfernt werden [120].

2.6 Allgemeine Grundlagen der Verschleißmessung

Für den Abtrag eines Materials ist das Schleifen eine grundlegende und präzise Methode [122]. Das abrasive Werkstück wird durch eine aktive Schleifoberfläche charakterisiert [123]. Dabei muss ein Abrasiv benutzt werden, dessen Abrasivpartikel mindestens 1,2-mal härter sind als die zu bearbeitende Oberfläche [124]. Ein weiterer wichtiger Faktor ist, dass die Größe und Form der Abrasivpartikel einen Substanzabtrag ermöglichen müssen [125]. Für die Effizienz ist es zudem wichtig, dass das Abrasiv eine lange Haltbarkeit hat und seine Schneideffizienz lange beibehält, um eine konstante Qualität des Abtrags zu gewährleisten [123].

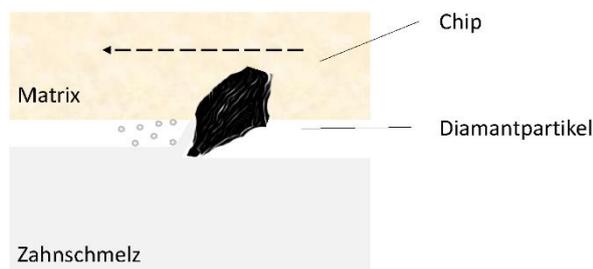


Abbildung 3: Schematische Darstellung von Schleifen mit einem diamantierten Abrasiv: Darstellung eines in die Matrix eingebetteten Diamantpartikels, welcher über die Zahnschmelzoberfläche in der mit einem Pfeil ← dargestellten Richtung geführt wird und den Zahnschmelz reduziert, eigene Grafik.

Für die diamantierten Schleifkörper können verschiedene Arten des Verschleißes zur Charakterisierung herangezogen werden. Es kommt im Allgemeinen dabei zum sogenannten abrasiven und zum adhäsiven Verschleiß [126]. Per Definition gleitet dabei das untersuchte harte Schleifmittel über ein weiches Material. In der vorliegenden Studie stellt das harte Schleifmittel die diamantierte Oberfläche des ASR-Instruments dar, der Zahnschmelz das weichere Material. Dabei können die harten Partikel im Sinne von kleinen Schneiden fungieren (siehe Abb. 3). Zu klassischen abrasiven Verschleißmechanismen gehören das Herauslösen ganzer Partikel und der Verschleiß an der Partikeloberfläche (Makro- und Mikrochipping von Partikelfragmenten, siehe Abb. 4) [127]. Zu den adhäsiven Verschleißmechanismen kommt es durch Temperaturanstieg, Druck und Friktion und in der Folge zu einer Adhäsion des weicheren Materials auf der Oberfläche des Arbeitendes. Im vorliegenden Beispiel zählen zu diesen Mechanismen die plastische Verformung der Diamantenoberfläche, das Verstopfen durch Debris und der Verschleiß der Matrix [126].

Der Verschleiß des Abrasivs kann durch verschiedene physikalische Mechanismen erfolgen. Die Diamantpartikel können aus der Matrix gerissen werden durch das Überschreiten des Ermüdungswiderstandes der Verbindungsstege zwischen den Schleifkörpern. Außerdem kann es zum Absplittern oder Abbrechen von Diamantpartikeln durch die Überschreitung des Ermüdungswiderstandes während der

Literaturübersicht

Verformung der Partikel kommen. Des Weiteren können die Partikel abstumpfen, was sich in einer graduellen Reduktion der Partikel mit Verschleißfacetten an den Spitzen zeigt. Ebenfalls kann es zu einem Schmierfilm auf der Oberfläche des Abrasivs durch die abgetragenen Späne der zu bearbeitenden Oberfläche kommen. Diese können zwischen den Abrasivpartikeln akkumulieren [122].

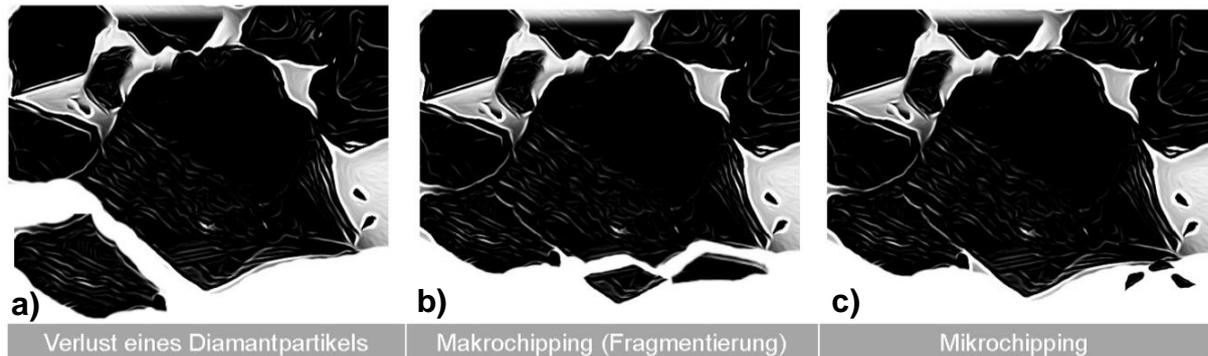


Abbildung 4 a-c: Schematische Darstellung von verschiedenen Verschleißarten der in der Matrix eingebetteten Diamantpartikel a) Verlust eines Diamantpartikels, b) Makrochipping, c) Mikrochipping; eigene Grafik

Die Form der Diamantpartikel ist für die Schleifwirkung wichtig, da sie einen Einfluss auf die Effizienz des Abtrags des verwendeten Abrasivs hat. Eine Studie, die zehn Typen von Diamantpartikel identifiziert hat, konnte eine Korrelation zwischen den Parametern Konvexität und Schärfe und dem Verschleiß feststellen [128].

Ebenfalls ist die Unterscheidung zwischen einem beschichtetem und einem geklebtem Abrasiv wichtig. Bei einem beschichteten Abrasiv sind abrasive Agglomerate, Teile vom Polyesterfilm und Kunststoffbrücken zu sehen [129].

Es gibt Veränderungen in den Verschleißraten. Dabei charakterisiert man unterschiedliche Phasen. In der ersten Phase ist das Abrasiv noch unbenutzt. In dieser initialen Phase scheint die Körnunggröße und die im Verhältnis dazu applizierte Kraft über die Effizienz des Abtrags zu entscheiden. Im nächsten Intervall kommt es je nach Art des Abrasives zur Abrundung der Schneidekanten oder zum Festsetzen von Verschleißpartikeln. Am Ende steht der Defekt eines Arbeitsteiles [130].

3 Zielstellung

Ziel der vorliegenden In-vitro-Studie war es, drei verschiedene ASR-Systeme bezüglich ihrer Effizienz untereinander zu vergleichen. Es wurden die Parameter Abtragsmenge pro Zeiteinheit, Rauigkeit der Schmelzoberfläche nach ASR und nach Politur sowie der Verschleiß der ASR-Geräte untersucht.

Für die Untersuchungen wurden das Komet-System, das Profin-System und das CA-System verwendet. Diese sind exemplarisch unterschiedliche maschinelle Systeme, die handelsüblich zur Anwendung kommen.

Obwohl es zahlreiche Studien gibt, die sich mit verschiedenen Systemen zur approximalen Schmelzreduktion auseinandergesetzt haben, gibt es nur eine bekannte Studie, in der eine Universalprüfmaschine zum Einsatz kam. Diese Studie setzt sich daher zum Ziel, durch eine verstärkte Objektivierung der Parameter einen weiteren Beitrag zur Vorhersagbarkeit des Abtrags von verschiedenen Instrumenten zur approximalen Schmelzreduktion zu liefern, der die klinische Anwendung erleichtern soll.

Ziel der vorliegenden Arbeit sind die Beantwortung folgender Fragen:

- Wie viel Schmelz tragen die drei unterschiedlichen Systeme zur approximalen Schmelzreduktion in einem Intervall von 30 Sekunden ab?
- Welchen Einfluss haben die verschiedenen ASR-Instrumente auf die Oberflächenrauheit der Zähne?
- Wie verändern sich die Rauheitsparameter nach Politur mit drei Sof-Lex-Scheiben (mittel, fein, superfein)?
- Wie sind die Schmelzproben qualitativ nach Politur zu bewerten?
- Gibt es ein unterschiedliches Verschleißverhalten der verschiedenen ASR-Instrumente?

Folgende Hypothesen sollten im Rahmen dieser Arbeit untersucht werden:

Als Nullhypothese galt, dass sich die Systeme nach einem Intervall von 30 Sekunden nicht in Ihrer Abtragsleistung unterscheiden.

Für die Rauheitsmessung wurde als Nullhypothese angenommen, dass sich die Schmelzoberflächen nach der Bearbeitung (Schmelzreduktion) (T1) und nach der Politur (T2) zwischen den Systemen nicht unterscheiden.

Für die Untersuchungen des Verschleißes wurde angenommen, dass sich die untersuchten Systeme nicht in ihrem Verschleißverhalten unterscheiden.

4 Materialien und Methoden

4.1 Herstellung der Prüfkörper

Für die Versuchsreihen wurden 50 extrahierte menschliche Zähne (83 Approximalflächen) verwendet, die in verschiedenen zahnärztlichen Praxen gesammelt wurden. Ein positives Votum der zuständigen Ethikkommission lag für das Protokoll zum Sammeln der Zähne vor (Antragsnummer: EA4/032/18). Die Zähne wurden in Chloramin-T-Lösung (0,5 %) gelagert. Einschlusskriterien waren Frontzähne und Prämolaren ohne Karies, Demineralisation, Füllung oder Schmelzanomalie im Approximalbereich. Das Vorliegen einer natürlichen Attrition war kein Ausschlusskriterium, wurde jedoch vermerkt.

Die Zähne wurden anschließend von einer Untersucherin (N.A.) auf Eignung mittels Lupenbrille geprüft. Zunächst erfolgte eine Grobdeposition. Konkrement und apikales Gewebe wurden mithilfe von Ultraschall entfernt. Dann wurden die Zahnoberflächen für 30 Sekunden mit fluoridfreier Polierpaste (Superpolish) poliert. Die Zähne wurden mit Aqua dest. gereinigt, die Polierrückstände wurden mit einem in 70 % Ethanol getränktem Wattepellet entfernt. Daraufhin wurden die Zähne erneut mit Aqua dest. gereinigt und wieder in einem Sammelgefäß in Chloramin-T-Lösung (0,5 %) gelagert.

Im Labor wurden bei allen Zähnen die Zahnachse in orovestibulärer und mesiodistaler Richtung mit einem Permanentmarker angezeichnet. Die Zähne wurden mit einer selbst hergestellten Fixierungshilfe positioniert. Daraufhin wurde ein Stellschlüssel inzisal/okklusal mit Klebewachs befestigt (siehe Abb. 5 a und b). Die Zähne wurden zum Einbetten in eine Silikonform mit quadratischer Grundform leicht exzentrisch mithilfe eines Stellschlüssels mit Klebewachs festgewachst (siehe Abb. 5 c-e).

Zum Einbetten der Zahnwurzeln wurde Paladur klar (Haereus Kulzer) verwendet. Der Kunststoff wurde nach Herstellerangaben (10 g Pulver: 6 ml Flüssigkeit) blasenfrei angemischt und in die Formen (jeweils 2,5 cm x 2,5 cm x 2,5 cm) gefüllt. Beim Übergang in die plastische Phase wurde eine silberne stecknadelförmige Kugel vor den einzubettenden Zahn platziert. Die Aushärtung erfolgte bei 2 bar und 55 °C im Drucktopf.

Die so hergestellten Prüfkörper wurden erneut von der Untersucherin (N.A.) inspiziert und Zahnform und Zahnart wurden notiert. Ungeeignete Approximalflächen wurden von der Studie ausgeschlossen. Die Prüfkörper wurden in Frontzähnen und Prämolaren getrennt. Bei einigen Prüfkörpern wurde nur eine der Approximalflächen in die Studie miteinbezogen.

Materialien und Methoden

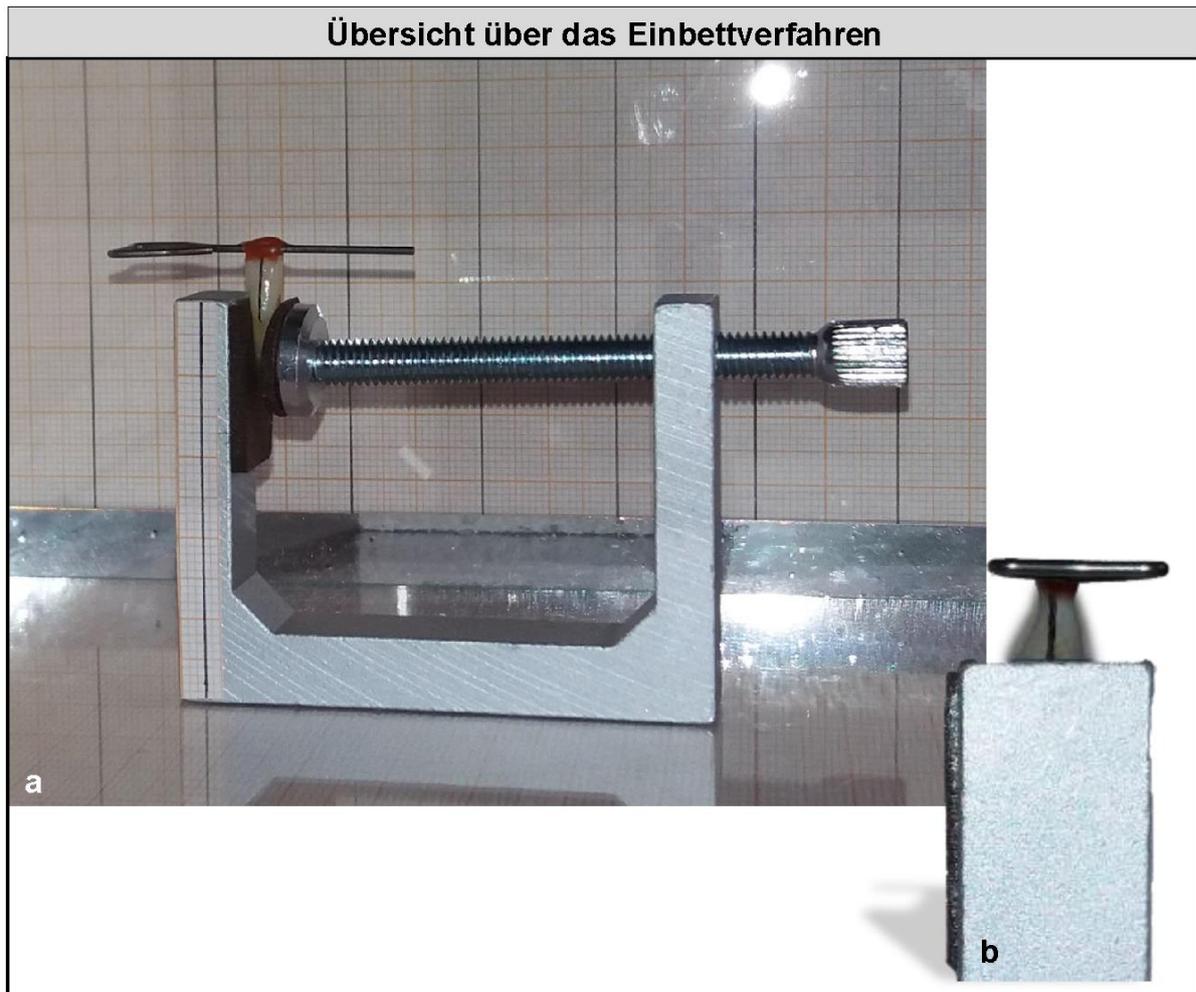


Abbildung 5 a und b: Probenherstellung: a) mit Permanentmarker angezeichnete Zahnlängsachse; b) Detailausschnitt: senkrechter Blick auf die Approximallfläche; Schneidezahnkrone mit Stellschlüssel; Fixierung des Stellschlüssels senkrecht zur Zahnachse

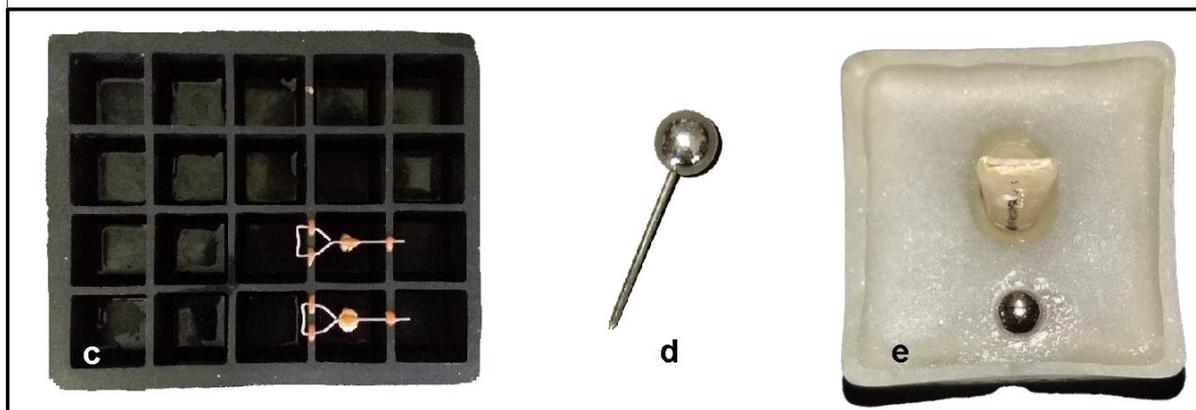


Abbildung 5 c-e: Probenherstellung: c) Fixierung des Stellschlüssels in der Silikonform, d) Stecknadel mit rundem Kopf, e) Einpolymerisieren der Stecknadel leicht exzentrisch beim Übergang in die plastische Phase; Bild vom fertigen Prüfkörper

Abbildung 5 a - e: Übersicht über das Einbettverfahren: a+b) Ausrichtung des Stellschlüssels mit Fixierung des Stellschlüssels, c-e) Fixierung des Stellschlüssels und Einbetten des Prüfkörpers mit der Stecknadel in Paladur klar, eigene Aufnahmen mit Kamera.

Materialien und Methoden

Für die erste Hauptversuchsreihe (Abtrag/Rauheit) wurden 14 Prämolaren und 15 Frontzähne zufällig aus den hergestellten Prüfkörpern ausgewählt. Die verbliebenen 48 Approximalflächen wurden nummeriert und mittels Excel-Tabelle randomisiert. Für die Prüfgruppe Prämolaren wurden diese einer der drei Untersuchungsgruppen (siehe Abb. 6a-c) zugewiesen: Komet 045, Profin rot, CA grau. Analog wurde mit der Frontzahngruppe verfahren. Diese wurden durch die Randomisierung zufällig einem der drei Systeme zugeordnet: Komet 030, Profin lila, CA rot (siehe Abb. 7a-c).

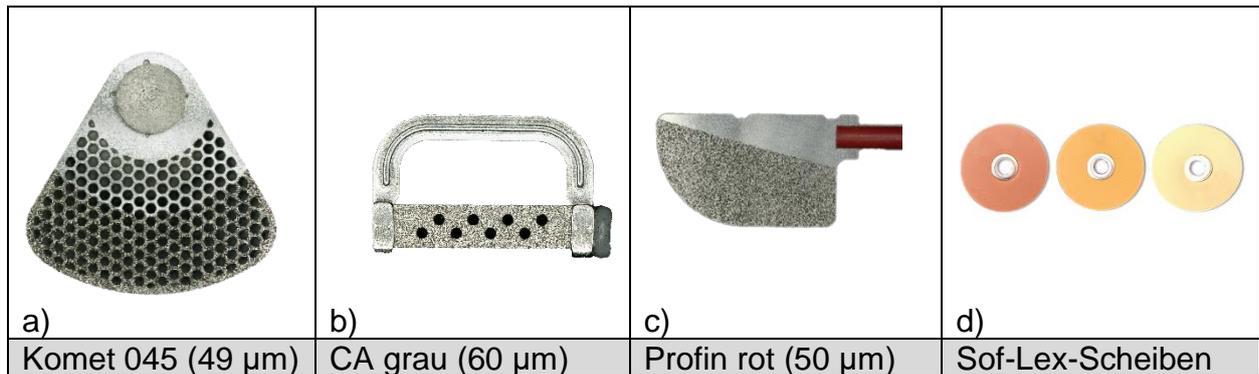


Abbildung 6 a-d: Übersicht über die verwendeten ASR-Instrumente für die Prüfgruppe Prämolaren: a) Komet 045, b) CA grau, c) Profin rot, d) Sof-Lex Scheiben mittel, fein, superfein; eigene Aufnahmen a-c mit dem Keyence und d) mit Kamera.

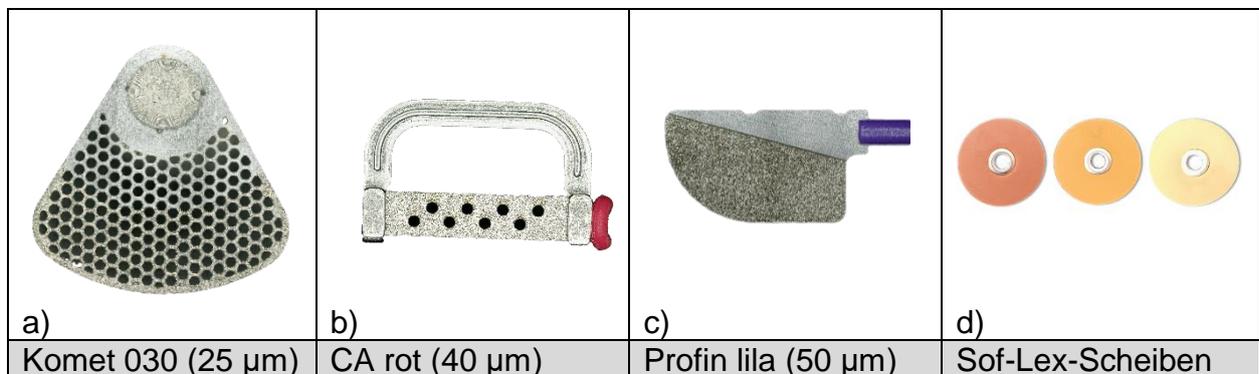


Abbildung 7 a-d: Übersicht über die verwendete ASR-Instrumente für die Prüfgruppe Frontzähne: a) Komet 030, b) CA rot, c) Profin lila, d) Sof-Lex Scheiben mittel, fein, superfein; eigene Aufnahmen a-c mit dem Keyence und d) mit Kamera.

Für die zweite Hauptversuchsreihe (Verschleiß des Instruments) wurden 21 Frontzähne und insgesamt 35 Approximalflächen verwendet. Diese wurden zufällig auf die fünf Untergruppen Komet 025, Komet 020, Profin lila, CA grau, CA rot aufgeteilt (siehe Abb. 8 a-e). Eine Randomisierung war in diesem Fall nicht notwendig, da die Prüfkörper nur als humane Schmelzproben dienten und nicht weiter vermessen wurden. Aufgrund der geringen Abtragsleistung (Ergebnisse aus erster Versuchsreihe) konnten für das CA-System und das Profin-System die Prüfkörper für den zweiten Zyklus wiederverwendet werden, beim Komet-System wurden neue Schmelzproben verwendet. Eine Übersicht über die verschiedenen Versuchsreihen ist in Abbildung 9 (Seite 33) dargestellt.

Materialien und Methoden

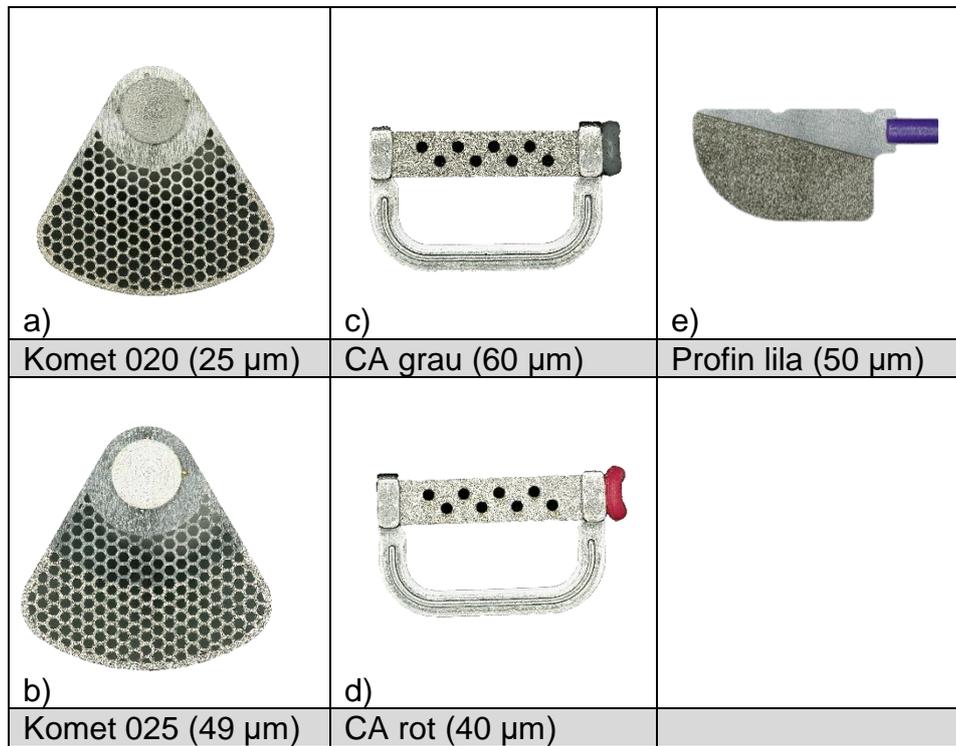


Abbildung 8 a-e: Übersicht über die untersuchten ASR-Instrumente für die Prüfreihe Verschleiß:
a) Komet 020, b) Komet 025, c) CA grau, d) CA rot, e) Profin lila; eigene Aufnahmen mit dem Keyence.

Materialien und Methoden

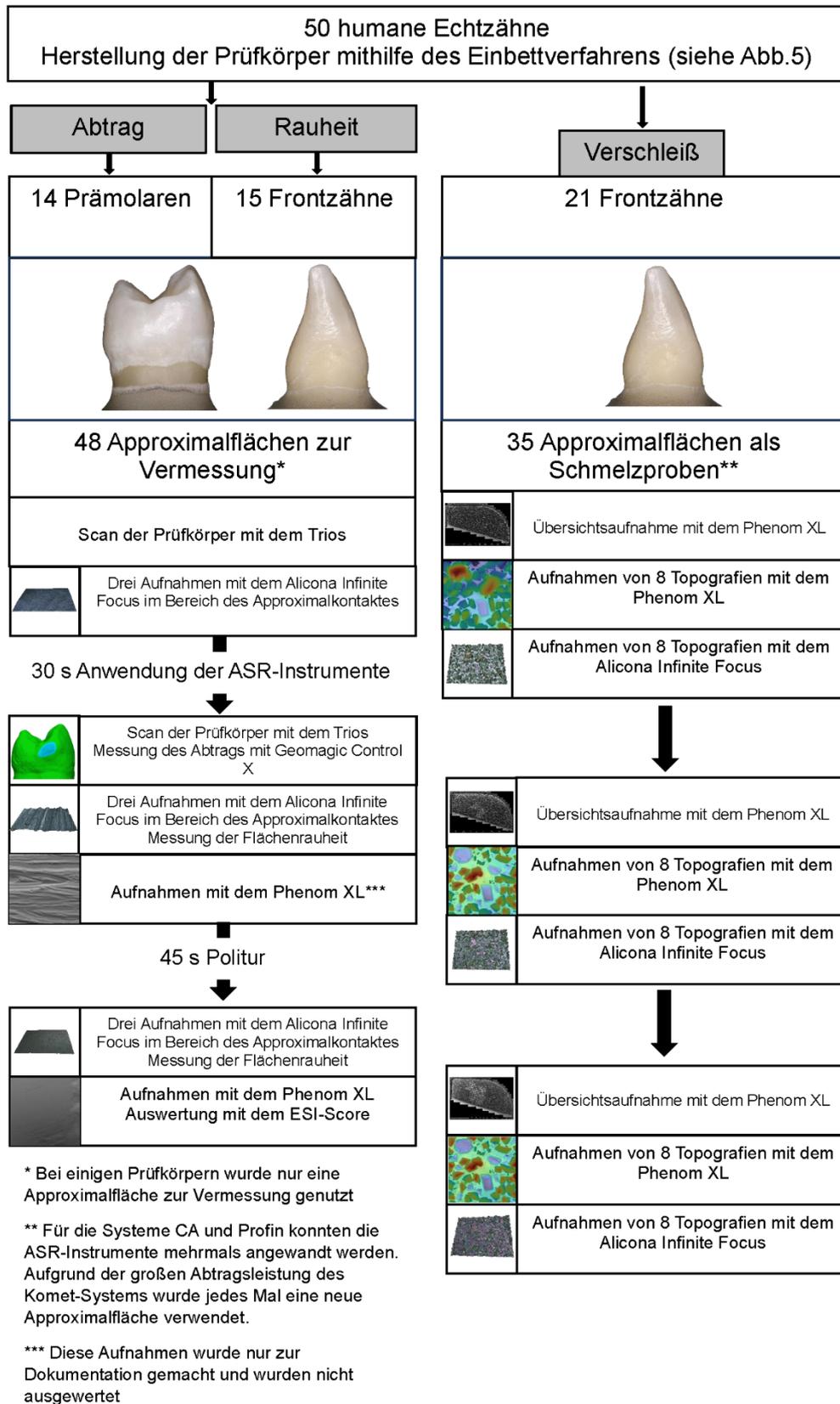


Abbildung 9: Flussdiagramm über die verschiedenen Versuchsreihen Abtrag/Rauheit und Verschleiß; Anzahl der verwendeten Prüfkörpern und Aufteilung in die verschiedenen Versuchsreihen; detaillierte Beschreibung der Messverfahren im jeweiligen Kapitel; eigene Aufnahmen mit dem Keyence, Phenom XL und Alicona InfiniteFocus.

4.2 Approximale Schmelzreduktion - Versuchsaufbau

Die Proben wurden in einem eigens für die Studie hergestellten Probenhalter mithilfe von drei Schrauben fixiert (Abb. 10b). Die Halterung konnte in drei Positionen auf dem Probenteller befestigt werden (Abb. 10a). Für die Fixierung am Probenteller der Zwick wurden Zwingen verwendet.

Zur Objektivierung des Parameters Kraft wurden die Versuche an einer Universalprüfmaschine Zwick Z005 (Fa. Zwick Roell, Ulm, Deutschland) durchgeführt (siehe Abb. 11, S.36). Es wurde eine 200 N Kraftmessdose verwendet. Ein definiertes Prüfprotokoll nach der Vorgabe zyklische Prüfung wurde für die Versuchsreihe angewandt.

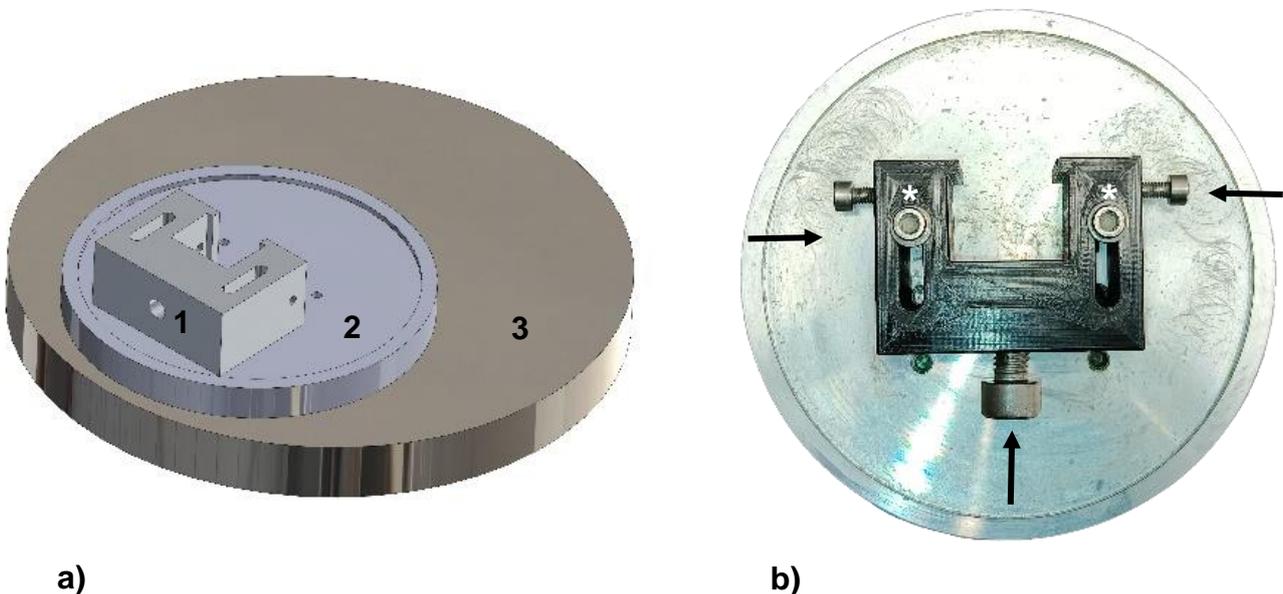


Abbildung 10 a und b: a) Planungssimulation des Probenhalters (1), der auf dem kleinen Probenteller (2) am Probenteller der Zwick (3) befestigt wurde, *Konstruktionszeichnung mit freundlicher Genehmigung des Centrums Wissenschaftliche Werkstätten, Erik Ode*, b) Probenhalter aus POM, drei Schrauben (→) dienen der Fixierung des Prüfkörpers; Probenhalter ist über zwei Schrauben (*) in drei Positionen fixierbar.

Als Vorkraft wurde 0,1 N definiert, danach wurden 2 N erreicht. Die 2 N wurden kraftgeregelt durch Nachführen des Instruments gehalten. Es wurde zuerst eine Kalibrierung pro Probe durchgeführt, um sicherzustellen, dass die Kraft von 2 N im vorgesehenen Intervall von 30 Sekunden erreicht wird und kein Kontakt zwischen der Probe und dem Instrument ohne Messung stattfinden konnte. Der externe Chirurgiemotor INTRASurg 300 plus (KaVo) wurde gemäß der vorgegebenen Umdrehungszahl (siehe Tabelle 1) eingestellt und in Kombination mit dem jeweils kompatiblen Winkelstück während des Untersuchungszeitraums über den Pedalschalter bedient. Es wurde mit 50 ml/min Wasserkühlung gearbeitet.

Materialien und Methoden

Firma	ASR-Tool	Handstück	Umdrehungszahl
Komet, Bersigheim, Germany	Komet OS-Scheiben	Komet O-Drive D30 (8:1)	20 000 U/min
Scheu Dental	CA-Stripping Tool	EVA- Winkelstück (2,4:1)	12 000 U/min
Dentatus, Stockholm, Schweden	Profin- IPR Tool	Profin-Winkelstück PDX (1:1)	8 000 U/min
3MEspe	SofLex Scheiben	blaues Winkelstück (1:1)	10 000 U/min

Tabelle 1: Übersicht über die in der Studie verwendeten ASR-Systeme mit Angabe des benutzten Winkelstücks und der eingestellten Umdrehungszahl

Die grafische Darstellung in Form von Kraft-Zeit-Diagrammen wurde mit dem Programm „testxpert“ aufgezeichnet.

Das Intervall zur Schmelzreduktion betrug jeweils 30 Sekunden. Nach Beendigung wurde die Probe sofort entlastet. Daher wurde gewährleistet, dass nur in dem vorgegebenen Intervall ein Kontakt zwischen der Probe und dem ASR-Gerät bestand. Das ASR-Instrument wurde nach n=4 gewechselt.

Daraufhin wurden die Proben manuell an einer Behandlungseinheit mit drei Sof-Lex-Scheiben (mittel, fein, superfein) für jeweils 15 s (insgesamt 45 s) poliert. Die Sof-Lex-Scheiben wurden nach n=4 gewechselt.

Die Versuche zur Ermittlung des Verschleißes wurden ebenso durchgeführt, jedoch wurden ausschließlich Frontzähne verwendet und die Umdrehungszahl für das Komet-Set erhöht (40 000 U/min), um einen längeren Schleifweg zu erzeugen.

Materialien und Methoden



Abbildung 11: Versuchsaufbau in der Universalprüfmaschine für Prüfung von Abtrag, Rauheit und Verschleiß: 1) Chirurgie Motor (KaVo INTRAsurg 300 plus) 2) Auffangbecken für Kühlwasser, 3) Einspannvorrichtung für das ASR-Instrument, a) für das Komet-System, b) für das CA-System, c) für das Profin-System. Der Probenhalter wurden mit Zwingen auf dem Probenteller fixiert, 4) das Winkelstück wurde mithilfe von Silikon in einem Aluminiumprofil fixiert und dann mithilfe eines Schraub-Probenhalters an der Zwick befestigt, 5) Traverse der Zwick, eigene Aufnahmen mit Kamera.

4.3 Messung des Schmelzabtrages mit Geomagic Control X

Um die verschiedenen Systeme zur approximalen Schmelzreduktion im Hinblick auf den Parameter Abtrag des Schmelzes pro Zeiteinheit miteinander zu vergleichen, wurden die Prüfkörper (Zahnkronen und oberer Rand des Kunststoffkörpers) vor und nach der Bearbeitung überlagert.

Die Prüfkörper wurden mithilfe eines intraoralen Scanners (TRIOS 3, 3Shape, Copenhagen, Denmark) gescannt, lokal gespeichert und auf ein Speichermedium transferiert. Dabei wurde der Scankopf von der Untersucherin zunächst okklusal/inzisal über den Prüfkörper und anschließend zirkulär über die vestibulären und approximalen Flächen geführt. Die Scans wurden als stl. (Surface Tesselation Language) Dateien gespeichert.

Für die Überlagerung und dreidimensionale Vermessung des Abtrages durch approximale Schmelzreduktion wurde das Programm Geomagic Control X (vs.2020, 3D Systems, Morrisville, NC, USA) verwendet.

Für diese Software stehen verschiedene Überlagerungsmodule zur Verfügung. Man kann den gesamten Datensatz überlagern („globales Best-Fit Alignment“), Referenzpunkte („landmark Best-Fit Alignment“) oder Sektionen/Flächen („reference-based Best-Fit-Alignment“) zur Überlagerung wählen.

Für die Möglichkeit einer „reference-based Best-Fit“-Überlagerung wurde die silberne Kugel innerhalb des Prüfkörpers positioniert. Es wurden stabile Referenzflächen gewählt (siehe Abb. 12 a-c), die sich nicht im Bereich des Abtrages befanden. Pro Prüfkörper wurden acht stabile Regionen gewählt. Die Überlagerung erfolgte zunächst nach dem Initial Alignment. Daraufhin erfolgt das Best-Fit Alignment über die ausgewählten Regionen, also „reference based“. Die zu vermessenden Regionen wie die Approximalregion wurden dabei ausgespart. Daraufhin wurde zudem auf eine ausgeglichene Gaußsche Kurve beim Alignment geachtet (s. Abb. 12 d-g). Wenn beide Approximalflächen für die Auswertung genutzt wurden, wurden zwei Schnittebenen im Bereich der Approximalkontakte senkrecht zur Zahnachse gezogen. Der Bereich des Approximalkontaktes wurde dann je nach Zahnart und Anatomie individuell festgelegt. Es wurde auf 2D-Schnittebene der maximale Abtrag mit dem Tool „2D Compare“ gemessen (siehe Abb. 12 h).

Die Scans wurden in einem klimatisierten Behandlungszimmer im Herbst/Winter durchgeführt. Die Prüfkörper wurden ebenfalls temperatur- und lichtgeschützt in Aqua dest. gelagert.

Materialien und Methoden

Messung des Parameters Abtrag mit Geomagic Control X

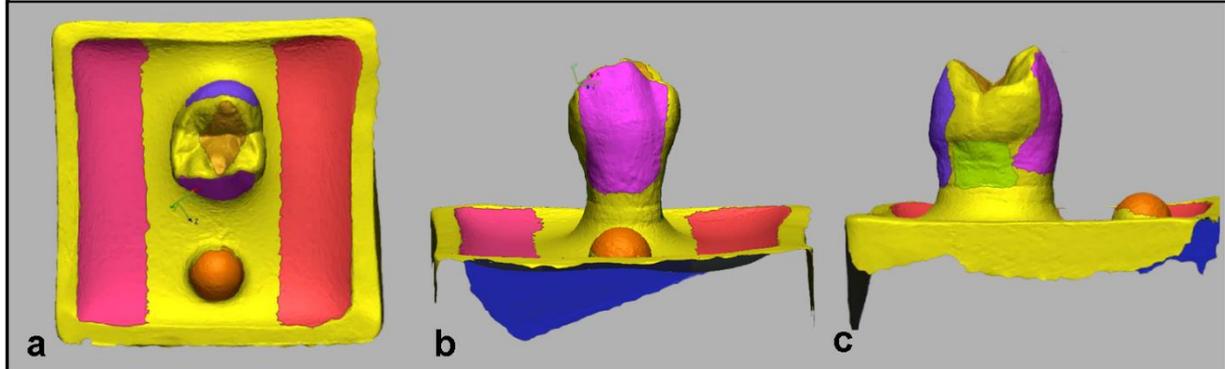


Abb. 12 a-c): Auswahl von stabilen Referenzflächen zur Überlagerung, die außerhalb des Approximalkontaktes liegen a) Ansicht von okklusal, b) Ansicht von vestibulär, c) Ansicht von approximal

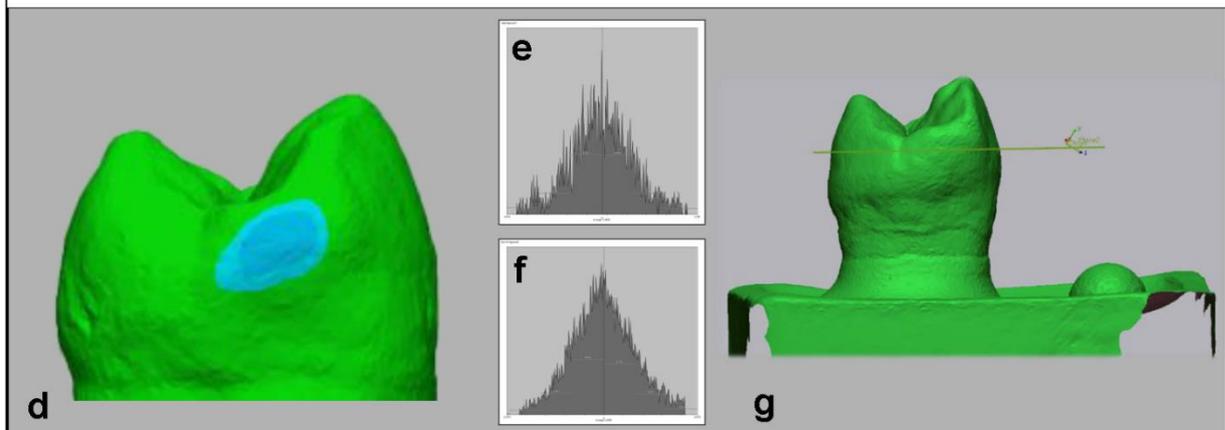


Abb. 12 d-g): d) Überlagerung nach e) Initial Alignment und f) Best-Fit Alignment, g) Wahl einer Referenzebene im Bereich des Approximalkontaktes für den 2D-Compare

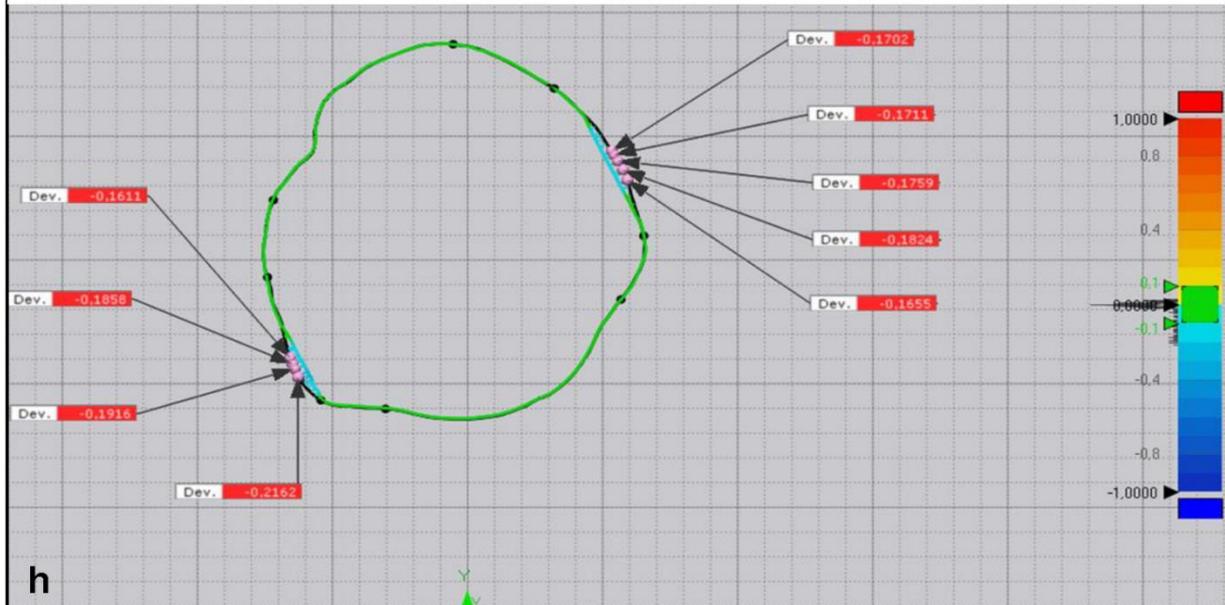


Abb. 12 h): Messung des größten linearen Abstands auf Höhe der Referenzebene mit dem 2D-Compare Tool

Abbildung 12 a-h): Übersicht über die Messung des Parameters Abtrag mit Geomagic Control X, eigene Bilder aus den Prüfprotokollen der Hauptversuchsreihe.

4.4 Prinzip der Focusvariation

Die Focusvariation ist ein lichtbasiertes optisches Messverfahren, welches sowohl linien- als auch flächenbasierte Rauheitsmessung nach der ISO 25178 erlaubt. Das Prinzip wurde von H. von Helmholtz in der Mitte der 20er-Jahre entwickelt und von Leach, Helmi, Danzl, Prantl und Scherer in den 90er-Jahren weiterentwickelt [129].

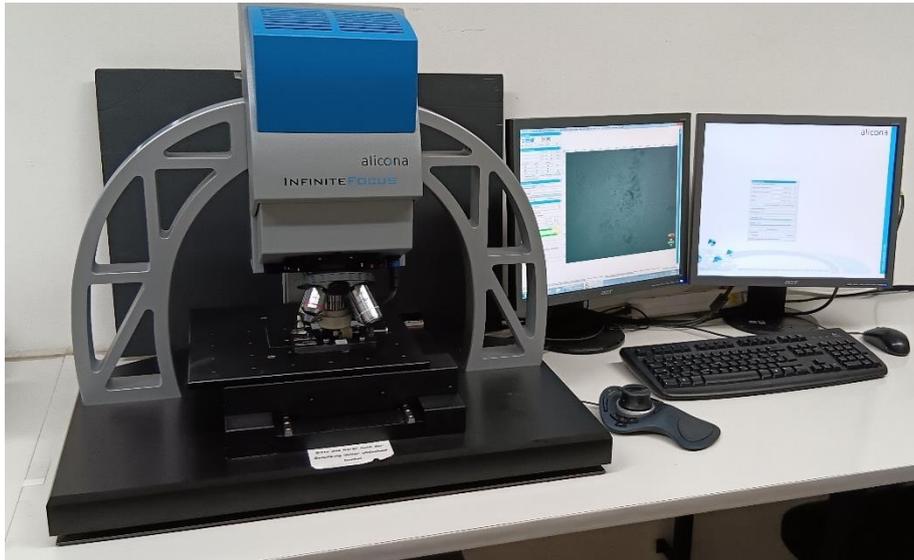


Abbildung 13: Übersichtsaufnahme des verwendeten Alicona InfiniteFocus, IFM G4, eigene Aufnahme.

Das in dieser Studie verwendete Mikroskop ist das InfiniteFocus (IFM G4) von Alicona Imaging GmbH (siehe Abb.13). Mithilfe der Präzisionsoptik des Mikroskops wird eine Abfolge von Bildern während eines vertikalen Scanprozesses angefertigt [131]. Die Objektive, die nur über eine begrenzte Tiefenschärfe verfügen, fokussieren dabei das von der Probe reflektierte Licht in einem limitierten Schärfebereich [132]. Das Mikroskop verfügt über mehrere Objektive (5x, 10x, 20x, 50x, 100x) [133]. Das Weißlicht wird zunächst über einen Strahlenteiler und durch das verwendete Objektiv auf die zu vermessende Probe gelenkt [132]. Je nach Oberflächeneigenschaft der Probe wird das Licht streuend oder spiegelnd reflektiert [131]. Bei streuender Reflexion wird das Licht gleichmäßig verteilt reflektiert, bei spiegelnder Reflexion vorwiegend in eine Richtung [132]. Das reflektierte Licht wird zunächst durch die Linsen gebündelt und durch den Strahlenteiler zum photoelektrischen Detektor geleitet und von diesem verarbeitet [129] (siehe Abb.14).

Für jedes Pixel wird ein lokaler Kontrastwert gemäß seiner Anordnung in der Horizontalebene (x- bzw. y-Achse) gegeben, der durch einen Algorithmus berechnet wird, der die umgebenden hellen und dunklen Pixel miteinbezieht. Dies geschieht gemäß folgender Formel:

$$F_z(x, y) = FM(\text{reg}_w(I_z(x, y)))$$

bei

$$FM = \frac{1}{n^2} \sum_{reg_w (I_{z,x,y})} (GV_i - \overline{GV})^2$$

[129]

Durch den limitierten Schärfebereich der Objektive wird in jedem Abschnitt der z-Achse jedoch nur ein Bereich scharf abgebildet. Dieser Scanprozess muss daher in der Vertikalen mehrfach durchgeführt werden, um den gesamten Tiefenschärfebereich der Probe abzubilden [132]. Aus den gesammelten Kontrastwerten errechnet sich eine Kontrastkurve. Die maximalen Kontrastwerte ergeben in der spezifischen x-y-z Koordinate einen 3-D Messpunkt. Alle 3-D-Messpunkte werden zu einer 3-D-Topografie zusammengefasst, die der gemessenen Oberfläche entspricht. Das Bild wird in Echtfarben angezeigt [129] (siehe Abb.14).

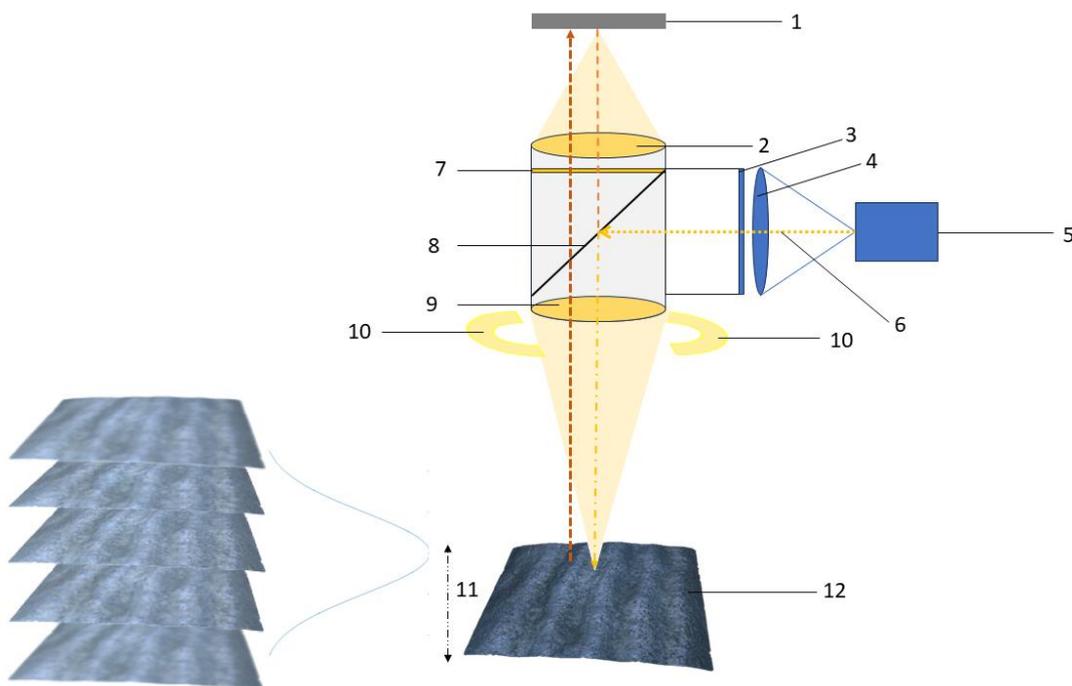


Abbildung 14: Prinzip der Fokusvariation (1) CCD-Sensor, (2) Linse, (3) Polarisator, (4) Linse, (5) Weißlichtquelle, (6) Lichtstrahlen der Weißlichtquelle (7) optionaler Analysator (8) semi-transparenter Spiegel, (9) Objektiv (Linsen mit begrenzter Tiefenschärfe), (10) Ringlicht, (11) vertikale Bewegung der Einheit, (12) Schmelzoberfläche, (13) Kontrastkurve, eigene Grafik nach Vorbild [134].

Eine Auflösung von 0,4 µm horizontal bis zu 0,01 µm vertikal ist bei der Verwendung des größten Objektivs möglich [135].

Die Beleuchtung der Probe kann durch koaxiales Licht, Ringlicht und die Verwendung eines Polarisators modifiziert und individuell je nach Oberflächeneigenschaft der Probe eingestellt werden [136]. Damit unterscheidet sich die Fokusvariation von anderen auf Licht basierenden Messmethoden, die nur über eine Belichtungstechnik verfügen [131].

Materialien und Methoden

Die vertikale Auflösung bestimmt die Anzahl der in der z-Achse aufgenommenen Bilder, indem es den Abstand zwischen diesen festlegt. Daher kann man die vertikale Auflösung, der per Definition in der Messmethode der Focus Variation festgelegte Größe nicht gleichsetzen mit dem Auflösungsvermögen in vertikaler Richtung. Auch wenn beide Aspekte miteinander in Verbindung stehen, sind sie keinesfalls identisch, da zwar ein Bezug zwischen dem vertikalen Abstand der Bilder und der späteren Auflösung besteht, jedoch der Algorithmus zunächst die Kontrastkurve und darauf basierend den 3-D-Datensatz generiert [137].

Eine Erhöhung der vertikalen Auflösung führt zu einer erhöhten Wahrscheinlichkeit, dass ein maximaler Kontrastpunkt detektiert wird. Dadurch wird die Aufnahmezeit verlängert. Sie sollte immer im Zusammenhang mit der Wiederholbarkeit stehen, aber auch im Verhältnis zur Anzahl nicht messbarer Punkte. Die Wiederholbarkeit stellt die Standardabweichung der Messung dar. Die Höhenstufe kann aufgelöst werden, wenn die vertikale Auflösung $\sqrt{8} \cdot \sigma$ ist. Dabei steht σ für die Wiederholbarkeit [134].

Die laterale Auflösung legt fest, wie viele benachbarte Pixel in die Berechnung von lokalen Kontrastmaxima eingehen. Sie ist durch die Wellenlänge des sichtbaren Lichtes (400 nm) limitiert [138]. Daher führt sie zu einer besseren Auflösung kleiner Details und ist auch – im Gegensatz zur vertikalen Auflösung – optisch sichtbar. Eine geringere laterale Auflösung führt zu einem Weichzeichnen des Datensatzes, da die umgebenden Pixel sich zur Kontrastmessung überlagern. Bei steilen Oberflächen sollte eine kleine laterale Auflösung verwendet werden, um den höheren Abbildungsmaßstab auszugleichen [136].

$$LR = LR_0 \cos \alpha$$

LR = laterale Auflösung, LR_0 = laterale Auflösung der Fläche in der Horizontalebene, α = Winkel der schrägen Fläche [136]

Studien zeigen, dass bei der Focusvariation die Neigung der Oberfläche Einfluss auf die Messungen hat. Bei Vorliegen einer Mikro-Rauheit ($R_a < 50\mu\text{m}$) ist dies besonders ausgeprägt, da das Ausmaß der Streustrahlung im Vergleich zum linear reflektierten Licht hoch ist. Die Abhängigkeit von der Neigung der Oberfläche steht im Zusammenhang zu den verwendeten Lichtquellen. Daher ist es notwendig, dass die Beleuchtung der Probe höher ist als die des Messobjektivs [139].

Die Wahl des Objektivs hat entscheidenden Einfluss auf die Messgrößen und wird je nach zu erwartendem Rauheitswert ausgewählt [137]. Jedoch limitiert die Größe des Objektes die Wahl des Objektivs. Große Proben können nicht mit dem größeren Objektiv vermessen werden [140].

Wie jede Messtechnik hat auch die Focusvariation ihre Einschränkungen. So ist die Vermessung von transparenten Oberflächen erschwert [129]. Das liegt daran, dass keine ausreichende Fokusvariation vorliegt [132]. Ebenfalls können bis zu 80° geneigte

Flächen erfasst werden, bei Überschreiten dieses Grenzwertes sollte das Objekt gekippt werden [136, 140]. Bei größerem Neigungswinkel der Oberfläche ist ein Objektiv mit größerer numerischer Apertur (Halbwinkel des Objektivs) vorteilhafter [136].

Sehr glatte oder sehr irreguläre Oberflächen sind ebenfalls schwerer zu vermessen [129]. Dies resultiert in Messfehlern, die sich in fehlenden Messpunkten im Datensatz oder falschen Messpunkten durch Spitzen in der z-Achse zeigen [136]. Da die visuelle dreidimensionale Betrachtung des Datensatzes möglich ist, sollte in diesem Bereich nicht gemessen oder die Messung wiederholt werden.

4.4.1 Messung der Rauheit der Schmelzoberflächen mit dem Alicona InfiniteFocus

Für die Aufnahmen mit dem Alicona wurden die Prüfkörper in einem eigens konstruierten Probenhalter mittels vier Fixierschrauben auf dem Lineartisch des Mikroskops befestigt (siehe Abb. 15). Obwohl der Lineartisch manuell approximativ in eine 0 Position zurückgefahren werden kann und die Koordinaten auf 0 gesetzt werden können, wurde der Lineartisch zur Erhöhung der Genauigkeit durch ein Lineal kalibriert, das auf dem Probenhalter befestigt wurde. (siehe Abb. 15 a+b) So konnten die Koordinaten für jede Messung reproduzierbar angefahren werden, um Wiederholungsmessungen derselben Fläche zu ermöglichen.

Es wurden pro Approximalkontakt drei Aufnahmen angefertigt. Die Weiterverarbeitung der Aufnahmen wurde mit der Software Alicona Imaging GmbH, Graz, Austria realisiert.

Zur Untersuchung der Schmelzproben wurden folgende Einstellungen benutzt: Es wurde das Objektiv IMF 20x benutzt. Es wurde eine vertikale Auflösung von 76 nm gewählt und eine laterale Auflösung von 2,93 μm (Formel siehe 4.4).

$$27 \text{ nm} \cdot \sqrt{8} = 76,367 \text{ nm}$$

Für die polierten Schmelzproben wurde in dieser Studie zusätzlich das Ringlicht und der Polarisator verwendet, zur Minimierung der Reflexion an der Schmelzoberfläche und damit durch die Blockierung des spiegelnden Lichtes [139].

Materialien und Methoden

Rauheitsmessung der Schmelzoberfläche mit dem Alicona Infinite Focus G4

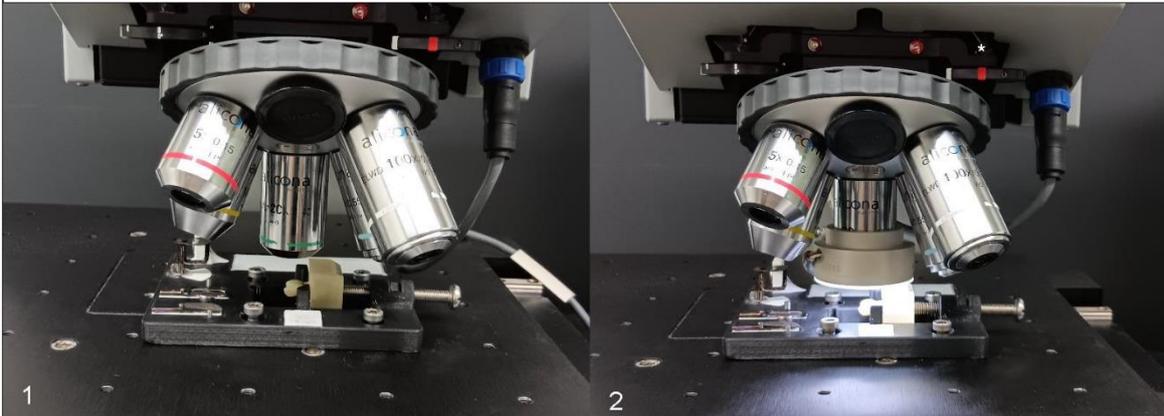


Abb. 15: 1) Befestigung des Probenhalters auf dem Lineartisch, Einstellung des 20x Objektivs ohne Ringlicht, 2) gleiche Darstellung mit Ringlicht; * Polarisator auf diesen Bildern beispielhaft eingeschaltet.



Abb. 15 a-i): Probenhalter für das Alicona: a) Kalibrierungslinial (Calibration slide), b) Detailansicht des Kalibrierungslineals, c) Einspannvorrichtung für die Prüfkörper, d) Befestigung für eine Ultraschallansatzspitze (nur in den Vorversuchen verwendet), e) Befestigung für Komet-Scheiben mit Steckvorrichtung, f) magnetische Befestigung für die CA-Streifen, g) magnetische Befestigung für die Befestigung von Profin-Streifen, h) Schrauben zur Befestigung des Probenhalters auf dem Lineartisch, i) kleines Kalibrierungslinial (Calibration slide)

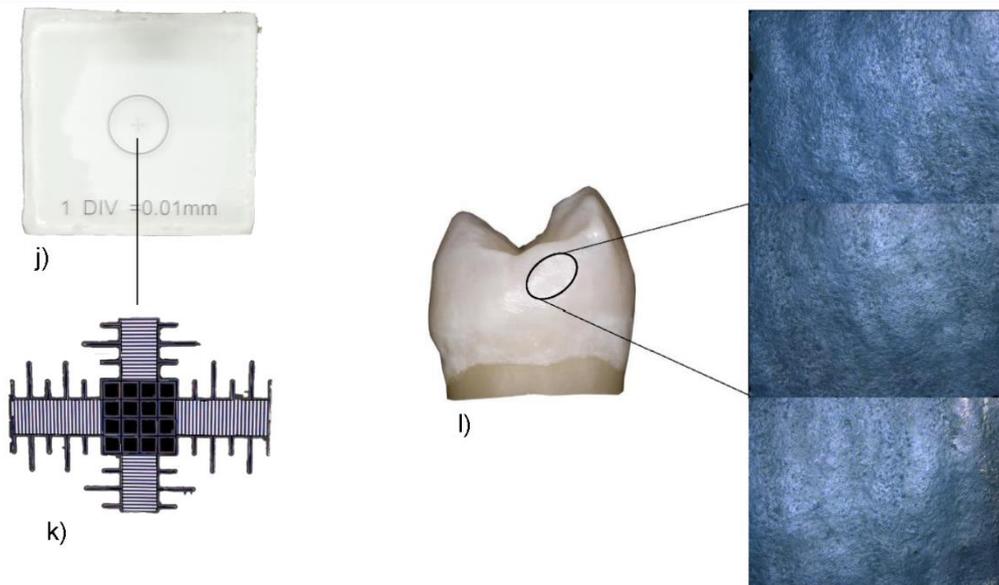


Abb. 15 j-l): j) Kalibrierungslinial, k) Aufnahme mit dem Alicona von dem Kalibrierungslinial, Kalibrierung des Lineartisches, l) Aufnahme von drei Bildern mit dem Alicona je Approximalkontakt

Abbildung 15: Übersicht über die quantitative Rauheitsmessung des Schmelzes mit den Alicona InfiniteFocus, eigene Fotos (1) + (2) und a-j), l) eigene Aufnahme mit dem Keyence, k+l), eigene Aufnahmen mit dem Alicona.

4.4.2 Auswertung des Alicona-Datensatzes und Rauheitsmessung nach ISO 25178

Anmerkung: Die Beschreibung der Rauheitsparameter erfolgt sowohl für die Rauheitsmessungen der Schmelzproben als auch für die Verschleißproben.

Der dreidimensionale Datensatz wurde im .al3D Format gespeichert und im Anschluss an die Aufnahme in der Alicona InfiniteFocus 2.0, IFM 2.1 Software angezeigt. Die Rauheitsmessung erfolgte über das Modul „Flächenrauheitsmessung“ nach ISO 25178.

Im ersten Schritt wird der Datensatz eingeebnet durch den in ISO 25178-2 beschriebenen F (Form-removal) Operator. Dies ist ein numerischer Algorithmus, der eine Referenzebene konstruiert und die Krümmung der Oberfläche ausgleicht [141-144]. Für die Rauheitsmessung wurde eine definierte Fläche von 500x500 μm ausgewählt (siehe Abb. 16). Zunächst wurde durch einen Filter die Rauheit von der Welligkeit aus dem Profil getrennt [145]. Die Grenzwellenlänge (L_c) betrug 100 μm .

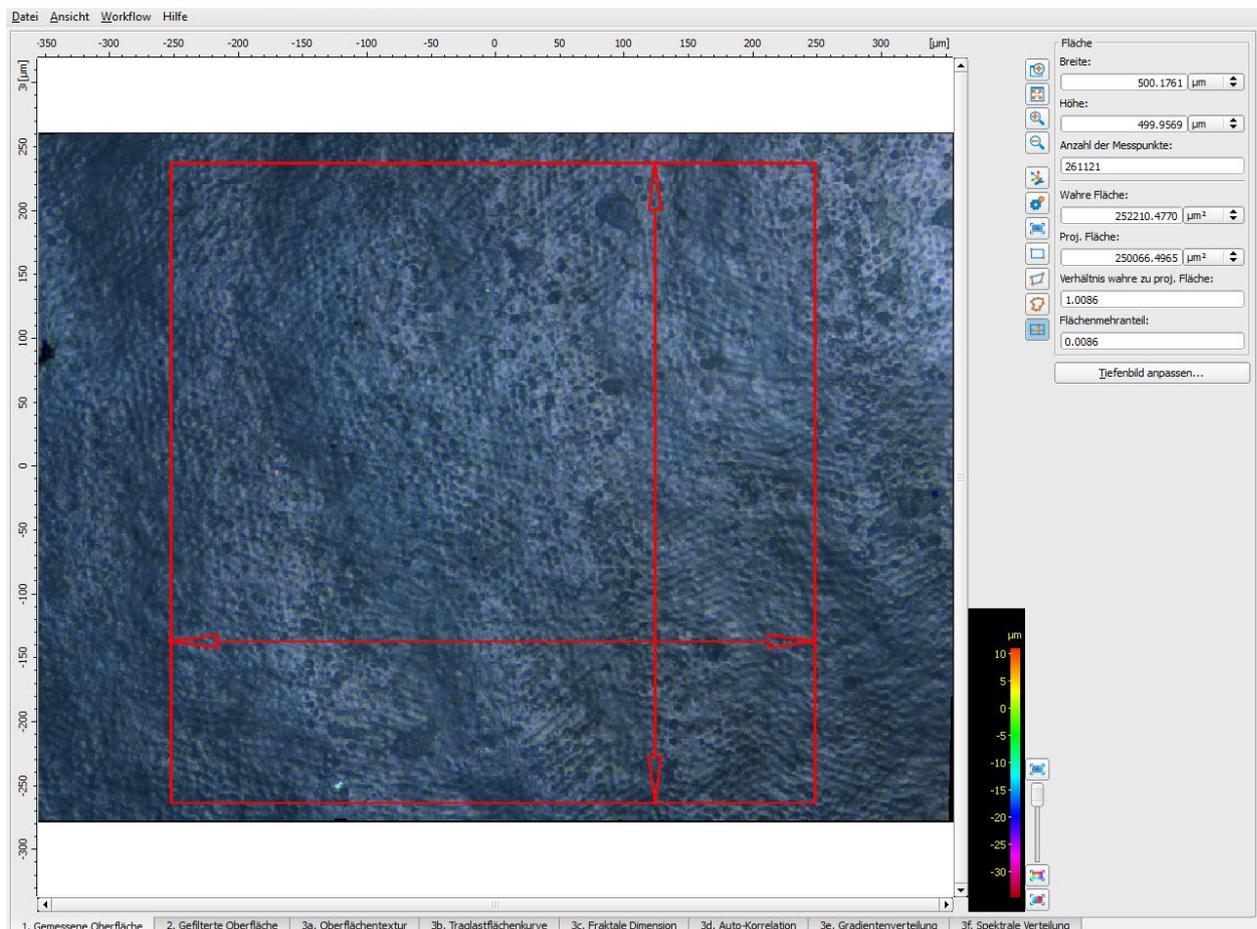


Abbildung 16: Screenshot der Flächentexturmessung einer 500x500 μm großen Fläche mit der Alicona InfiniteFocus Software, eigene Aufnahme

Materialien und Methoden

Die nach ISO 25178 angegebenen Parameter sind in sechs Kategorien unterteilt [144, 146]. Dabei unterscheidet man Amplitudenparameter, räumliche Parameter, hybride Kenngrößen, funktionsorientierten Kenngrößen und strukturorientierte Kenngrößen [141].

Sa gehört wie **Sq** zu den Amplitudenparametern nach ISO 25178 und stellt eine Erweiterung des Linienrauheitsparameters **Ra** dar. Er ist der arithmetische Mittelwert der absoluten Höhenabweichungen, gemessen von der Referenzebene, der sogenannten „arithmetische Mittenrauwert“ [147, 148].

$$S_a = \frac{1}{A} \iint_A |z(x, y)| dx dy$$

[144]

Sq gibt die Standardabweichung der Abstände von der Referenzebene an.

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{A} \iint_A z^2(x, y) dx dy}$$

[144]

Die hybriden Kenngrößen zeichnen sich durch die Fusion von topologischen Informationen mit rein vertikalen aus [142]. Beim hybriden Parameter **Sdr** handelt es sich um einen Prozentwert, der die aufgrund der Textur der Oberfläche zusätzlichen Fläche beschreibt. Damit wird die Zunahme der Messoberfläche im Vergleich zu einer planen Idealfäche (wahre Fläche) beschrieben [141]. In Bezug auf die Schmelzoberfläche führt z. B. die Vergrößerung der Oberfläche zu einer potenziell größeren Adhäsion von Bakterien.

$$S_{dr} = \frac{1}{A} \left(\iint_A \left(\sqrt{\left(1 + \left(\frac{\partial z(x, y)}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial z(x, y)}{\partial y} \right)^2} \right) - 1 \right) dx dy \right)$$

[144]

Der hybride Parameter **Sdq** ist der quadratische Mittelwert aller Schrägen und beschreibt somit die mittlere quadratische Oberflächensteigung [142].

$$Sdq = \sqrt{\frac{1}{A} \iint_A \left[\left(\frac{\partial z(x,y)}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial z(x,y)}{\partial y} \right)^2 dx dy \right]}$$

[144]

Die funktionsorientierten Parameter dienen der Charakterisierung des Funktionsverhaltens einer Oberfläche und basieren auf der Abbott-Kurve (Flächenmaterialanteilkurve) [141]. Dabei werden Elemente der Topografie wie Täler oder Spitzen zur Charakterisierung der Oberfläche herangezogen [142].

Svk bezeichnet die sogenannte „reduzierte Talhöhe“ und gehört zu diesen Parametern und gibt die durchschnittliche Tiefe der Täler unterhalb des Kernbereichs an und quantifiziert damit die Tiefe des Bereichs, in dem sich eine Flüssigkeit sammelt [142].

Spk im Gegensatz dazu beschreibt die sogenannte reduzierte Spitzenhöhe und damit die durchschnittliche Höhe der Spitzen oberhalb des Kernbereichs [142].

4.5 Qualitative Beurteilung der Rauheit des Zahnschmelzes

Ergänzend zur quantitativen Flächenrauheitsmessung wurden die Oberflächen qualitativ mithilfe eines Rasterelektronenmikroskops (Phenom XL, siehe Abb. 17, S. 47) beurteilt. Die Proben wurden kurz vor der Aufnahme getrocknet und mit einem in Alkohol getränktem Wattepellet gereinigt. Für die Aufnahmen wurden die Prüfkörper weder geschnitten noch besputtert (bedampft).

4.5.1 Die Rasterelektronenmikroskopie

Für eine qualitative Beurteilung von Oberflächenstrukturen sind verschiedene Messtechniken verfügbar. Ein Lichtmikroskop ist in seiner Vergrößerung durch die Wellenlänge des sichtbaren Lichts limitiert. Um eine höhere Auflösung zu erzielen, muss die Wellenlänge der Strahlenquelle verringert werden [149].

Möglich ist das mit dem Prinzip der Rasterelektronenmikroskopie, welche zusätzlich Aufnahmen mit großer Tiefenschärfe ermöglicht [149-151].



Abbildung 17 a und b: a) Desktop-Rasterelektronenmikroskop Phenom XL (Firma Thermofisher). Das Gerät steht auf einem Schwingungsdämpfungstisch (1), b) Ansicht des Arbeitsplatzes, eigene Aufnahmen mit Kamera.

Erfunden wurde das Rasterelektronenmikroskop von Manfred von Ardenne [152]. Früher waren Rasterelektronenmikroskope große Messgeräte, die viel Platz in meistens gesonderten Räumlichkeiten erforderten. Immer mehr wurde daran geforscht, kleinere Geräte zu entwickeln. 2006 waren die ersten Geräte auf dem Markt verfügbar. Heutzutage sind viele „Desktop-SEM“ auf dem Markt erhältlich. Sie zeichnen sich durch ihre benutzerfreundliche Bedienoberfläche, die deutlich reduzierte Größe und kurze Aufnahmezeiten bei hoher Aufnahmequalität aus. Außerdem sind heutzutage mehrere Module für Rauheitsmessungen und EDX- Analysen sowie Aufnahmen über einen großen Bildabschnitt möglich [152, 153].

Das Prinzip der Rasterelektronenmikroskopie basiert auf dem zeilenweisen Abtasten der Probenoberfläche mit einem gerichteten Elektronenstrahl [154]. Das Rasterelektronenmikroskop besteht aus einer Probenkammer mit einem Probentisch, der in der z-Achse verstellbar ist und in der ein Vakuum erzeugt wird. Außerdem verfügt

Materialien und Methoden

das Mikroskop über eine Vakuumeinheit, bestehend aus einer Vorvakuumpumpe und einer Turbopumpe. Das Vakuum ist notwendig, um Interferenzen zwischen dem Elektronenstrahl und den Molekülen in der Luft auszuschließen [150, 154]. Durch diese Interferenzen kann der Elektronenstrahl abgelenkt werden und es entstehen Artefakte. Die Proben mussten des Weiteren früher vakuumstabil, trocken und elektrisch leitfähig sein. Das Besputtern war ursprünglich bei allen Aufnahmen notwendig [154]. Verwendet wurden elektrisch leitendes Material, um elektrische Aufladungen zu vermeiden. [155] Wenn die Probe nicht elektrisch leitend ist, wird die Oberfläche durch den Elektronenstrahl negativ aufgeladen und es resultieren Artefakte [154]. In der Regel wird Gold-Palladium in einer Kammer unter Vakuum aufgetragen. Dabei sollte die Schichtdicke so dick sein, dass die Oberfläche leitend ist, aber nicht zu dick, um feine Details noch sichtbar zu machen [94]. Die Erfindung des Niederdruck-Rasterelektronenmikroskops (Environmental Scanning Electron Microscope ESEM) ermöglicht erstmals das Aufnehmen von unbehandelten Proben und biologischen Exponaten, die nicht vakuumstabil sind [154].

Die wichtigste Komponente des Rasterelektronenmikroskops ist die Elektronensäule, in der der Elektronenstrahl durch Kathoden (früher meistens Wolfram, bei dem in dieser Studie verwendeten REM Cerhexaborid) zunächst erzeugt wird und dann durch das Anlegen einer Spannung die Elektronen beschleunigt und daraufhin mithilfe einer elektrostatischen Optik auf die Probe gelenkt werden. Dieser sogenannte Primärstrahl wird durch eine thermoionische Quelle erzeugt und trifft auf die Probe. Durch die Wechselwirkung des Elektronenstrahls entsteht auf der Probenoberfläche ein sogenanntes Wechselwirkungsvolumen. In diesem befinden sich sowohl für die Materialcharakterisierung (Energiedispersive Röntgenspektroskopie, EDX) und zur Bilderzeugung benötigten Signale. Die Wechselwirkungen mit der zu untersuchenden Probe werden lokal bei dem bereits beschriebenen punkt- und zeilenförmigen Abtasten der Oberfläche ausgelöst. Dabei entsteht die Sekundärstrahlung. Die Sekundärelektronen geben Auskunft über die Oberflächentopografie. Für die Bilderzeugung werden Sekundärelektronen und Rückstreuielektronen (BSE: Backscattered Electrons) verwendet [154]. Der Kontrast der Proben wird durch die Rückstreuielektronen dargestellt. Leichte Elemente (niedrige Ordnungszahl) streuen weniger Elektronen zurück als schwerere Elemente (hohe Ordnungszahl). Die schweren Elemente werden heller dargestellt als die leichten Elemente [149]. Wenn der Arbeitsabstand vergrößert wird, also der Abstand des Elektronenstrahls zur Probe, dann erhöht sich auch die Tiefenschärfe [94].

4.5.2 Messeinstellungen für die untersuchten Schmelzproben

Die Schmelzproben müssen getrocknet werden, bevor sie ins Rasterelektronenmikroskop gelegt werden können [94]. Die Einstellungen für die Schmelzproben waren 15 kV und ein Vakuum von 10 Pa. Der verwendete Detektor war der BSD-Topo-A-Detektor.

4.5.3 Qualitative Auswertung der Schmelzoberflächen mit dem ESI-System

Es wurden Aufnahmen der Schmelzoberflächen vor und nach der Bearbeitung mit dem Phenom XL (Firma: Thermofisher) angefertigt. Die Schmelzoberflächen nach Politur wurden qualitativ mithilfe eines modifizierten ESI (siehe Abb. 18) beurteilt.

Der verwendete ESI (Enamel Surface Index) wird schon von Zachrisson für die Beurteilung des Schmelzes nach dem Bracketdebonding verwendet [100]. Dieser wurde bereits mehrfach in verschiedenen Studien in modifizierter Form zur Beurteilung angewandt [53, 113]. Die Modifikation in dieser Studie bestand darin, dass die An- und Abwesenheit von Perikymatien nicht berücksichtigt wurde. Außerdem waren für den Score von 0 isolierte Riefen im Schmelz möglich.

Score 0 = perfekte Schmelzoberfläche. Isolierte Riefen möglich. Glatte Schmelzoberfläche dominierend.

Score 1 = zufriedenstellende Schmelzoberfläche. Feine regelmäßige Riefen.

Score 2 = akzeptable Schmelzoberfläche. Einige deutliche und einige tiefere Riefen.

Score 3 = imperfekte Schmelzoberfläche. Einige deutlich tiefe und grobe Riefen.

Score 4 = inakzeptable Schmelzoberfläche. Grobe tiefe Riefen und tief zerstörte Schmelzoberflächen.

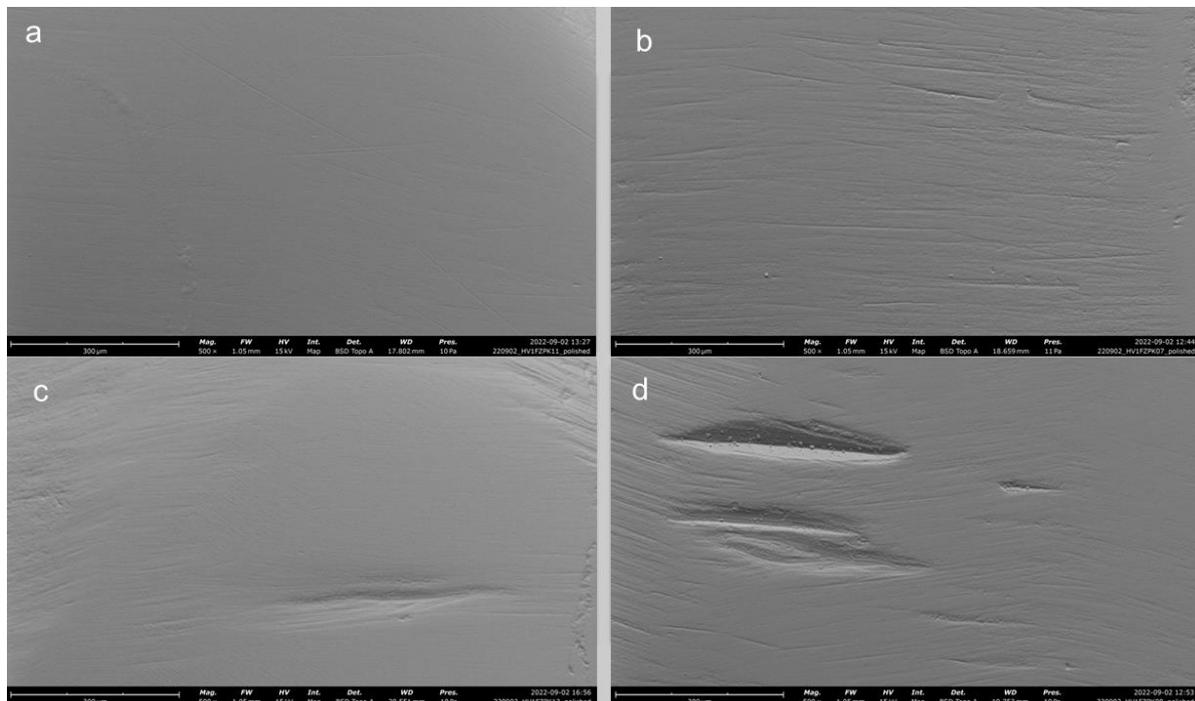


Abbildung 18 a-d: Beispiele für die verschiedenen ESI-Scores: a) Score 0, b) Score 1, c) Score 2 und d) Score 3. Score 4 wurde in keiner der untersuchten Proben gefunden, eigene Aufnahmen mit dem Phenom XL.

4.6 Messung des Parameters Verschleiß

4.6.1 Messung des Parameters Verschleiß der verwendeten ASR-Instrumente

Für die Charakterisierung der aktiven Schleifoberfläche stehen verschiedene Kontakt- und kontaktlose Messmethoden zur Verfügung. Ziel der vorliegenden Untersuchung war die Beurteilung der Effizienz der untersuchten ASR-Instrumente. Daher wurden zunächst eine Übersichtsaufnahme mithilfe der Mapping-Funktion (Zusammensetzung aus mehreren hundert einzelnen Aufnahmen) des Rasterelektronenmikroskops Phenom XL (siehe 4.5.1) gemacht.

Es wurde zur Beurteilung von Verschleißmechanismen von den verwendeten ASR-Instrumenten rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen zum Zeitpunkt T0, T1 (nach $n=5$ und 2,5 min) und T2 (nach $n=10$ und 5 min) angefertigt.

Für die Aufnahmen mit dem REM wurden die Prüfkörper nicht besputtert (bedampft). Die Aufnahmen erfolgt bei 15 kV unter 0,10 Pa Vakuum. Es wurde ein gemischter Detektor (BSD+SED: Mix 60%). Der Arbeitsabstand wurde manuell standardisiert eingestellt, variierte bei allen Aufnahmen aufgrund der unterschiedlichen Höhe des Profils jedoch leicht. Auf Basis der Übersichtsaufnahme wurden acht zufällig über die gesamte ASR-Scheibe/Streifen verteilte Topografien angefertigt. Dabei wurde die Zusatzfunktion des „Roughness Module“ verwendet, die einen 3-D-Datensatz generiert. Für diese Aufnahmen wurde der BSD-Full-Detektor gewählt.

Daraufhin wurden die Proben zur weiteren quantitativen Untersuchung mit dem Alicona InfiniteFocus vermessen. Vorher wurden die ASR-Geräte mit Aqua dest. gereinigt, um Fehlmessungen der Rauheitsparameter durch Ansammlungen von Debris zu vermeiden. Die Proben wurden anschließend mit Kohlenstoff besputtert. In Vorversuchen hatte sich gezeigt, dass ansonsten aufgrund der spiegelnden Reflexion Artefakte im Datensatz entstanden. Auf die Probleme der Fokusvariation bei Spiegelreflexion wurde schon unter 4.4 eingegangen. Der Arbeitsabstand beim Bedampfen mit Kohlenstoff betrug 50 mm, es wurde ein einfacher Kohlefaden benutzt. Die resultierende Schichtdicke betrug 12 nm. Die Fokusvariation stellt eine optische Messmethode zur Messung von Verschleiß dar [131].

Die Proben wurden auf einen eigens konstruierten Probenhalter (bereits in Abb. 15, S.43 beschrieben) befestigt. Der Lineartisch wurde mithilfe eines im Probenhalter fixierten Lineals kalibriert. Die schon im REM ausgewählten acht Topografien wurden eingestellt, die Koordinaten wurden registriert und notiert.

Bei metallischen Oberflächen sollte die direkte Reflexion ausgeblendet und nur die diffuse Reflexion zur Bildgebung verwendet werden. Daher musste ein Polarisationsfilter angewandt werden. Außerdem musste aufgrund des Neigungswinkels der Diamantpartikel eine Kombination aus Ringlicht und koaxialem Licht verwendet werden [131, 136]. Die Anwendung des Ringlichts zusätzlich zum koaxialen Licht war

Materialien und Methoden

nötig, da aufgrund der Diamantpartikel größere lokale Höhenunterschiede der Probe in der z-Achse bestanden. Die Diamantpartikel erzeugen eine Spiegelreflexion. Dies führt zu einer verringerten Fokusquantifizierung. Die Benutzung des Ringlichtes erhöht die Wahrscheinlichkeit, dass das reflektierte und gestreute Licht innerhalb der halben Apertur des Objektivs liegt und führt daher zu einem erhöhten Informationsgehalt der vermessenen Oberfläche [136]. Das Verfahren der Verschleißmessung ist in Abb. 19 auf Seite 52 dargestellt.

Zur Untersuchung der Verschleißproben wurden folgende Einstellungen benutzt: Es wurde das Objektiv IMF 10x benutzt. Es wurde eine vertikale Auflösung von 100 nm gewählt und eine laterale Auflösung von 3,91 μm (Formel siehe 4.4). Es wurde die gesamte Fläche vermessen.

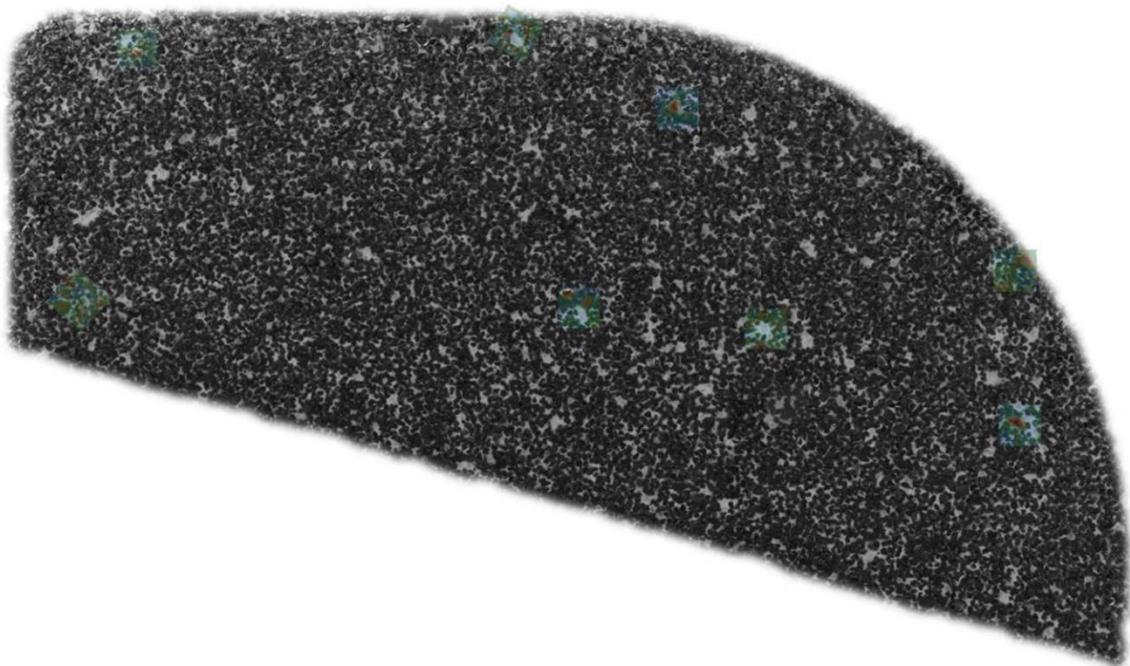
$$35,5 \text{ nm} \cdot \sqrt{8} = 100,4 \text{ nm}$$

Die quantitative Untersuchung erfolgte durch die Auswertung der Rauheitsparameter S_a , S_q , S_dq und S_{pk} . Die Amplitudenparameter S_a und S_q beschreiben den arithmetischen Mittenrauwert und die Standardabweichung. Der Wert S_dq beschreibt den quadratischen Mittelwert der Schrägen. Dies bedeutet, dass der Wert größer ist, wenn die Steigung einer Fläche größer ist und abnimmt, wenn die Oberfläche glatt ist. Bei einer planen Oberfläche liegt der Wert bei 0. Daher beschreibt dieser Parameter die Abrasivität des Instruments. Bei der reduzierte Spitzenhöhe (S_{pk}), also der mittleren Höhe der herausragenden Spitzen über dem Kernbereich, könnte eine graduelle Reduktion für ein Abrunden der Kanten sprechen.

Die qualitative Auswertung erfolgte anhand der rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen. Im Bereich der Topografie wurden die Abrasivpartikel gezählt und untersucht, um Hinweise auf Verlust der Partikel, Makrochipping und Mikrochipping zu bekommen (siehe Abb. 4, Seite 27).

Materialien und Methoden

Messung des Parameters Verschleiß



a)

Abb. 19 a): Übersichtsaufnahme Profin lila; farbig hinterlegt sind die 8 zufällig ausgewählten Topografien, die gleichmäßig über die Oberfläche des ASR-Instruments verteilt sind.

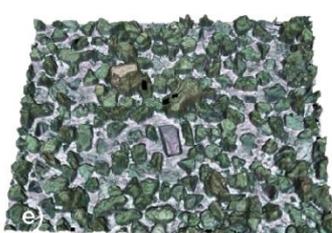
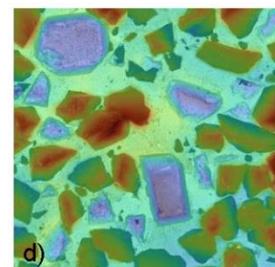
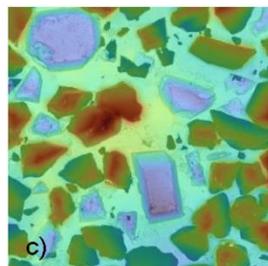
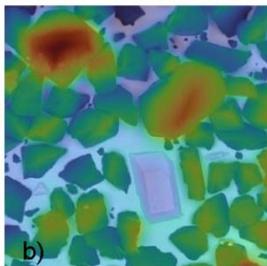


Abb.19 b-d): qualitative rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen von Topografie 4 (Profin lila) mit dem Phenom zu b) T0, c) T1 und d) T2; Darstellung mit Falschfarben

Abb. 19 e-g): quantitative Aufnahmen von Topografie 4 (Profin lila) mit dem Alicona zu e) T0, f) T1 und g) T2; Darstellung mit Falschfarben

Abbildung 19: Übersicht über die Verschleißmessung beispielhaft an dem ASR-Instrument Profin lila, eigene Aufnahmen mit dem Phenom XL und dem Alicona InfiniteFocus.

4.7 Datenverarbeitung und Statistik

Die in der vorliegenden Arbeit erhobenen Messdaten wurden manuell in das Tabellenkalkulationsprogramm Microsoft Office Excel (Vs. 2307) eingetragen. Die statistische Auswertung und Darstellung der Ergebnisse erfolgt mit dem Statistikprogramm SPSS (IBM; Version 28 sowie 29.0.0.0 (241)).

4.8 Auswertung der Messergebnisse

4.8.1 Auswertung des Parameters Abtrag

Für die Auswertung des Parameters Abtrag kam ein parametrisches Testverfahren zum Einsatz. Um die Versuchsgruppen untereinander zu vergleichen, wurde eine mehrfaktorielle Varianzanalyse (ANOVA) verwendet.

Die Messwerte der Abtragswerte wurden mithilfe des Levene-Tests auf Gleichheit der Fehlervarianzen untersucht. Für die Prüfgruppe Frontzähne war die Varianzanalyse ohne Einschränkung anwendbar. Das Signifikanzniveau lag demnach bei 0,05. Für die Prüfgruppe Prämolaren war die Varianzhomogenitätsannahme nicht erfüllt. Daher wurde auf dem strengeren Signifikanzniveau von 0,01 geprüft.

Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt mithilfe von Tabellen und Profilplots.

4.8.2 Auswertung des Parameter Rauheit

Es wurden Mittelwerte gebildet und die Standardabweichungen berechnet. Im Anschluss wurden die Daten mithilfe des Kolmogorov-Smirnov- und Shapiro-Wilk-Test auf Normalverteilung geprüft. Da die Ergebnisse der Rauheitsmessung nicht normalverteilt waren ($p > 0,05$), mussten für die statistische Auswertung nichtparametrische Verfahren verwendet werden. Es kamen drei Tests zur Anwendung: Mithilfe des Friedman-Tests und des Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test wurde innerhalb der ASR-Tools geprüft, ob es signifikante Unterschiede zwischen T0, T1 und T2 gab. Der Friedman-Test prüft zunächst global, ob signifikante Unterschiede vorliegen. Daraufhin wurde mithilfe des Kruskal-Wallis-Tests und des Mann-Whitney-U Tests geprüft, ob ein signifikanter Unterschied zwischen den Gruppen bestand.

Das Signifikanzniveau lag bei 0,05. Die Darstellung der Ergebnisse erfolgte mithilfe von Tabellen und Box-Whisker-Plots.

4.8.3 Methodenfehler für den Parameter Abtrag

Zur Ermittlung des Methodenfehlers für den Parameter Abtrag wurden acht zufällig ausgewählte Scans erneut mit Geomagic Control X überlagert. Die Scans wurden von einer Untersucherin (N.A.) mit dem gleichen Scanner (Trios 3, 3Shape) angefertigt. Zum einen wurden acht identische Scans mithilfe der Überlagerungsmethode überlagert, um die Überlagerungsgenauigkeit in Geomagic Control X zu ermitteln. Ferner wurden, um die Genauigkeit des Scanverfahrens zu ermitteln, ebenfalls acht Scans des gleichen Prüfkörpers überlagert.

Es wurde der Methodenfehler nach Dahlberg verwendet.

$$MF = \sqrt{\frac{\sum d^2}{2n}}$$

MF: Methodenfehler

d: Standardabweichung aus der Differenz der Ursprungsmessung

n = Anzahl der Messungen

Der Methodenfehler lag für die Überlagerung desselben Scans in Geomagic Control X bei 0,0005 mm und für die Überlagerung des gleichen Zahnes bei 0,00655 mm.

4.8.4 Methodenfehler für die Rauheitsparameter

Zur Bestimmung des Methodenfehlers für die Rauheitsmessung wurden von acht Schmelzoberflächen im gleichen Koordinatenpunkt zwei Aufnahmen mit dem Alicona InfiniteFocus gemacht. Die Aufnahmen wurden unter den gleichen Einstellungen mit der gleichen vertikalen und lateralen Auflösung angefertigt.

Es wurde ebenfalls der Methodenfehler nach Dahlberg verwendet.

$$MF = \sqrt{\frac{\sum d^2}{2n}}$$

MF: Methodenfehler

d: Standardabweichung aus der Differenz der Ursprungsmessung

n = Anzahl der Messungen

Der Methodenfehler lag für den Rauheitsparameter Sa bei 0,00775 µm für den Parameter Sq bei 0,00025 µm, für Sdr bei 0,09025 µm und für Svk bei 0,0702500036 µm.

Ergebnisse

5. Ergebnisse

5.1 Ergebnisse der Abtragsmessungen

Die Ergebnisse der Abtragsmessungen sind in Tabelle 2-3 zusammengefasst. Die grafische Darstellung erfolgte mithilfe von Profilplots (siehe Abb. 20-21).

Die Auswertung der ANOVA zeigte, dass das Gesamtmodell signifikant war ($F(5,18) = 23,86, p \leq 0,001$). Der Faktor „ASR-Tool“ hatte einen signifikanten Effekt auf den Parameter Abtrag in der Prämolarengruppe ($F(2,18) = 57,16, p \leq 0,001$). Der Austausch des ASR-Instruments hatte keinen Einfluss auf den Abtrag ($F(1,18) = 1,78, p = 0,20$). Es gab keine signifikante Wechselwirkung zwischen ASR-Tool und dem Wechsel des Schleifmittels ($F(2,18) = 1,61, p = 0,228$).

In den Post-hoc Tests zeigte sich, dass die Mittelwertdifferenz zwischen zwei Werkzeugen signifikant war (Komet 045 – CA grau $p \leq 0,001$; Komet 045 – Profin rot $p \leq 0,001$; Profin rot – CA grau $p = 0,006$).

CA grau erzielte in 30 Sekunden einen mittleren Abtrag von 0,093 mm, das Komet-System einen mittleren Abtrag von 0,253 mm und das Profin-System 0,15 mm (siehe Tabelle 2). Der Post-hoc Test zeigte eine Mittelwertdifferenz von 0,161 mm zwischen Komet und CA grau sowie von 0,103 mm zwischen Komet und Profin. Daher erzielte das Komet System einen klinisch relevant größeren Abtrag. Die Mittelwertdifferenz zwischen CA grau und Profin rot lag bei 0,057 mm.

Deskriptive Statistiken

ASR-Tool		Mittelwert in mm	Standard- abweichung in mm	N
CA grau	erstes ASR-Instrument	0,088	0,013	4
	zweites ASR-Instrument	0,097	0,006	4
	gesamt	0,093	0,010	8
Komet 045	erstes ASR-Instrument	0,276	0,014	4
	zweites ASR-Instrument	0,231	0,056	4
	gesamt	0,253	0,045	8
Profin rot	erstes ASR-Instrument	0,157	0,032	4
	Zweites ASR-Instrument	0,143	0,031	4
	gesamt	0,150	0,030	8

Tabelle 2: Deskriptive Statistik der Schmelzreduktion binnen 30 s bei 2 N für die Prüfgruppe Prämolaren: Mittelwerte, Standardabweichungen und Größe der Subgruppen.

Ergebnisse

Bei allen drei paarweisen Vergleichen der ASR-Instrumente zeigte sich ein signifikant von 0 verschiedenes Ergebnis. Der Messfehler lag deutlich unterhalb der kleinsten Konfidenzintervall-Untergrenze.

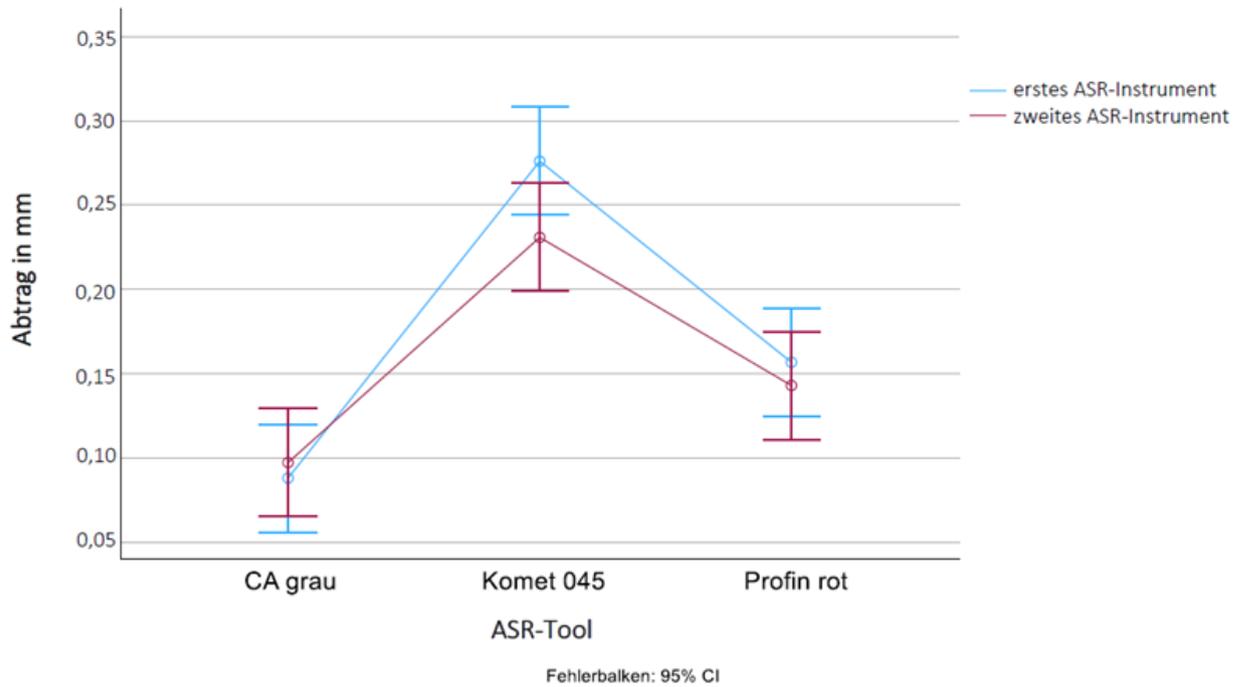


Abbildung 20: Profilplot: Mittelwert und 95 % Konfidenzintervall des Schmelzabtrags nach 30 s bei 2 N für die Prüfgruppe Prämolaren, Grafik von Helmut Orawa.

Ergebnisse

Deskriptive Statistiken

ASR-Tool		Mittelwert in mm	Standard- abweichung in mm	N
CA rot	erstes ASR-Instrument	0,119	0,045	4
	zweites ASR-Instrument	0,058	0,012	4
	gesamt	0,088	0,045	8
Komet 0,30	erstes ASR-Instrument	0,291	0,055	4
	zweites ASR-Instrument	0,325	0,025	4
	gesamt	0,308	0,044	8
Profin lila	erstes ASR-Instrument	0,136	0,045	4
	zweites ASR-Instrument	0,190	0,071	4
	gesamt	0,163	0,062	8

Tabelle 3: Deskriptive Statistik der Schmelzreduktion binnen 30 s bei 2 N für die Prüfgruppe Frontzähne: Mittelwerte, Standardabweichungen und Größe der Subgruppen.

Die Auswertung der ANOVA zeigte, dass das Gesamtmodell ebenfalls für die Prüfgruppe Frontzähne signifikant war ($F(5,18) = 19,92$, $p \leq 0,001$). Der Faktor „ASR-Tool“ hatte einen signifikanten Effekt auf den Parameter Abtrag ($F(2,18) = 46,19$, $p \leq 0,001$). Der Austausch des ASR-Instruments hatte keinen Einfluss auf den Abtrag ($F(1,18) = 0,217$, $p = 0,647$). Es gab eine fast signifikante Wechselwirkung zwischen ASR-Tool und Schleifmittel ($F(2,18) = 3,506$, $p = 0,052$).

Die Post-hoc Tests zeigten eine Mittelwertdifferenz von 0,219 mm zwischen Komet 030 und CA rot sowie von 0,144 mm zwischen Komet 030 und Profin lila. Die Mittelwertdifferenz zwischen CA rot und Profin lila lag bei 0,075 mm. Es zeigte sich, dass die Mittelwertdifferenz zwischen zwei Werkzeugen signifikant war (Komet 030 – CA rot; $p \leq 0,001$, Komet 030 – Profin lila; $p \leq 0,001$, Profin lila – CA rot; $p = 0,016$)

CA rot erzielte in 30 Sekunden einen mittleren Abtrag von 0,088 mm, das Komet-System erzielte einen mittleren Abtrag von 0,308 mm und das Profin-System 0,163 mm. Daher erzielt das Komet System einen klinisch relevant größeren Abtrag. Bei CA trug der zweite CA-Streifen nur halb so viel ab (0,058 mm) wie der erste (0,119 mm).

Bei allen drei paarweisen Vergleichen der ASR-Tools zeigte sich ein signifikant von 0 verschiedenes Ergebnis. Der Messfehler lag deutlich unterhalb der kleinsten Konfidenzintervall-Untergrenze.

Ergebnisse

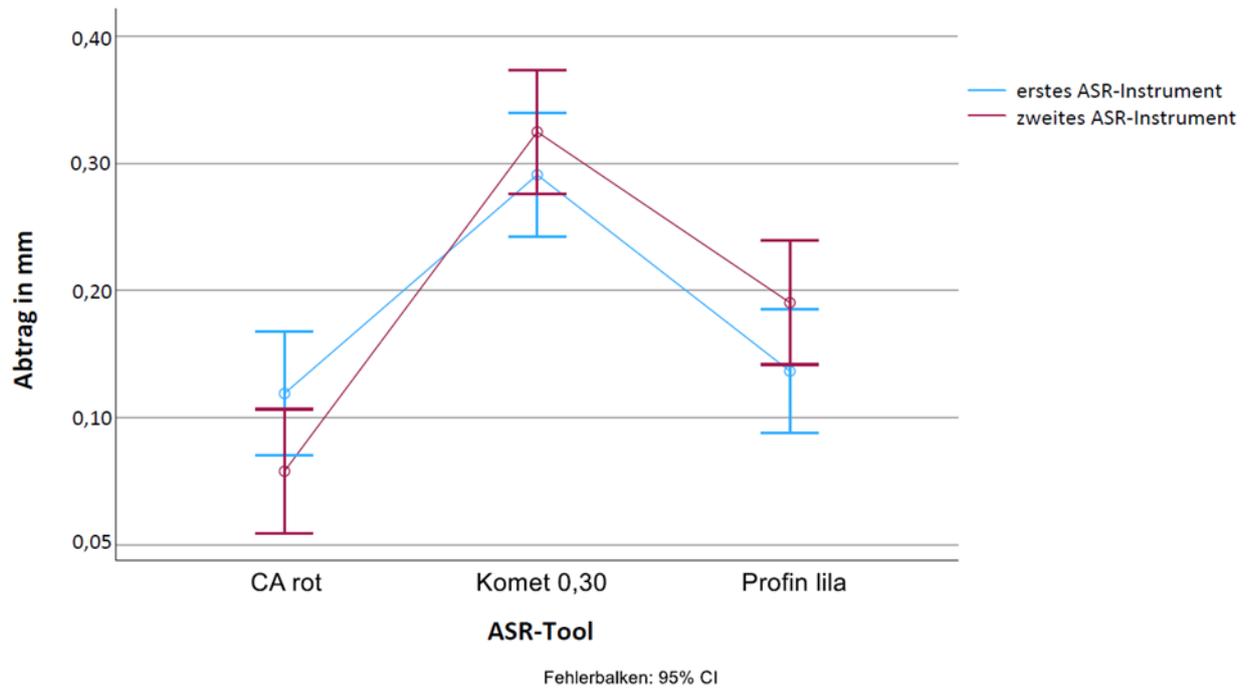


Abbildung 21: Profilplot: Mittelwert und 95 % Konfidenzintervall des Schmelzabtrags nach 30 s bei 2 N für die Prüfgruppe Frontzähne, Grafik von Helmut Orawa.

Ergebnisse

5.2 Ergebnisse der Rauheitsmessung des Schmelzes

Die 3-D-Topografien der Schmelzoberfläche sind in Abb. 22-29 zu sehen.

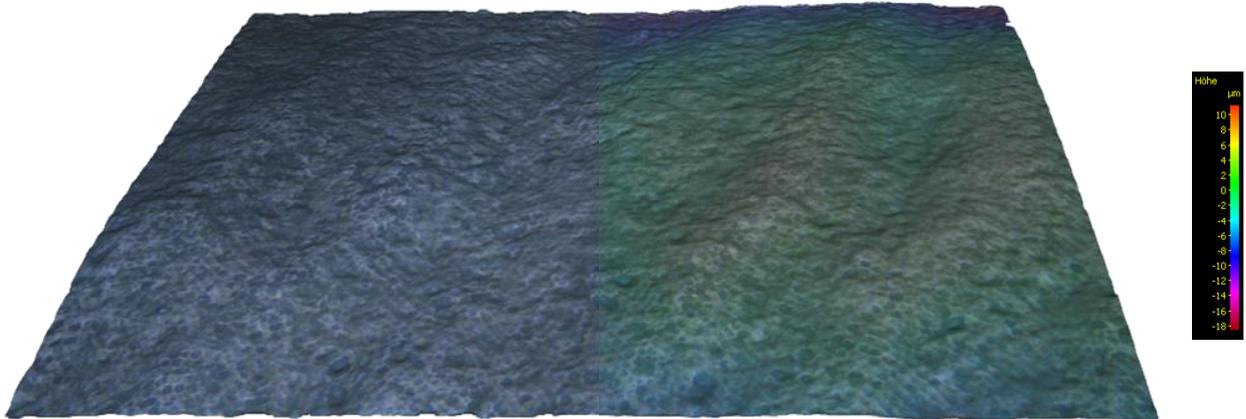


Abbildung 22: repräsentative mikroskopische Aufnahme einer unbehandelten Schmelzprobe mit dem Alicona (Fläche $710 \mu\text{m} \times 539 \mu\text{m}$, 20x Objektiv), halbseitige Darstellung in Echt- und Falschfarben, eigene Aufnahme mit dem Alicona InfiniteFocus.

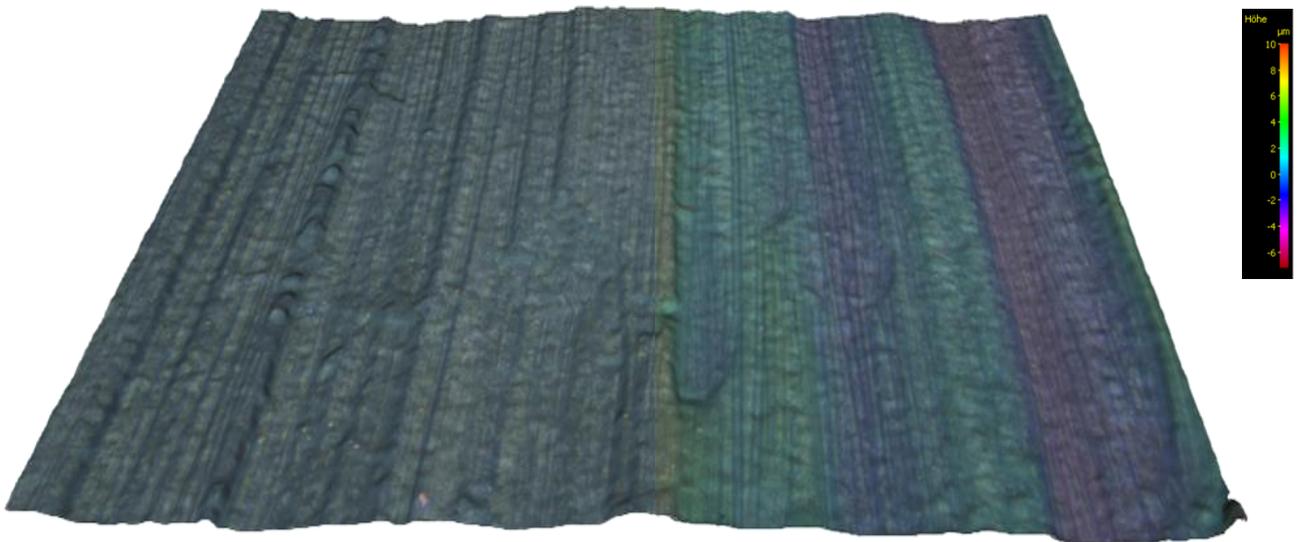


Abbildung 23: repräsentative Aufnahme einer Schmelzoberfläche nach der Bearbeitung mit dem Komet 045 mit dem Alicona (Fläche $710 \mu\text{m} \times 539 \mu\text{m}$, 20x Objektiv), halbseitige Darstellung in Echt- und Falschfarben, eigene Aufnahme mit dem Alicona InfiniteFocus.

Ergebnisse

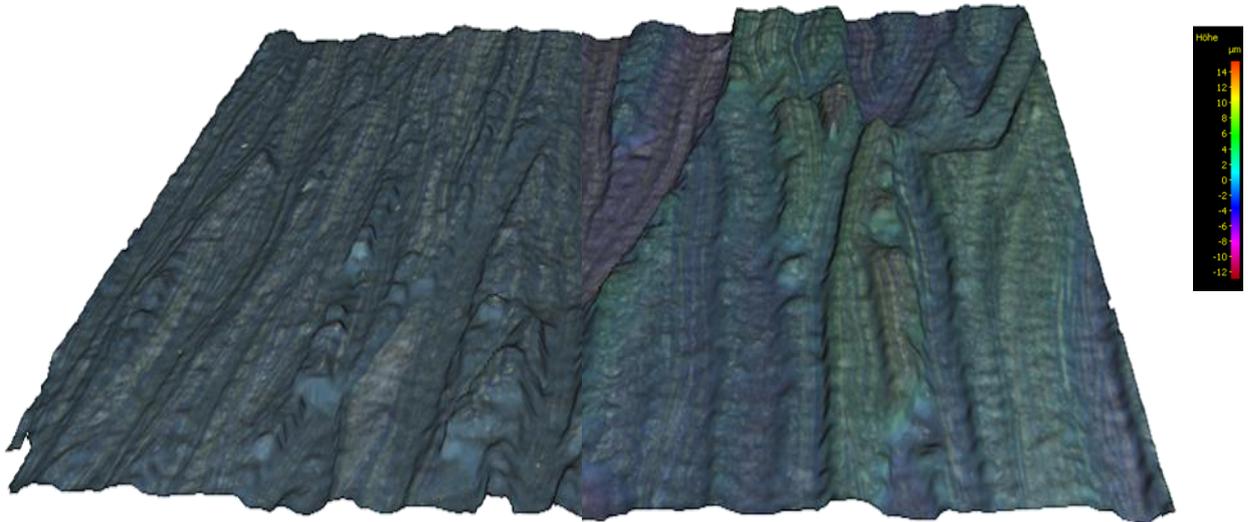


Abbildung 24: repräsentative Aufnahme einer Schmelzoberfläche nach der Bearbeitung mit Profin rot mit dem Alicona (Fläche 710 µm x 539 µm, 20x Objektiv), halbseitige Darstellung in Echt- und Falschfarben, eigene Aufnahme mit dem Alicona InfiniteFocus.

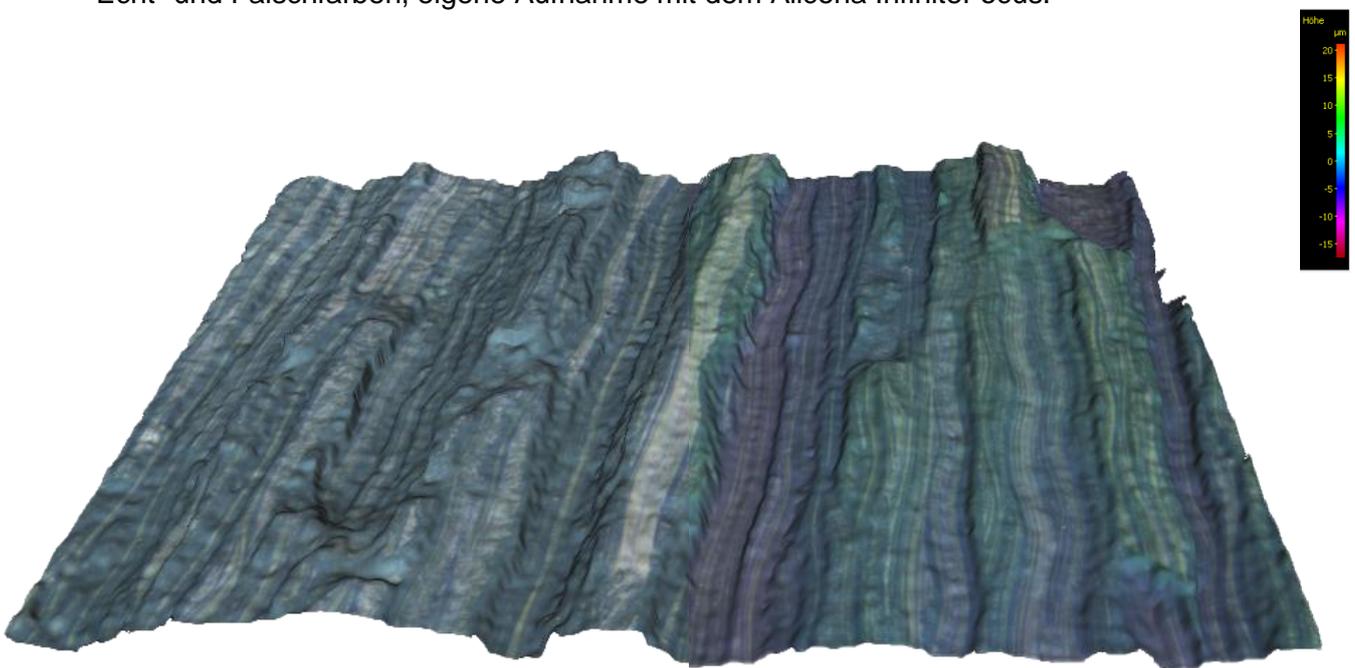


Abbildung 25: repräsentative Aufnahme einer Schmelzoberfläche nach der Bearbeitung mit CA grau mit dem Alicona (Fläche 710 µm x 539 µm, 20x Objektiv), halbseitige Darstellung in Echt- und Falschfarben, eigene Aufnahme mit dem Alicona InfiniteFocus.

Ergebnisse

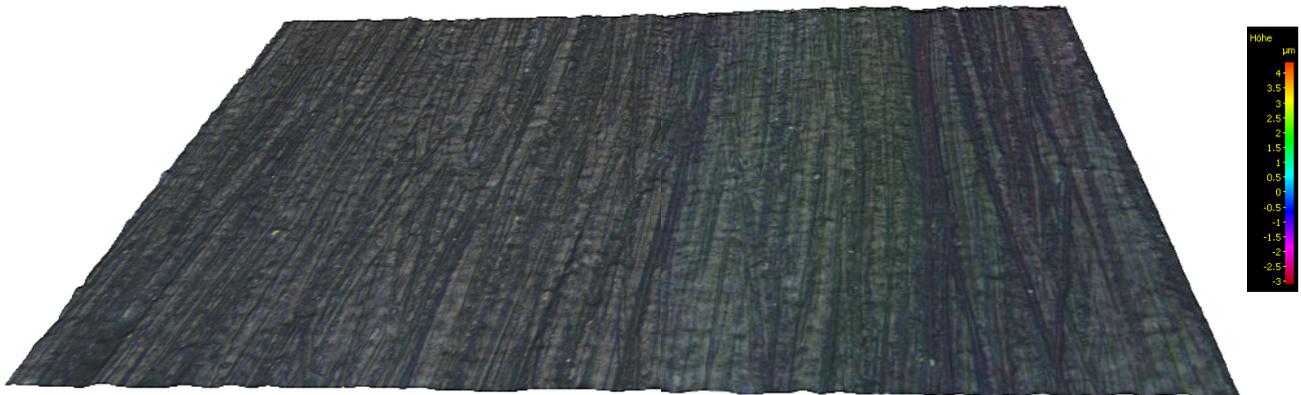


Abbildung 26: repräsentative Aufnahme einer Schmelzoberfläche nach der Bearbeitung mit Komet 030 mit dem Alicona (Fläche 710 µm x 539 µm, 20x Objektiv), halbseitige Darstellung in Echt- und Falschfarben, eigene Aufnahme mit dem Alicona InfiniteFocus.

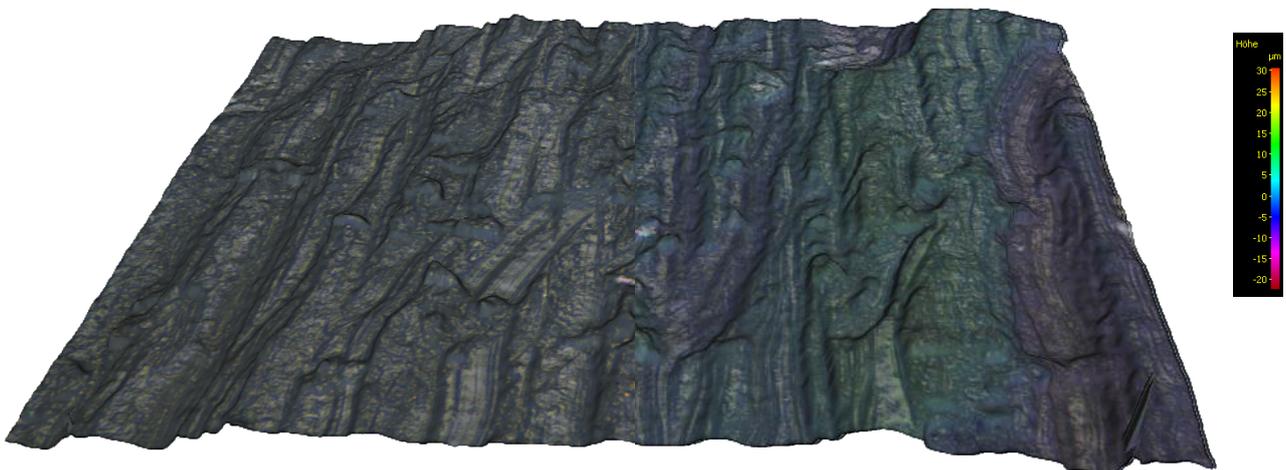


Abbildung 27: repräsentative Aufnahme einer Schmelzoberfläche nach der Bearbeitung mit Profin lila mit dem Alicona (Fläche 710 µm x 539 µm, 20x Objektiv), halbseitige Darstellung in Echt- und Falschfarben, eigene Aufnahme mit dem Alicona InfiniteFocus.

Ergebnisse

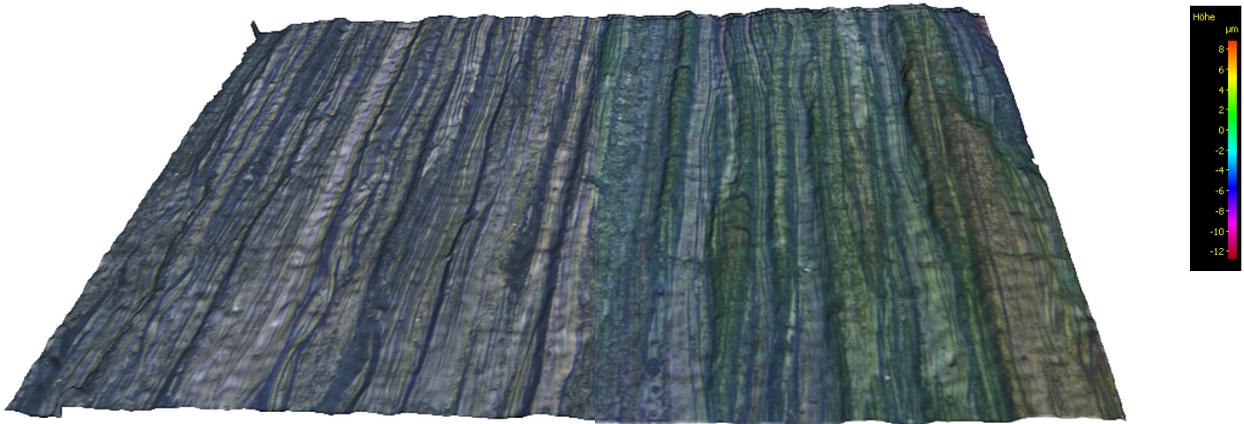


Abbildung 28: repräsentative Aufnahme einer Schmelzoberfläche nach der Bearbeitung mit CA rot mit dem Alicona (Fläche 710 μm x 539 μm , 20x Objektiv), halbseitige Darstellung in Echt- und Falschfarben, eigene Aufnahme mit dem Alicona InfiniteFocus.



Abbildung 29: repräsentative Aufnahme einer Schmelzoberfläche nach der Politur mit dem Alicona (Fläche 710 μm x 539 μm , 20x Objektiv), halbseitige Darstellung in Echt- und Falschfarben, eigene Aufnahme mit dem Alicona InfiniteFocus.

Ergebnisse

5.2.1 Ergebnisse der Rauheitsmessung Prüfgruppe Prämolaren

Die Ergebnisse zu den Rauheitsmessungen sind in Tabelle 4-11 zusammengefasst.

Prämolaren - Rauheitswert Sa

		Deskriptive Statistik							
		N	Mean	Std. Deviation	Minimum	Maximum	Percentiles		
25th	50th (Median)						75th		
ASR Tool									
CA grau	Rauheitswert Sa T0 [µm]	8	0,36333	0,110578	0,227	0,610	0,30285	0,35523	0,36955
	Rauheitswert Sa T1 [µm]	8	1,80974	0,201743	1,513	2,131	1,63279	1,84690	1,93508
	Rauheitswert Sa T2 [µm]	8	0,25417	0,049987	0,212	0,345	0,21682	0,23563	0,30020
Profin rot	Rauheitswert Sa T0 [µm]	8	0,39007	0,096941	0,258	0,577	0,31072	0,39827	0,43258
	Rauheitswert Sa T1 [µm]	8	1,74184	0,229306	1,561	2,251	1,57375	1,68307	1,83221
	Rauheitswert Sa T2 [µm]	8	0,33599	0,107507	0,180	0,554	0,27088	0,32978	0,37292
Komet 045	Rauheitswert Sa T0 [µm]	8	0,34629	0,101733	0,215	0,568	0,29459	0,32872	0,36764
	Rauheitswert Sa T1 [µm]	8	0,82704	0,191846	0,612	1,182	0,66022	0,76959	0,96887
	Rauheitswert Sa T2 [µm]	8	0,28630	0,095286	0,217	0,500	0,21943	0,25845	0,32304

Tabelle 4: Deskriptive Statistik – Rauheitsparameter Sa für die Messungen an Prämolaren

Die deskriptive Statistik des Rauheitsparameters Sa für die verschiedenen ASR-Instrumente ist in Tabelle 4 zusammengefasst. Grafisch ist die Veränderung des Rauheitsparameters Sa zu den verschiedenen Zeitpunkten T0, T1 und T2 als Box-Whisker-Plot dargestellt (siehe Abb. 30).

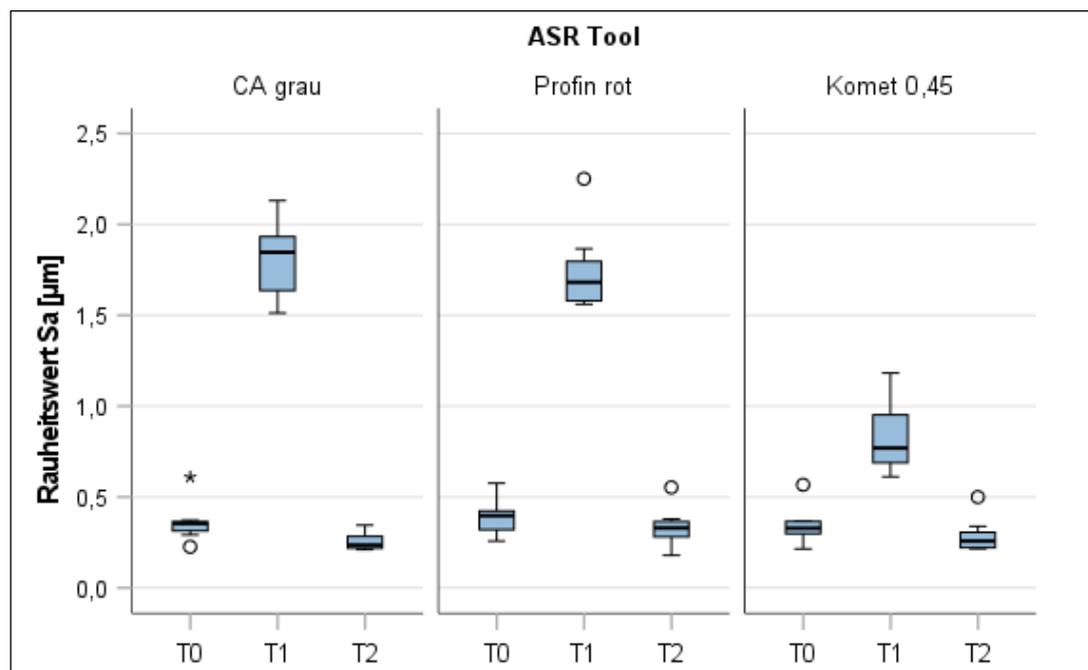


Abbildung 30: Boxplot-Darstellung des Rauheitsparameters Sa in Abhängigkeit vom verwendeten ASR-Instrument zu den Zeitpunkten T0, T1 und T2, Grafik von Ulrike von Hehn.

Der Friedman-Test zeigte global bei allen drei ASR-Gruppen signifikante Unterschiede des Rauheitsparameter Sa ($p < 0,05$). Auch der Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test zeigte für alle Vergleiche zwischen zwei Zeitpunkten signifikante Unterschiede ($p < 0,05$), außer zwischen T0 und T2 für Profin rot ($p = 0,58$) und Komet 045 ($p = 0,16$).

Ergebnisse

Der Kruskal-Wallis-Test zeigte signifikante Unterschiede zwischen den Systemen bei T1 ($p < 0,05$), nicht jedoch bei T0 ($p = 0,38$) und T2 ($p = 0,13$). Der mittlere Rauheitswert Sa unterschied sich bei T0 und T2 nicht ($p > 0,05$).

Der Mann-Whitney-U-Test zeigte im Post-hoc Vergleich, dass kein signifikanter Unterschied ($p > 0,05$) zwischen CA grau und Profin rot bei T1 bestand. Jedoch bestand ein signifikanter Unterschied ($p < 0,001$) des Sa-Wertes zwischen Komet 045 und jeweils Profin rot und CA grau. Gleiches gilt für die Differenzen zwischen (T0-T1) und (T2-T1).

Die Differenz des Rauheitsparameters Sa zwischen den verschiedenen Zeitpunkten T0, T1 und T2 ist in Tabelle 5 dargestellt. Der Rauheitsparameter Sa erhöhte sich von T0-T1 bei CA grau um $1,446 \mu\text{m}$, bei Profin rot um $1,352 \mu\text{m}$ und bei Komet 045 um $0,481 \mu\text{m}$. Daher führte die Anwendung des Komet-Systems zu einer signifikant ($p < 0,001$) geringeren Erhöhung des Rauheitsparameters Sa als die anderen Instrumente.

Deskriptive Statistik									
ASR Tool	N	Mean	Std. Deviation	Minimum	Maximum	Percentiles			
						25th	50th (Median)	75th	
CA grau	Diff. Rauheitswert Sa T1-T0 [μm]	8	1,4464	0,18562	1,27	1,76	1,2854	1,4052	1,6126
	Diff. Rauheitswert Sa T2-T0 [μm]	8	-0,1092	0,11800	-0,36	-0,01	-0,1552	-0,0766	-0,0188
	Diff. Rauheitswert Sa T2-T1 [μm]	8	-1,5556	0,21215	-1,92	-1,30	-1,6851	-1,5617	-1,3469
Profin rot	Diff. Rauheitswert Sa T1-T0 [μm]	8	1,3518	0,28122	0,99	1,91	1,1673	1,3122	1,4705
	Diff. Rauheitswert Sa T2-T0 [μm]	8	-0,0541	0,16798	-0,40	0,15	-0,0872	-0,0723	0,0923
	Diff. Rauheitswert Sa T2-T1 [μm]	8	-1,4059	0,28090	-1,99	-1,01	-1,5038	-1,3676	-1,2751
Komet 045	Diff. Rauheitswert Sa T1-T0 [μm]	8	0,4808	0,23209	0,29	0,97	0,3119	0,4007	0,6248
	Diff. Rauheitswert Sa T2-T0 [μm]	8	-0,0600	0,13527	-0,29	0,19	-0,1064	-0,0708	-0,0062
	Diff. Rauheitswert Sa T2-T1 [μm]	8	-0,5407	0,19296	-0,97	-0,38	-0,6156	-0,5050	-0,3980

Tabelle 5: Deskriptive Statistik – Differenz der Rauheitsparameter Sa für die Messungen an Prämolaren

Prämolaren - Rauheitswert Sq

Deskriptive Statistik									
ASR Tool	N	Mean	Std. Deviation	Minimum	Maximum	Percentiles			
						25th	50th (Median)	75th	
CA grau	Rauheitswert Sq T0 [μm]	8	0,46614	0,130458	0,309	0,759	0,39528	0,45522	0,47168
	Rauheitswert Sq T1 [μm]	8	2,31314	0,249870	1,976	2,708	2,07598	2,37258	2,48208
	Rauheitswert Sq T2 [μm]	8	0,33872	0,064213	0,272	0,456	0,29937	0,31537	0,39697
Profin rot	Rauheitswert Sq T0 [μm]	8	0,49697	0,116298	0,328	0,713	0,40280	0,50905	0,55028
	Rauheitswert Sq T1 [μm]	8	2,26070	0,298120	2,023	2,944	2,07125	2,14963	2,34754
	Rauheitswert Sq T2 [μm]	8	0,44991	0,135902	0,235	0,677	0,35159	0,45767	0,52710
Komet 045	Rauheitswert Sq T0 [μm]	8	0,44131	0,121716	0,275	0,700	0,38329	0,41423	0,47926
	Rauheitswert Sq T1 [μm]	8	1,08130	0,246244	0,788	1,539	0,86357	1,05162	1,25562
	Rauheitswert Sq T2 [μm]	8	0,37640	0,112507	0,279	0,622	0,29823	0,35025	0,42700

Tabelle 6: Deskriptive Statistik – Rauheitsparameter Sq für die Messungen an Prämolaren

Ergebnisse

Die deskriptive Statistik des Rauheitsparameters Sq für die verschiedenen ASR-Instrumente ist in Tabelle 6 zusammengefasst. Grafisch ist die Veränderung des Rauheitsparameters Sq zu den verschiedenen Zeitpunkten T0, T1 und T2 als Box-Whisker-Plot dargestellt (siehe Abb. 31).

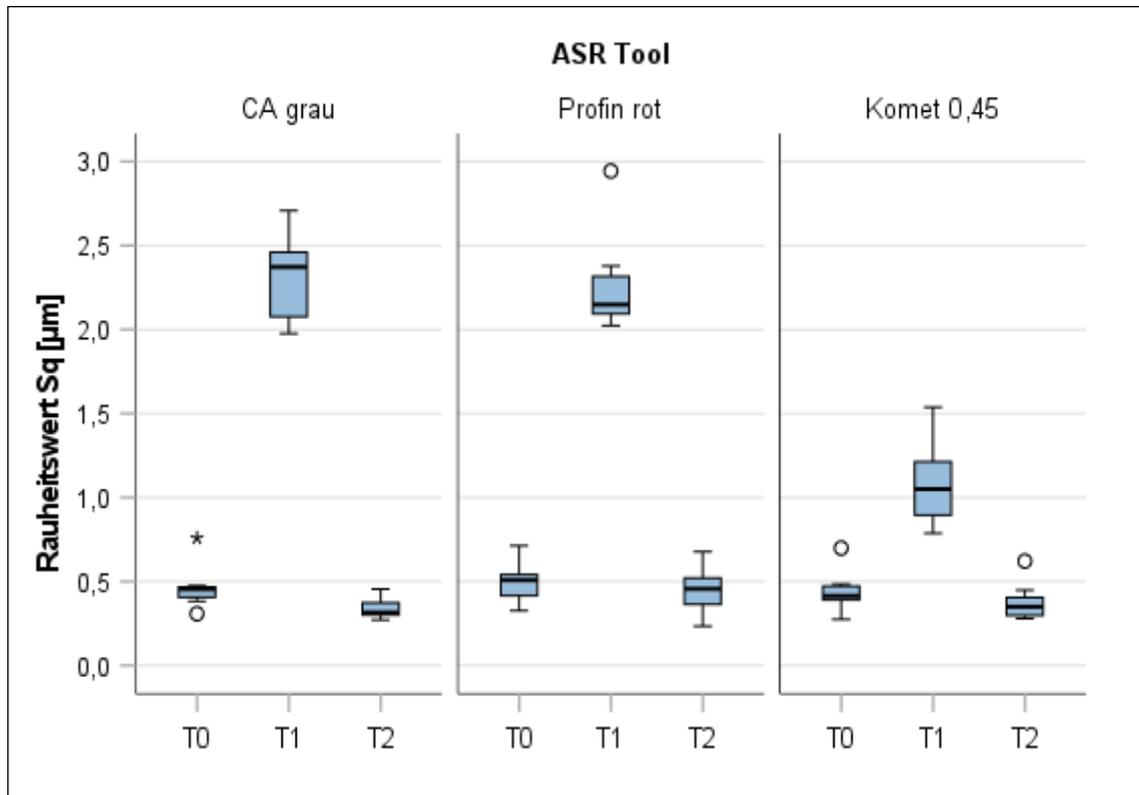


Abbildung 31: Boxplots- Darstellung des Rauheitsparameter Sq in Abhängigkeit vom verwendeten ASR-Instrument zu den Zeitpunkten T0, T1 und T2, Grafik von Ulrike von Hehn.

Der Friedman-Test zeigte global bei allen drei ASR-Gruppen signifikante Unterschiede des Rauheitsparameter Sq ($p < 0,05$). Auch der Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test zeigte für alle Vergleiche zwischen zwei Zeitpunkten signifikante Unterschiede ($p < 0,05$), außer zwischen T0 und T2 für Profin rot ($p = 0,58$) und Komet 045 ($p = 0,16$).

Der Kruskal-Wallis-Test zeigte signifikante Unterschiede der Systeme bei T1 ($p < 0,05$), nicht jedoch bei T0 ($p = 0,38$) und T2 ($p = 0,15$). Der mittlere Rauheitswert Sq unterschied sich bei T0 und T2 nicht ($p > 0,05$).

Der Mann-Whitney-U-Test zeigt im Post-hoc Vergleich, dass kein signifikanter Unterschied ($p > 0,05$) zwischen CA grau und Profin rot bei T1 bestand. Jedoch bestand ein signifikanter Unterschied ($p < 0,001$) des Sq-Wertes zwischen Komet 045 und jeweils Profin lila und CA grau. Gleiches gilt für die Differenzen zwischen (T0-T1) und (T2-T1).

Die Differenz des Rauheitsparameters Sq zwischen den verschiedenen Zeitpunkten T0, T1 und T2 ist in Tabelle 7 dargestellt. Der Rauheitsparameter Sq erhöhte sich zwischen T0 und T1 bei Profin rot um $1,764 \mu\text{m}$, bei CA grau um $1,847 \mu\text{m}$ und bei Komet 045 um $0,64 \mu\text{m}$. Die Anwendung des Komet-Systems führt demnach zu einer signifikant ($p < 0,001$) geringeren Erhöhung des Rauheitsparameters Sq.

Ergebnisse

Deskriptive Statistik									
ASR Tool		N	Mean	Std. Deviation	Minimum	Maximum	Percentiles		
							25th	50th (Median)	75th
CA grau	Diff. Rauheitswert Sq T1-T0 [μm]	8	1,8470	0,24315	1,61	2,23	1,6328	1,7874	2,0799
	Diff. Rauheitswert Sq T2-T0 [μm]	8	-0,1274	0,14552	-0,44	0,00	-0,1901	-0,0958	-0,0099
	Diff. Rauheitswert Sq T2-T1 [μm]	8	-1,9744	0,26910	-2,44	-1,66	-2,1543	-2,0022	-1,6929
Profin rot	Diff. Rauheitswert Sq T1-T0 [μm]	8	1,7637	0,35432	1,34	2,50	1,5201	1,7004	1,9113
	Diff. Rauheitswert Sq T2-T0 [μm]	8	-0,0471	0,20717	-0,48	0,21	-0,1052	-0,0260	0,1161
	Diff. Rauheitswert Sq T2-T1 [μm]	8	-1,8108	0,36746	-2,61	-1,35	-1,9319	-1,7393	-1,6319
Komet 045	Diff. Rauheitswert Sq T1-T0 [μm]	8	0,6400	0,30322	0,38	1,26	0,4184	0,5465	0,8308
	Diff. Rauheitswert Sq T2-T0 [μm]	8	-0,0649	0,15631	-0,34	0,22	-0,1237	-0,0730	0,0075
	Diff. Rauheitswert Sq T2-T1 [μm]	8	-0,7049	0,24428	-1,24	-0,49	-0,7634	-0,6947	-0,5095

Tabelle 7: Deskriptive Statistik – Differenz der Rauheitsparameter Sq für die Messung an Prämolaren

Prämolaren – Rauheitswert Sdr

Deskriptive Statistik									
ASR Tool		N	Mean	Std. Deviation	Minimum	Maximum	Percentiles		
							25th	50th (Median)	75th
CA grau	Rauheitswert Sdr T0 [%]	8	0,55726	0,147881	0,359	0,819	0,40692	0,58982	0,61910
	Rauheitswert Sdr T1 [%]	8	6,30757	1,286873	5,043	8,819	5,21332	6,15325	7,19523
	Rauheitswert Sdr T2 [%]	8	0,49983	0,149887	0,354	0,793	0,37204	0,48412	0,59993
Profin rot	Rauheitswert Sdr T0 [%]	8	0,60697	0,163699	0,380	0,839	0,44026	0,66418	0,71111
	Rauheitswert Sdr T1 [%]	8	6,19369	1,484655	5,022	9,466	5,13023	5,73077	6,67903
	Rauheitswert Sdr T2 [%]	8	0,72715	0,326594	0,260	1,411	0,54375	0,71667	0,78771
Komet 0,45	Rauheitswert Sdr T0 [%]	8	0,57659	0,357209	0,335	1,424	0,35017	0,48732	0,59880
	Rauheitswert Sdr T1 [%]	8	1,55302	0,692797	0,793	2,773	0,97730	1,36395	2,18555
	Rauheitswert Sdr T2 [%]	8	0,57741	0,400201	0,302	1,479	0,31462	0,40522	0,73530

Tabelle 8: Deskriptive Statistik – Rauheitsparameter Sdr für die Messungen an Prämolaren

Die deskriptive Statistik des Rauheitsparameters Sdr für die verschiedenen ASR-Instrumente ist in Tabelle 8 zusammengefasst. Grafisch ist die Veränderung des Rauheitsparameters Sdr zu den verschiedenen Zeitpunkten T0, T1 und T2 als Box-Whisker-Plot dargestellt (siehe Abb. 32).

Der Friedman-Test zeigte global bei allen drei ASR-Gruppen signifikante Unterschiede des Rauheitsparameter Sdr ($p < 0,05$). Auch der Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test zeigt für alle Vergleiche zwischen zwei Zeitpunkten signifikante Unterschiede ($p < 0,05$), außer zwischen T0 und T2 für alle Systeme (CA grau, $p = 0,48$; Profin rot, $p = 0,16$; Komet 045, $p = 1,00$).

Ergebnisse

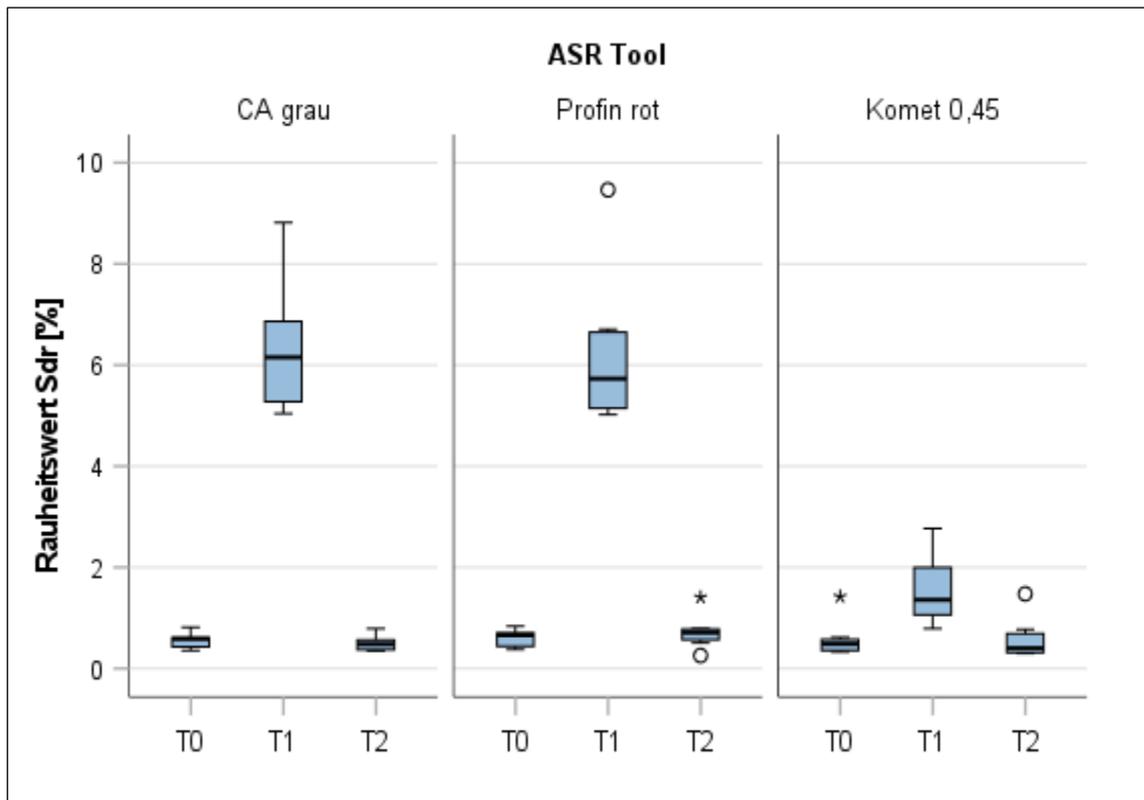


Abbildung 32: Boxplots-Darstellung des Rauheitsparameters Sdr in Abhängigkeit vom verwendeten ASR-Instrument zu den Zeitpunkten T0, T1 und T2, Grafik von Ulrike von Hehn.

Der Kruskal-Wallis Test zeigte signifikante Unterschiede der Systeme bei T1 ($p < 0,05$), nicht jedoch bei T0 ($p = 0,35$) und T2 ($p = 0,21$). Der Rauheitswert Sdr unterschied sich bei T0 und T2 nicht zwischen den Systemen ($p > 0,05$). Der Mann-Whitney-U-Test zeigte im Post-hoc Vergleich, dass kein signifikanter Unterschied ($p > 0,05$) zwischen CA grau und Profin rot bestand. Jedoch bestand ein signifikanter Unterschied ($p < 0,001$) des Sdr-Wertes zwischen Komet 045 und jeweils Profin rot und CA grau. Gleiches galt für die Differenzen zwischen (T0-T1) und (T2-T1).

		Deskriptive Statistik					Percentiles		
		N	Mean	Std. Deviation	Minimum	Maximum	25th	50th (Median)	75th
CA grau	Diff. Rauheitswert Sdr T1-T0 [%]	8	5,7503	1,23961	4,43	8,20	4,8487	5,4874	6,6116
	Diff. Rauheitswert Sdr T2-T0 [%]	8	-0,0574	0,22680	-0,34	0,25	-0,2607	-0,0969	0,1845
	Diff. Rauheitswert Sdr T2-T1 [%]	8	-5,8077	1,28825	-8,47	-4,65	-6,4890	-5,6984	-4,6986
Profin rot	Diff. Rauheitswert Sdr T1-T0 [%]	8	5,5867	1,56614	4,43	9,03	4,5063	4,9954	6,2164
	Diff. Rauheitswert Sdr T2-T0 [%]	8	0,1202	0,37954	-0,58	0,77	0,0015	0,0797	0,3396
	Diff. Rauheitswert Sdr T2-T1 [%]	8	-5,4665	1,60091	-8,95	-3,78	-5,9270	-5,2039	-4,3758
Komert 0,45	Diff. Rauheitswert Sdr T1-T0 [%]	8	0,9764	0,94531	-0,63	2,44	0,4564	0,8553	1,7876
	Diff. Rauheitswert Sdr T2-T0 [%]	8	0,0008	0,60834	-1,12	1,10	-0,2054	0,0366	0,1632
	Diff. Rauheitswert Sdr T2-T1 [%]	8	-0,9756	0,61974	-2,44	-0,49	-0,9887	-0,8573	-0,5981

Tabelle 9: Deskriptive Statistik – Differenz der Rauheitsparameter Sdr für die Messungen an Prämolaren

Die Differenz des Rauheitsparameters Sdr zwischen den verschiedenen Zeitpunkten T0, T1 und T2 ist in Tabelle 9 dargestellt. Der Rauheitsparameter Sdr erhöhte sich zwischen T0 und T1 bei CA grau um 5,75 %, bei Profin rot um 5,587 % und bei Komert 045 um 0,976 %. Daher führt das Komert-System zu einer signifikant geringeren Vergrößerung der Oberfläche als das CA-System und das Profin-System ($p < 0,001$).

Ergebnisse

Prämolaren - Rauheitswert Svk

		Deskriptive Statistik							
		N	Mean	Std. Deviation	Minimum	Maximum	Percentiles		
25th	50th (Median)						75th		
ASR Tool									
CA grau	Rauheitswert Svk T0 [µm]	8	0,52910	0,153111	0,448	0,900	0,45320	0,46517	0,52666
	Rauheitswert Svk T1 [µm]	8	2,19062	0,535158	1,425	2,880	1,72448	2,12647	2,76729
	Rauheitswert Svk T2 [µm]	8	0,34525	0,102090	0,266	0,573	0,27013	0,31800	0,38184
Profin rot	Rauheitswert Svk T0 [µm]	8	0,51044	0,172186	0,261	0,862	0,43163	0,47710	0,58199
	Rauheitswert Svk T1 [µm]	8	2,18798	0,484423	1,681	3,232	1,78668	2,16328	2,31029
	Rauheitswert Svk T2 [µm]	8	0,56164	0,237729	0,214	0,887	0,34178	0,57610	0,78950
Komet 0,45	Rauheitswert Svk T0 [µm]	8	0,47545	0,140323	0,285	0,739	0,39473	0,43643	0,57162
	Rauheitswert Svk T1 [µm]	8	1,10473	0,341478	0,534	1,612	0,83905	1,11100	1,34568
	Rauheitswert Svk T2 [µm]	8	0,39776	0,081374	0,310	0,537	0,31897	0,38877	0,45999

Tabelle 10: Deskriptive Statistik – Rauheitsparameter Svk für die Messungen an Prämolaren

Die deskriptive Statistik des Rauheitsparameters Svk für die verschiedenen ASR-Instrumente ist in Tabelle 10 zusammengefasst. Grafisch ist die Veränderung des Rauheitsparameters Svk zu den verschiedenen Zeitpunkten T0, T1 und T2 als Box-Whisker-Plot dargestellt (siehe Abb. 33).

Der Friedman-Test zeigt global bei allen drei ASR-Gruppen signifikante Unterschiede des Rauheitsparameters Svk ($p < 0,05$). Auch der Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test zeigt für alle Vergleiche zwischen zwei Zeitpunkten signifikante Unterschiede ($p < 0,05$), außer zwischen T0 und T2 für Profin rot ($p = 0,58$) und Komet 045 ($p = 0,16$).

Der Kruskal-Wallis Test zeigte signifikante Unterschiede der Systeme bei T1 ($p < 0,05$), nicht jedoch bei T0 ($p = 0,71$) und T2 ($p = 0,07$). Der Rauheitswert Svk unterschied sich bei T0 und T2 nicht zwischen den Systemen ($p > 0,05$).

Der Mann-Whitney-U-Test zeigt im Post-hoc Vergleich, dass kein signifikanter Unterschied ($p > 0,05$) zwischen CA grau und Profin rot bestand. Jedoch bestand ein signifikanter Unterschied ($p < 0,001$) des Svk-Wertes zwischen Komet 045 und jeweils Profin rot und CA grau. Gleiches galt für die Differenzen zwischen T0 und T1 sowie T2 und T1.

Ergebnisse

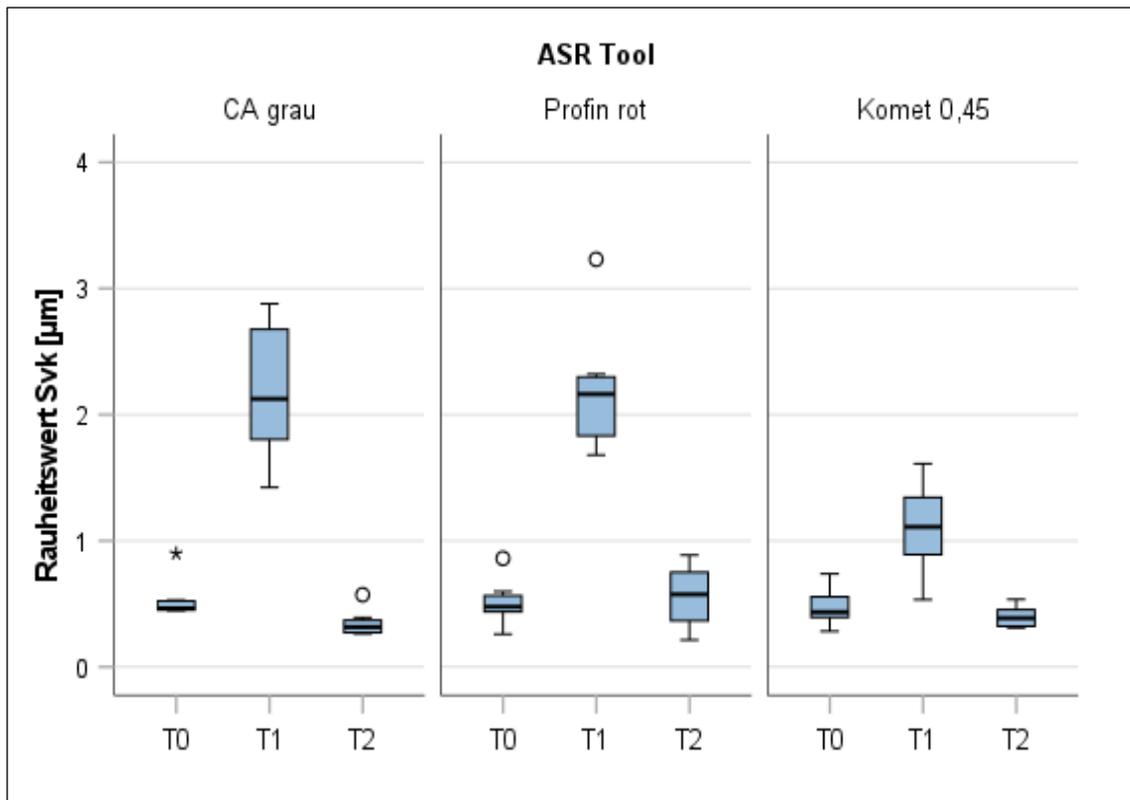


Abbildung 33: Boxplot-Darstellung des Rauheitsparameters Svk in Abhängigkeit vom verwendeten ASR-Instrument zu den Zeitpunkten T0, T1 und T2, Grafik von Ulrike von Hehn.

Die Differenz des Rauheitsparameters Svk zwischen den verschiedenen Zeitpunkten T0, T1 und T2 ist in Tabelle 11 dargestellt. Die reduzierte Talhöhe (Svk) erhöhte sich von T0 - T1 bei Profin rot um 1,678 µm, bei CA grau um 1,662 µm und bei Komet 045 um 0,629 µm ($p=0,001$).

		Deskriptive Statistik							
		N	Mean	Std. Deviation	Minimum	Maximum	Percentiles		
ASR Tool							25th	50th (Median)	75th
CA grau	Diff. Rauheitswert Svk T1-T0 [µm]	8	1,6615	0,60782	0,74	2,41	1,0881	1,6691	2,2672
	Diff. Rauheitswert Svk T2-T0 [µm]	8	-0,1839	0,16751	-0,55	0,04	-0,1941	-0,1657	-0,1214
	Diff. Rauheitswert Svk T2-T1 [µm]	8	-1,8454	0,56507	-2,60	-1,09	-2,4056	-1,8419	-1,3204
Profin rot	Diff. Rauheitswert Svk T1-T0 [µm]	8	1,6775	0,47108	1,24	2,63	1,2666	1,6307	1,8859
	Diff. Rauheitswert Svk T2-T0 [µm]	8	0,0512	0,37660	-0,65	0,57	-0,2138	0,1218	0,3125
	Diff. Rauheitswert Svk T2-T1 [µm]	8	-1,6263	0,58416	-2,92	-1,06	-1,8728	-1,4143	-1,2804
Komet 0,45	Diff. Rauheitswert Svk T1-T0 [µm]	8	0,6293	0,38488	0,05	1,08	0,2232	0,7302	0,9335
	Diff. Rauheitswert Svk T2-T0 [µm]	8	-0,0777	0,13891	-0,32	0,12	-0,1464	-0,0746	0,0439
	Diff. Rauheitswert Svk T2-T1 [µm]	8	-0,7070	0,34888	-1,15	-0,20	-1,0324	-0,7064	-0,3944

Tabelle 11: Deskriptive Statistik – Differenz der Rauheitsparameter Svk für die Messungen an Prämolaren

Das Komet-System führt demnach zu einer signifikant geringeren Vertiefung unterhalb des Kernbereichs der Oberfläche und folglich zu einer geringeren potenziellen Flüssigkeitsansammlung im Bereich der Täler.

Ergebnisse

5.2.2 Ergebnisse der Rauheitsmessung Prüfgruppe Frontzähne

Die Ergebnisse zu den Rauheitsmessungen sind in Tabelle 12 – 19 zusammengefasst.

Frontzähne – Rauheitswert Sa

		Deskriptive Statistik					Percentiles		
		N	Mean	Std. Deviation	Minimum	Maximum	25th	50th (Median)	75th
ASR Tool Profin lila	Rauheitswert Sa T0 [µm]	8	0,308	0,042	0,232	0,366	0,276	0,317	0,333
	Rauheitswert Sa T1 [µm]	8	1,943	0,332	1,595	2,662	1,719	1,870	2,070
	Rauheitswert Sa T2 [µm]	8	0,277	0,053	0,196	0,366	0,239	0,274	0,315
CA rot	Rauheitswert Sa T0 [µm]	8	0,315	0,031	0,268	0,363	0,290	0,315	0,338
	Rauheitswert Sa T1 [µm]	8	1,695	0,271	1,106	1,947	1,627	1,718	1,911
	Rauheitswert Sa T2 [µm]	8	0,333	0,093	0,271	0,555	0,290	0,299	0,340
Komet 0,30	Rauheitswert Sa T0 [µm]	8	0,281	0,058	0,200	0,395	0,246	0,270	0,311
	Rauheitswert Sa T1 [µm]	8	0,416	0,055	0,359	0,516	0,373	0,402	0,467
	Rauheitswert Sa T2 [µm]	8	0,255	0,048	0,206	0,334	0,215	0,236	0,303

Tabelle 12: Deskriptive Statistik – Rauheitsparameter Sa für die Messungen an Frontzähnen

Die deskriptive Statistik des Rauheitsparameters Sa für die verschiedenen ASR-Instrumente ist in Tabelle 12 zusammengefasst. Grafisch ist die Veränderung des Rauheitsparameters Sa zu den verschiedenen Zeitpunkten T0, T1 und T2 als Box-Whisker-Plot dargestellt (siehe Abb. 34).

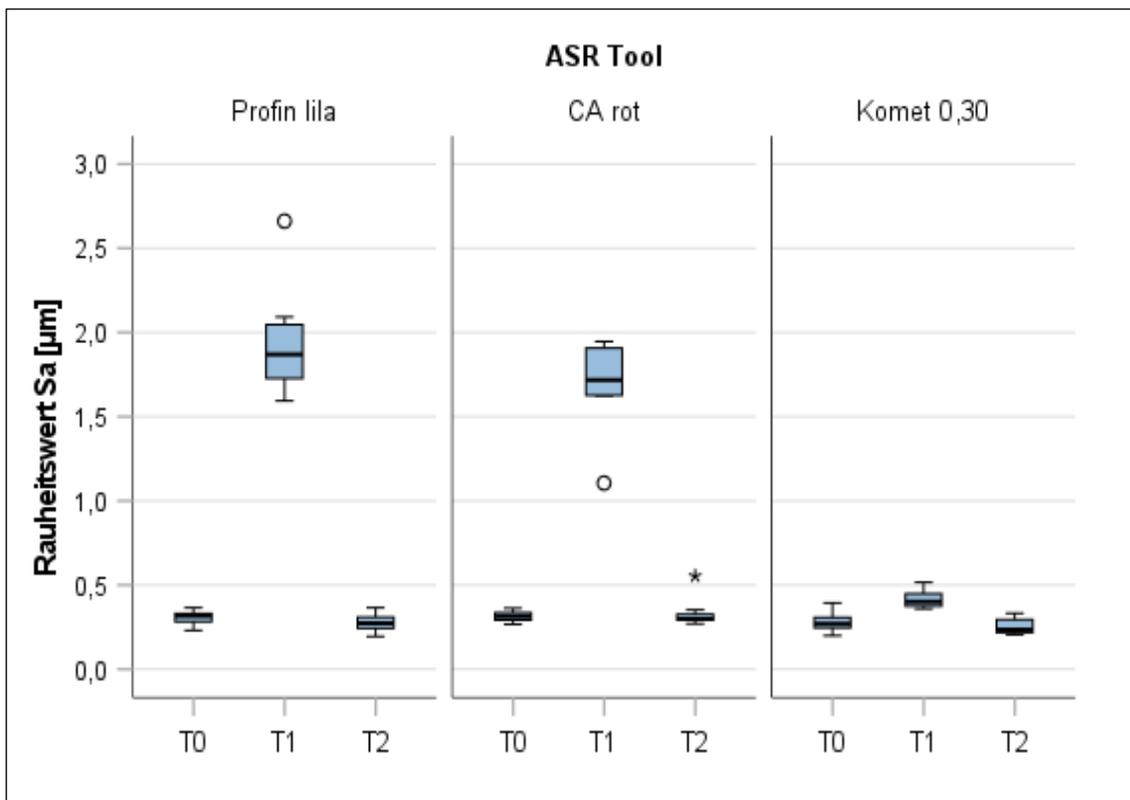


Abbildung 34: Boxplot-Darstellung des Rauheitsparameters Sa in Abhängigkeit vom verwendeten ASR-Instrument zu den Zeitpunkten T0, T1 und T2, Grafik von Ulrike von Hehn.

Ergebnisse

Der Friedman-Test zeigte global bei allen drei ASR-Gruppen signifikante Unterschiede des Rauheitsparameter Sa ($p < 0,05$). Auch der Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test zeigt für alle Vergleiche zwischen zwei Zeitpunkten signifikante Unterschiede ($p < 0,05$), außer zwischen T0 und T2 für alle Systeme (Profin lila, $p = 0,16$; CA rot, $p = 0,89$ und Komet 030, $p = 0,33$).

Der Kruskal-Wallis-Test zeigte signifikante Unterschiede der Systeme bei T1 ($p < 0,05$), nicht jedoch bei T0 ($p = 0,20$) und T2 ($p = 0,11$). Der mittlere Rauheitswert Sa unterschieden sich bei T0 und T2 nicht ($p > 0,05$).

Der Mann-Whitney-U-Test zeigte im Post-hoc Vergleich, dass kein signifikanter Unterschied ($p > 0,05$) zwischen CA grau und Profin lila bei T1 besteht. Jedoch bestand ein signifikanter Unterschied ($p < 0,001$) des Sa-Wertes zwischen Komet 030 und jeweils Profin lila und CA rot. Gleiches gilt für die Differenzen zwischen (T0-T1) und (T2-T1).

Die Differenz des Rauheitsparameters Sa zwischen den verschiedenen Zeitpunkten T0, T1 und T2 ist in Tabelle 13 dargestellt. Der Rauheitsparameter Sa in der Frontzahngruppe erhöhte sich für das Komet 030 um $0,136 \mu\text{m}$, für das CA rot um $1,38 \mu\text{m}$ und für Profin lila um $1,636 \mu\text{m}$. Daher führte die Anwendung des Komet-Systems zu einer signifikant ($p < 0,001$) geringeren Erhöhung des Rauheitsparameter Sa.

Deskriptive Statistik									
ASR Tool		N	Mean	Std. Deviation	Minimum	Maximum	Percentiles		
							25th	50th (Median)	75th
Profin lila	Diff. Rauheitswert Sa T1-T0 [μm]	8	1,6355	0,34701	1,26	2,36	1,4217	1,5287	1,8165
	Diff. Rauheitswert Sa T2-T0 [μm]	8	-0,0307	0,05751	-0,11	0,05	-0,0825	-0,0228	0,0218
	Diff. Rauheitswert Sa T2-T1 [μm]	8	-1,6662	0,34049	-2,37	-1,34	-1,8643	-1,5602	-1,4142
CA rot	Diff. Rauheitswert Sa T1-T0 [μm]	8	1,3799	0,28396	0,77	1,65	1,2976	1,4020	1,6082
	Diff. Rauheitswert Sa T2-T0 [μm]	8	0,0177	0,09042	-0,06	0,21	-0,0530	-0,0089	0,0573
	Diff. Rauheitswert Sa T2-T1 [μm]	8	-1,3621	0,28234	-1,66	-0,84	-1,6002	-1,4171	-1,1385
Komet 0,30	Diff. Rauheitswert Sa T1-T0 [μm]	8	0,1355	0,07068	0,07	0,27	0,0854	0,1083	0,1894
	Diff. Rauheitswert Sa T2-T0 [μm]	8	-0,0258	0,06464	-0,10	0,09	-0,0799	-0,0438	0,0229
	Diff. Rauheitswert Sa T2-T1 [μm]	8	-0,1612	0,01554	-0,18	-0,14	-0,1753	-0,1616	-0,1485

Tabelle 13: Deskriptive Statistik – Differenz der Rauheitsparameter Sa für die Messungen an Frontzähnen

Frontzähne – Rauheitswert Sq

Deskriptive Statistik									
ASR Tool		N	Mean	Std. Deviation	Minimum	Maximum	Percentiles		
							25th	50th (Median)	75th
Profin lila	Rauheitswert Sq T0 [μm]	8	0,40833	0,060987	0,306	0,500	0,37025	0,40737	0,46183
	Rauheitswert Sq T1 [μm]	8	2,47420	0,426903	1,974	3,365	2,19043	2,39315	2,65322
	Rauheitswert Sq T2 [μm]	8	0,37241	0,095943	0,254	0,569	0,30588	0,35617	0,41088
CA rot	Rauheitswert Sq T0 [μm]	8	0,40885	0,039107	0,345	0,465	0,38423	0,40750	0,43840
	Rauheitswert Sq T1 [μm]	8	2,14569	0,366811	1,384	2,556	2,00768	2,17033	2,44312
	Rauheitswert Sq T2 [μm]	8	0,49211	0,270204	0,349	1,147	0,37773	0,38513	0,49308
Komet 0,30	Rauheitswert Sq T0 [μm]	8	0,36645	0,071877	0,256	0,505	0,32703	0,36145	0,40073
	Rauheitswert Sq T1 [μm]	8	0,52563	0,071994	0,457	0,648	0,46100	0,50910	0,59579
	Rauheitswert Sq T2 [μm]	8	0,33010	0,063061	0,266	0,439	0,27648	0,30683	0,38884

Tabelle 14: Deskriptive Statistik – Rauheitsparameter Sq für die Messungen an Frontzähnen

Ergebnisse

Die deskriptive Statistik des Rauheitsparameters Sq zwischen den verschiedenen ASR-Tools ist in Tabelle 14 zusammengefasst. Grafisch ist die Veränderung des Rauheitsparameters Sq zu den verschiedenen Zeitpunkten T0, T1 und T2 als Box-Whisker-Plot dargestellt (siehe Abb. 35)

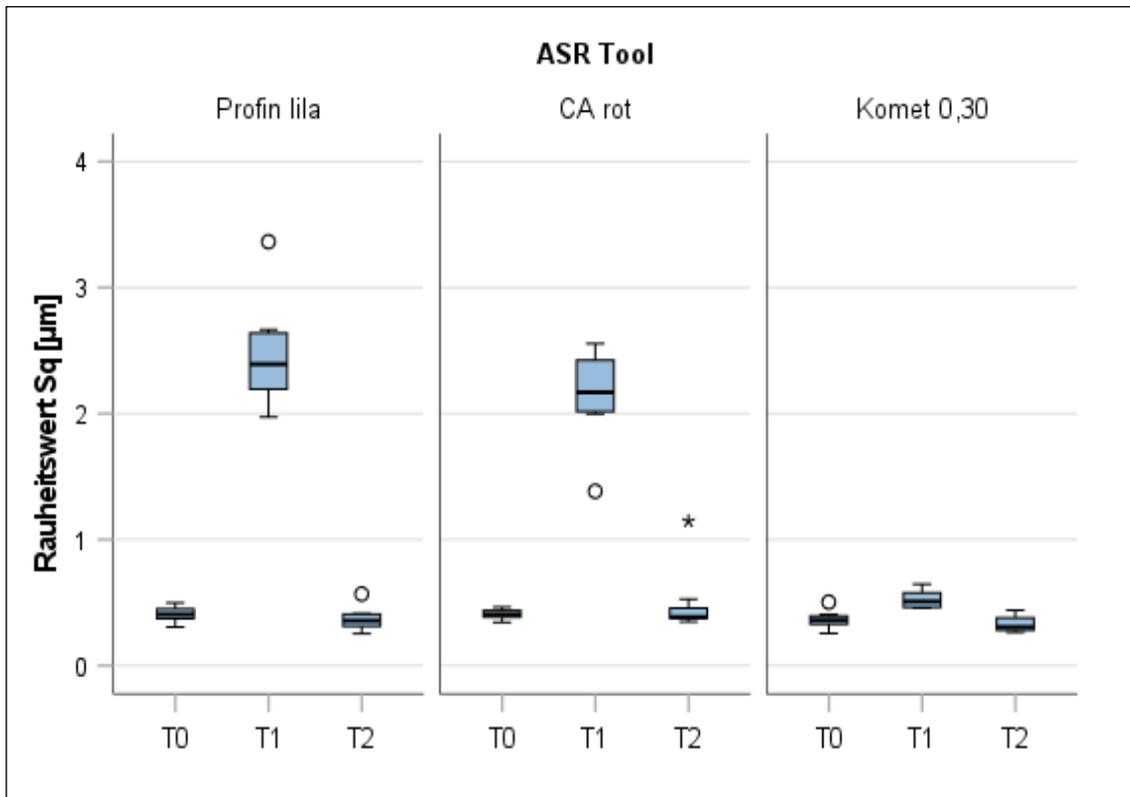


Abbildung 35: Boxplots-Darstellung des Rauheitsparameters Sq in Abhängigkeit vom verwendeten ASR-Instrument zu den Zeitpunkten T0, T1 und T2, Grafik von Ulrike von Hehn.

Der Friedman-Test zeigte global bei allen drei ASR-Gruppen signifikante Unterschiede des Rauheitsparameter Sq ($p < 0,05$). Auch der Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test zeigt für alle Vergleiche zwischen zwei Zeitpunkten signifikante Unterschiede ($p < 0,05$), außer zwischen T0 und T2 für alle Systeme (Profin lila, $p = 0,33$; CA rot, $p = 1,00$ und Komet 030, $p = 0,33$).

Der Kruskal-Wallis-Test zeigt signifikante Unterschiede der Systeme bei T1 ($p < 0,05$), nicht jedoch bei T0 ($p = 0,20$) und T2 ($p = 0,13$). Der mittlere Rauheitswert Sq unterschied sich bei T0 und T2 nicht ($p > 0,05$).

Der Mann-Whitney-U-Test zeigte im Post-hoc Vergleich, dass kein signifikanter Unterschied ($p > 0,05$) zwischen CA rot und Profin lila bei T1 bestand. Jedoch bestand ein signifikanter Unterschied ($p < 0,001$) des Sq-Wertes zwischen Komet 030 und jeweils Profin lila und CA rot. Gleiches gilt für die Differenzen zwischen T0 und T1 sowie T2 und T1.

Ergebnisse

Die Differenz des Rauheitsparameters Sq zwischen den verschiedenen Zeitpunkten T0, T1 und T2 ist in Tabelle 15 dargestellt. Der Rauheitsparameter Sq in der Frontzahngruppe erhöhte sich zwischen T0 und T1 für das Komet 030 um 0,159 µm, für das CA rot um 1,737 µm und für Profin lila um 2,066 µm. Daher führte die Anwendung des Komet-Systems zu einer signifikant ($p < 0,001$) geringerer Erhöhung des Rauheitsparameter Sq.

Deskriptive Statistik									
ASR Tool		N	Mean	Std. Deviation	Minimum	Maximum	Percentiles		
							25th	50th (Median)	75th
Profin lila	Diff. Rauheitswert Sq T1-T0 [µm]	8	2,0659	0,46146	1,47	2,99	1,7886	1,9535	2,3216
	Diff. Rauheitswert Sq T2-T0 [µm]	8	-0,0359	0,10852	-0,17	0,16	-0,1362	-0,0323	0,0277
	Diff. Rauheitswert Sq T2-T1 [µm]	8	-2,1018	0,44408	-2,98	-1,64	-2,3878	-1,9443	-1,7847
CA rot	Diff. Rauheitswert Sq T1-T0 [µm]	8	1,7368	0,37577	0,96	2,17	1,6028	1,7652	2,0166
	Diff. Rauheitswert Sq T2-T0 [µm]	8	0,0833	0,26345	-0,08	0,71	-0,0715	-0,0031	0,1132
	Diff. Rauheitswert Sq T2-T1 [µm]	8	-1,6536	0,46300	-2,18	-0,89	-2,0213	-1,7892	-1,1797
Komet 0,30	Diff. Rauheitswert Sq T1-T0 [µm]	8	0,1592	0,08595	0,08	0,32	0,0982	0,1178	0,2317
	Diff. Rauheitswert Sq T2-T0 [µm]	8	-0,0364	0,08200	-0,12	0,11	-0,1032	-0,0618	0,0266
	Diff. Rauheitswert Sq T2-T1 [µm]	8	-0,1955	0,01871	-0,22	-0,16	-0,2117	-0,2000	-0,1830

Tabelle 15: Deskriptive Statistik – Differenz der Rauheitsparameter Sq für die Messungen an Frontzähnen

Frontzähne – Rauheitswert Sdr

Deskriptive Statistik									
ASR Tool		N	Mean	Std. Deviation	Minimum	Maximum	Percentiles		
							25th	50th (Median)	75th
Profin lila	Rauheitswert Sdr T0 [%]	8	0,46447	0,155837	0,280	0,655	0,30523	0,44027	0,63588
	Rauheitswert Sdr T1 [%]	8	7,92877	2,606590	4,936	13,182	5,91310	7,67997	9,26609
	Rauheitswert Sdr T2 [%]	8	0,53779	0,171885	0,294	0,818	0,41859	0,51718	0,69647
Profin rot	Rauheitswert Sdr T0 [%]	8	0,53088	0,151529	0,354	0,814	0,39788	0,50265	0,63759
	Rauheitswert Sdr T1 [%]	8	6,30275	2,056804	2,813	9,002	4,83299	6,50197	8,27738
	Rauheitswert Sdr T2 [%]	8	0,83854	0,563356	0,517	2,224	0,61717	0,64923	0,72291
Komet 0,30	Rauheitswert Sdr T0 [%]	8	0,54240	0,372729	0,239	1,324	0,34194	0,37232	0,78182
	Rauheitswert Sdr T1 [%]	8	0,71705	0,173535	0,517	1,025	0,58125	0,69297	0,86438
	Rauheitswert Sdr T2 [%]	8	0,51364	0,206274	0,304	0,911	0,35489	0,43473	0,66465

Tabelle 16: Deskriptive Statistik – Rauheitsparameter Sdr für die Messungen an Frontzähnen

Die deskriptive Statistik des Rauheitsparameters Sdr für die verschiedenen ASR-Instrumente ist in Tabelle 16 zusammengefasst. Grafisch ist die Veränderung des Rauheitsparameters Sdr zu den verschiedenen Zeitpunkten T0, T1 und T2 als Box-Whisker-Plot dargestellt (siehe Abb. 36).

Ergebnisse

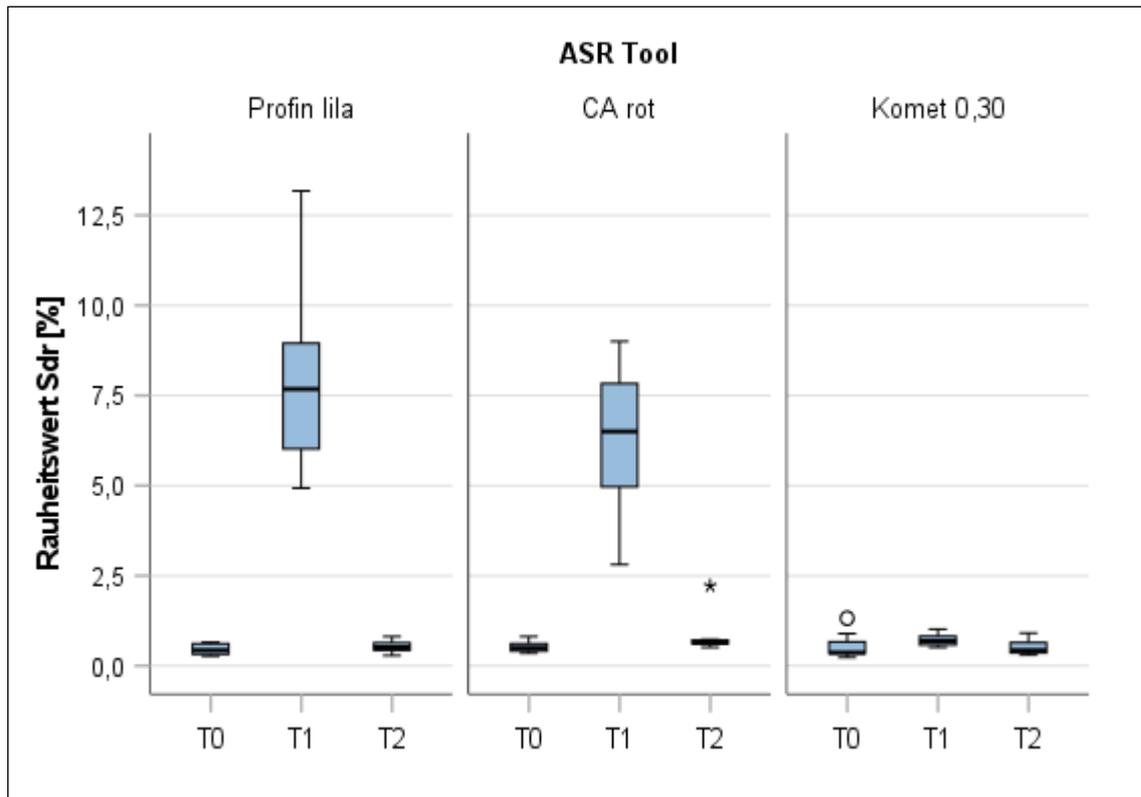


Abbildung 36: Boxplot-Darstellung des Rauheitsparameters Sdr in Abhängigkeit vom verwendeten ASR-Instrument zu den Zeitpunkten T0, T1 und T2, Grafik von Ulrike von Hehn.

Der Friedman-Test zeigte global bei allen drei ASR-Gruppen signifikante Unterschiede des Rauheitsparameter Sdr ($p < 0,05$). Auch der Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test zeigt für alle Vergleiche zwischen zwei Zeitpunkten signifikante Unterschiede ($p < 0,05$), außer zwischen T0 und T2 für alle Systeme (Profin lila, $p = 0,16$; CA rot, $p = 0,12$ und Komet 030, $p = 0,78$) und zwischen T1 und T0 für das Komet 0,30 ($p = 0,16$).

Der Kruskal-Wallis Test zeigte signifikante Unterschiede der Systeme bei T1 ($p < 0,05$), nicht jedoch bei T0 und T2. Der Rauheitswert Sdr unterscheidet sich bei T0 und T2 nicht zwischen den Systemen ($p > 0,05$).

Der Mann-Whitney-U-Test zeigte im Post-hoc Vergleich, dass kein signifikanter Unterschied ($p > 0,05$) zwischen CA rot und Profin lila bestand. Jedoch bestand ein signifikanter Unterschied ($p < 0,001$) des Sdr-Wertes zwischen Komet 030 und jeweils Profin lila und CA rot. Gleiches galt für die Differenzen zwischen T0 und T1 sowie T2 und T1.

Die Differenz des Rauheitsparameters Sdr zwischen den verschiedenen Zeitpunkten T0, T1 und T2 ist in Tabelle 17 dargestellt. Der Rauheitsparameter Sdr erhöhte sich zwischen den Zeitpunkten T0-T1 bei CA rot um 5,75 %, bei Profin lila um 7,464 % und bei Komet 030 um 0,175 %. Daher führt das Komet-System zu einer signifikant geringeren Vergrößerung der Oberfläche als das CA-System und das Profin-System ($p < 0,001$).

Ergebnisse

Deskriptive Statistik									
ASR Tool		N	Mean	Std. Deviation	Minimum	Maximum	Percentiles		
							25th	50th (Median)	75th
Profin lila	Diff. Rauheitswert Sdr T1-T0 [%]	8	7,4643	2,72547	4,28	12,90	5,3737	7,1564	8,9370
	Diff. Rauheitswert Sdr T2-T0 [%]	8	0,0733	0,17259	-0,19	0,25	-0,0999	0,0889	0,2369
	Diff. Rauheitswert Sdr T2-T1 [%]	8	-7,3910	2,65570	-12,66	-4,47	-8,9197	-7,0989	-5,1657
CA rot	Diff. Rauheitswert Sdr T1-T0 [%]	8	5,7719	2,01348	2,23	8,48	4,3728	5,9973	7,5534
	Diff. Rauheitswert Sdr T2-T0 [%]	8	0,3077	0,60552	-0,16	1,74	-0,0617	0,1752	0,3372
	Diff. Rauheitswert Sdr T2-T1 [%]	8	-5,4642	2,27323	-8,37	-2,30	-7,6107	-5,8759	-2,9815
Komet 0,30	Diff. Rauheitswert Sdr T1-T0 [%]	8	0,1746	0,42250	-0,74	0,65	0,0470	0,2172	0,4735
	Diff. Rauheitswert Sdr T2-T0 [%]	8	-0,0288	0,44568	-0,98	0,53	-0,1749	0,0351	0,2413
	Diff. Rauheitswert Sdr T2-T1 [%]	8	-0,2034	0,08737	-0,35	-0,11	-0,2677	-0,2114	-0,1142

Tabelle 17: Deskriptive Statistik – Differenz der Rauheitsparameter Sdr für die Messungen an Frontzähnen

Frontzähne – Rauheitswert Svk

Deskriptive Statistik									
ASR Tool		N	Mean	Std. Deviation	Minimum	Maximum	Percentiles		
							25th	50th (Median)	75th
Profin lila	Rauheitswert Svk T0 [µm]	8	0,44643	0,059219	0,392	0,572	0,40162	0,43427	0,47122
	Rauheitswert Svk T1 [µm]	8	2,39303	0,457022	1,369	2,784	2,22747	2,60187	2,65413
	Rauheitswert Svk T2 [µm]	8	0,46836	0,230379	0,258	0,983	0,33489	0,38787	0,55574
Profin rot	Rauheitswert Svk T0 [µm]	8	0,41001	0,088267	0,327	0,594	0,36124	0,37908	0,46530
	Rauheitswert Svk T1 [µm]	8	1,90382	0,593846	1,195	2,542	1,28752	1,92248	2,50072
	Rauheitswert Svk T2 [µm]	8	0,70531	0,711122	0,323	2,349	0,35142	0,38370	0,91650
Komet 0,30	Rauheitswert Svk T0 [µm]	8	0,37910	0,088142	0,221	0,487	0,30448	0,39607	0,44466
	Rauheitswert Svk T1 [µm]	8	0,52498	0,109985	0,393	0,675	0,43884	0,48782	0,64625
	Rauheitswert Svk T2 [µm]	8	0,33477	0,073007	0,246	0,463	0,26662	0,32967	0,38806

Tabelle 18: Deskriptive Statistik – Rauheitsparameter Svk für die Messungen an Frontzähnen

Die deskriptive Statistik des Rauheitsparameters Svk zwischen den verschiedenen ASR-Tools ist in Tabelle 18 zusammengefasst. Grafisch ist die Veränderung des Rauheitsparameters Svk zu den verschiedenen Zeitpunkten T0, T1 und T2 als Box-Whisker-Plot dargestellt (siehe Abb. 37).

Der Friedman-Test zeigte global bei allen drei ASR-Gruppen signifikante Unterschiede des Rauheitsparameter Svk ($p < 0,05$). Auch der Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test zeigte für alle Vergleiche zwischen zwei Zeitpunkten signifikante Unterschiede ($p < 0,05$), außer zwischen T0 und T2 für alle Systeme (Profin lila, $p = 0,78$; CA rot, $p = 0,26$ und Komet 030, $p = 0,12$).

Der Kruskal-Wallis-Test zeigte signifikante Unterschiede der Systeme bei T1 ($p < 0,05$), nicht jedoch bei T0 ($p = 0,14$) und T2 ($p = 0,18$). Der Rauheitswert Svk unterschieden sich bei T0 und T2 nicht zwischen den Systemen ($p > 0,05$).

Der Mann-Whitney-U-Test zeigte im Post-hoc Vergleich, dass kein signifikanter Unterschied ($p > 0,05$) zwischen CA rot und Profin lila bestand.

Ergebnisse

Jedoch bestand ein signifikanter Unterschied ($p < 0,001$) des Svk-Wertes zwischen Komet 030 und jeweils Profin lila und CA rot. Gleiches galt für die Differenzen zwischen (T0-T1) und (T2-T1).

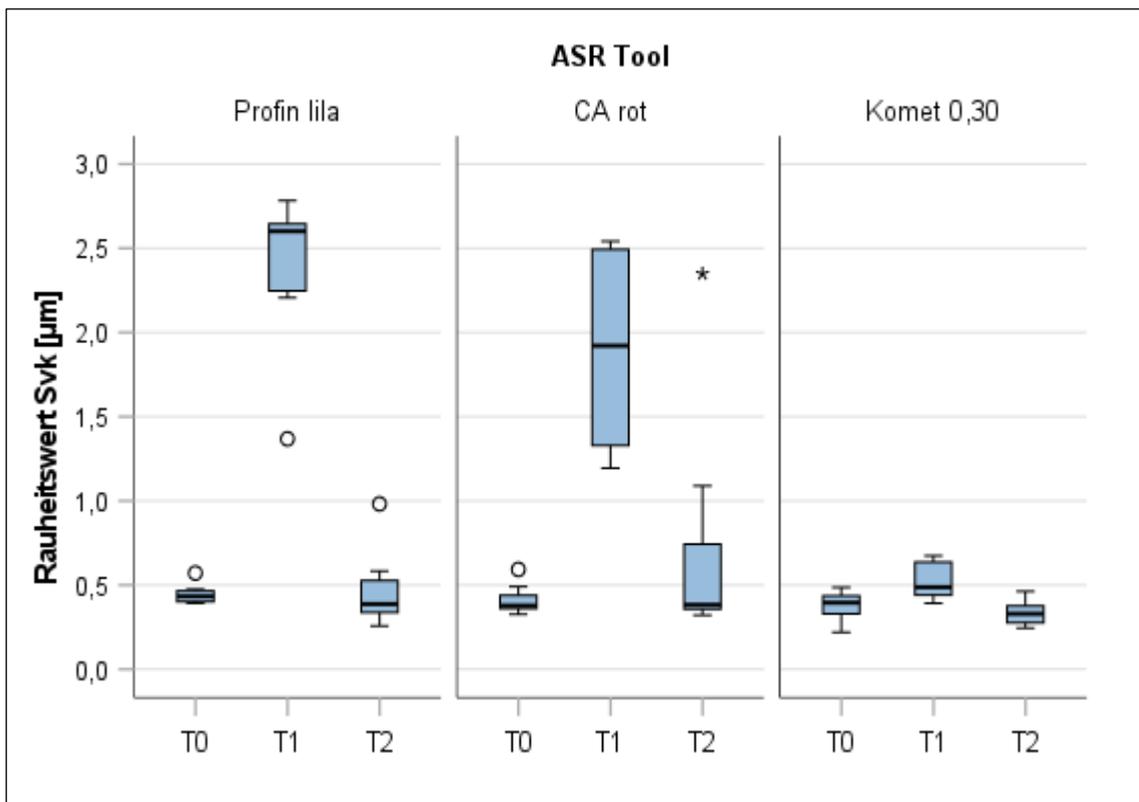


Abbildung 37: Boxplot-Darstellung des Rauheitsparameters Svk in Abhängigkeit vom verwendeten ASR-Instrument zu den Zeitpunkten T0, T1 und T2, Grafik von Ulrike von Hehn.

Die Differenz des Rauheitsparameters Svk zwischen den verschiedenen Zeitpunkten T0, T1 und T2 ist in Tabelle 19 dargestellt. Die reduzierte Talhöhe (Svk) erhöhte sich bei T1 bei Profin lila um 1,947 µm, bei CA rot um 1,494 µm und bei Komet 030 um 0,146 µm ($p \leq 0,001$).

		Deskriptive Statistik							
		N	Mean	Std. Deviation	Minimum	Maximum	Percentiles		
							25th	50th (Median)	75th
Profin lila	Diff. Rauheitswert Svk T1-T0 [µm]	8	1,9466	0,51369	0,80	2,38	1,7643	2,1798	2,2408
	Diff. Rauheitswert Svk T2-T0 [µm]	8	0,0219	0,25603	-0,23	0,57	-0,1390	-0,0789	0,1567
	Diff. Rauheitswert Svk T2-T1 [µm]	8	-1,9247	0,43550	-2,37	-1,02	-2,2506	-2,0358	-1,7063
CA rot	Diff. Rauheitswert Svk T1-T0 [µm]	8	1,4938	0,56957	0,81	2,21	0,9075	1,4963	2,0732
	Diff. Rauheitswert Svk T2-T0 [µm]	8	0,2953	0,70033	-0,15	1,96	-0,0458	0,0187	0,3885
	Diff. Rauheitswert Svk T2-T1 [µm]	8	-1,1985	1,04717	-2,15	1,10	-2,0532	-1,3183	-0,9147
Komet 0,30	Diff. Rauheitswert Svk T1-T0 [µm]	8	0,1459	0,12739	0,00	0,38	0,0410	0,1276	0,2224
	Diff. Rauheitswert Svk T2-T0 [µm]	8	-0,0443	0,11341	-0,15	0,12	-0,1285	-0,1131	0,0831
	Diff. Rauheitswert Svk T2-T1 [µm]	8	-0,1902	0,06385	-0,32	-0,13	-0,2380	-0,1645	-0,1494

Tabelle 19: Deskriptive Statistik – Differenz der Rauheitsparameter Svk für die Messungen an Frontzähnen

Das Komet-System führt demnach zu einer signifikant geringeren Vertiefung unterhalb des Kernbereichs der Oberfläche und folglich zu einer geringeren potenziellen Flüssigkeitsansammlung im Bereich der Täler.

Ergebnisse

5.2.3 Ergebnisse der qualitative Auswertung mit dem ESI-Score

Die Ergebnisse des ESI-Scores wurden rein explorativ ausgewertet. Für die Prämolaren ergab sich ein ESI-Score von 1 für das CA grau (Mittelwert ESI-Score Fläche 0,88, Mittelwert ESI-Score Randbereich 1,13), einen ESI-Score von 0,63 für das Komet 045 (Mittelwert ESI-Score Fläche 1, Mittelwert ESI-Score Randbereich 0,25) und ein Mittelwert von 1,32 für das Profin rot (Mittelwert ESI-Score Fläche 2, Mittelwert ESI-Score Randbereich 0,63). Die Mittelwerte sind in Tabelle 20 dargestellt.

	Mittelwert ESI-Score von CA grau.	Mittelwert ESI-Score von Komet 045	Mittelwert ESI-Score von Profin rot
Mittelwert ESI-Score - Fläche	0,88	1	2
Mittelwert ESI-Score - Randbereich	1,13	0,25	0,63
Mittelwert ESI-Score	1	0,63	1,32

Tabelle 20: Mittelwerte der ESI-Scores für die Prämolarengruppe nach Auswertung der rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen in tabellarischer Form, Aufschlüsselung der ESI-Scores im Bereich der Fläche und im Randbereich

Die Beurteilung des ESI-Scores auf der Fläche ergab, dass das Komet-System an allen Flächen einen Score von 1 zeigte. Beim ASR-Instrument CA grau zeigten 50 % der Flächen einen Score von 1 und bei 37,5 % einen Score von 0. Jedoch zeigten 12,5 % der Schmelzoberflächen von CA grau einen Score von 3 auf der Fläche. Profin rot zeigte von allen Systemen am häufigsten Score 3 (37,5 %), genauso häufig einen Score 1 (37,5 %) und zu 25,0 % einen Score von 2. Die Ergebnisse sind in Abbildung 38 dargestellt.

Die Auswertung des ESI-Scores der Prüfgruppe Prämolaren im Randbereich ergab, dass keine der drei ASR-Tools nach der Politur einen Score von 3 oder 4 erfüllte. Das Komet-System erreichte bei 75 % der Flächen einen Score von 0, bei 25 % einen Score von 1. Das CA-System und das Profin-System erreichten am häufigsten einen Score von 1 (62,50 %). Das CA-grau Instrument erreichte als einziges Instrument im Randbereich einen Score von 2 (25 %) und zu 12,5 % einen Score von 0. Das Profin rot System erreichte zu 37,5 % einen Score von 0. Die Ergebnisse sind in Abbildung 39 dargestellt.

Ergebnisse

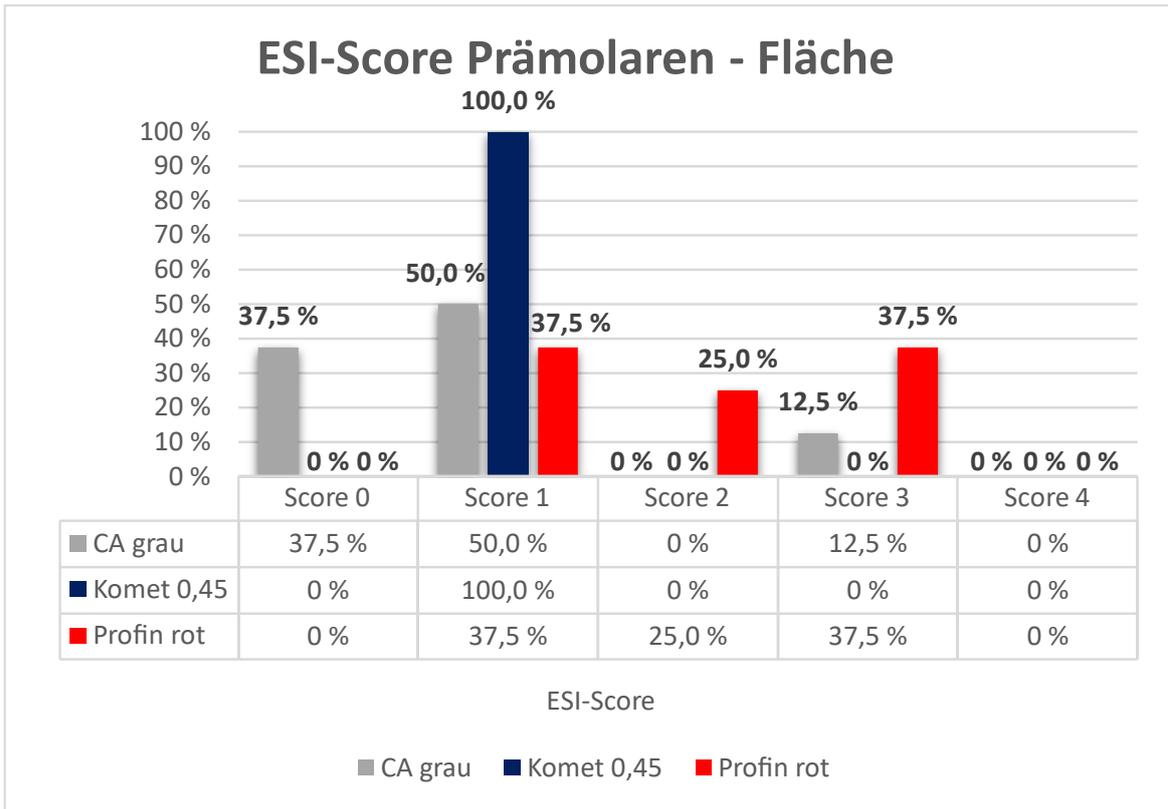


Abbildung 38: Ergebnisse des ESI-Score für die Prüfgruppe Prämolaren nach Auswertung der rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen in % im Bereich der Fläche, eigene Grafik.

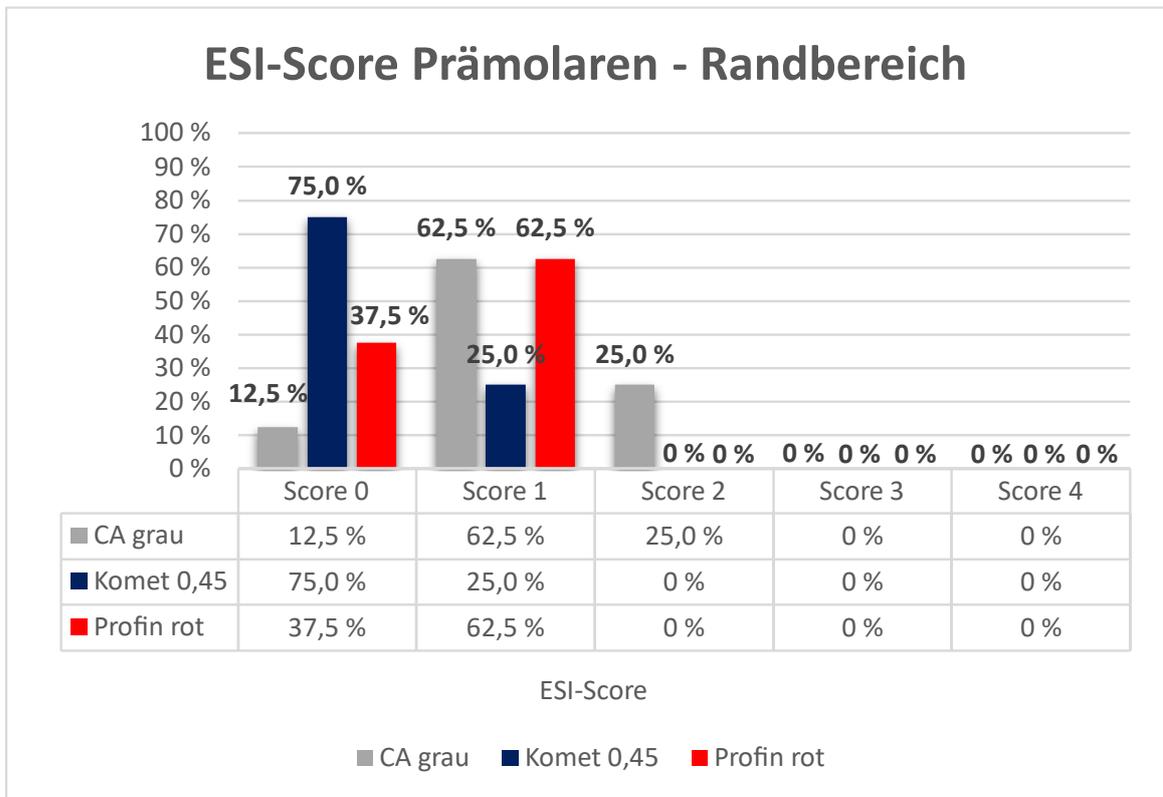


Abbildung 39: Ergebnisse des ESI-Score für die Prüfgruppe Prämolaren nach Auswertung der rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen in % im Randbereich, eigene Grafik.

Ergebnisse

Für die Frontzähne ergab sich ein ESI-Score von 1,25 für das CA rot (Mittelwert ESI-Score Fläche 1,5, Mittelwert ESI-Score Randbereich 1), einen ESI-Score von 0,69 für das Komet 030 (Mittelwert ESI-Score Fläche 0,63, Mittelwert ESI-Score Randbereich 0,75) und ein Mittelwert von 1,13 für das Profin lila (Mittelwert ESI-Score Fläche 0,75, Mittelwert ESI-Score Randbereich 1,5). Die Mittelwerte sind in Tabelle 21 dargestellt.

	Mittelwert ESI-Score von CA rot	Mittelwert ESI-Score von Komet 030	Mittelwert ESI-Score von Profin lila
Mittelwert ESI-Score - Fläche	1,5	0,63	0,75
Mittelwert ESI-Score - Randbereich	1	0,75	1,5
Mittelwert ESI-Score	1,25	0,69	1,13

Tabelle 21: Mittelwerte der ESI-Scores für die Frontzahngruppe nach Auswertung der rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen in tabellarischer Form, Aufschlüsselung der ESI-Scores im Bereich der Fläche und im Randbereich

Die Beurteilung des ESI-Scores auf der Fläche ergab, dass das Komet-System bei 62,5 % aller Flächen Score von 1 zeigte, bei 37,5 % einen Score von 0. Profin lila und CA rot zeigte von allen Systemen am häufigsten Score 3 (25 %). Die Ergebnisse sind in Abb. 40 dargestellt.

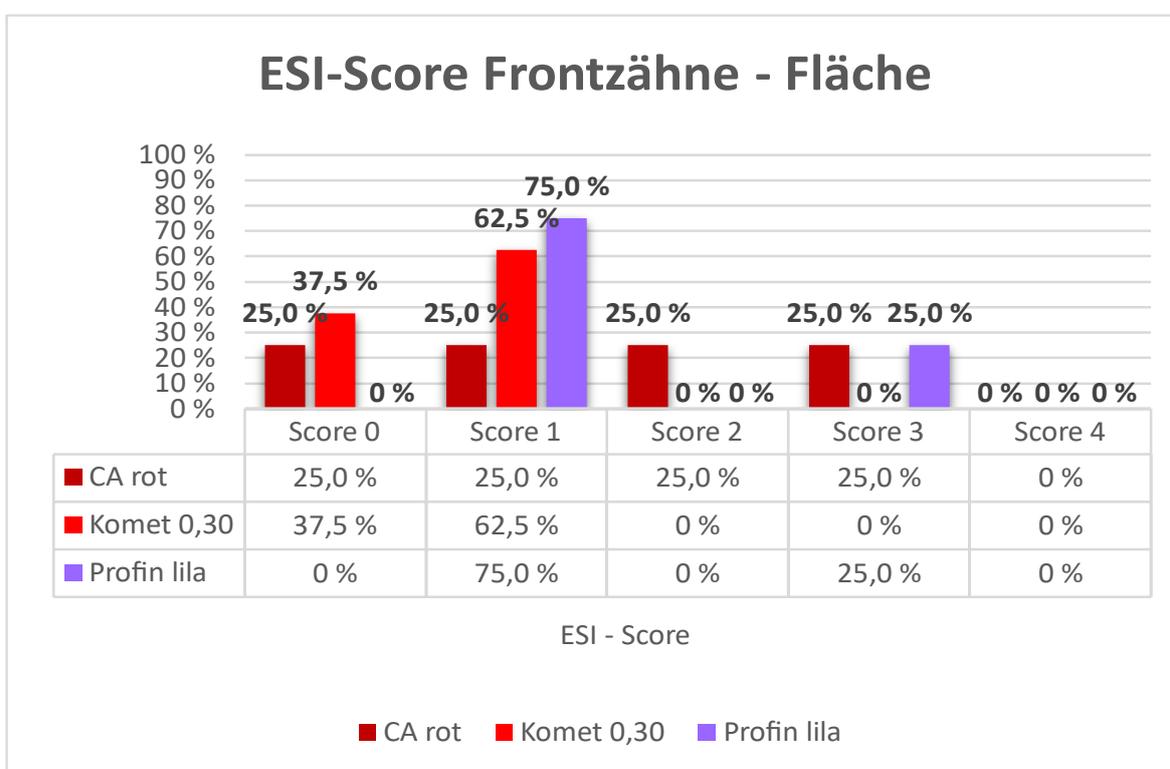


Abbildung 40: Ergebnisse des ESI-Score für die Prüfgruppe Frontzähne nach Auswertung der rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen in % im Bereich der Fläche, eigene Grafik.

Ergebnisse

Bei den Frontzähnen dominierten im Randbereich die Scores 0 und 1. Das Komet-System erreichte bei 25 % der Flächen Score 0, bei 75 % einen Score von 1. Das Profin-System und das CA-System erreichten bei 75 % Score 1 (75 %). Das CA rot zeigte im Randbereich vereinzelt einen Score von 3 (12,5 %). Die Ergebnisse sind in Abb. 41 dargestellt.

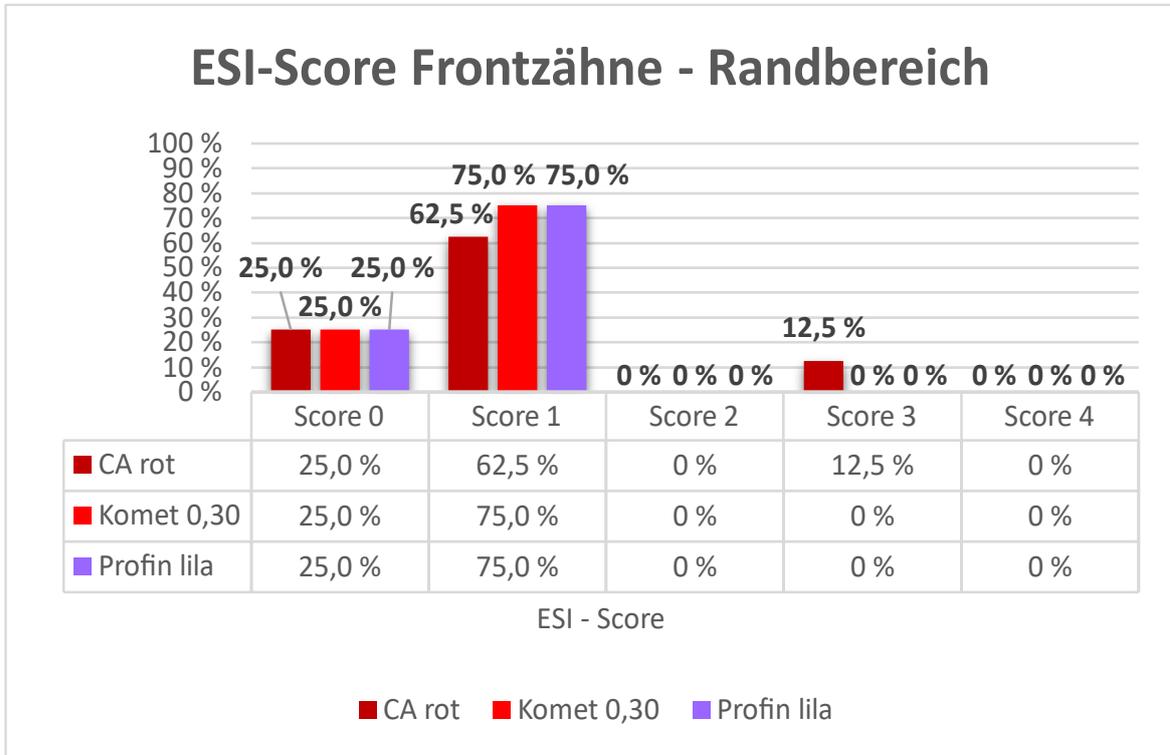
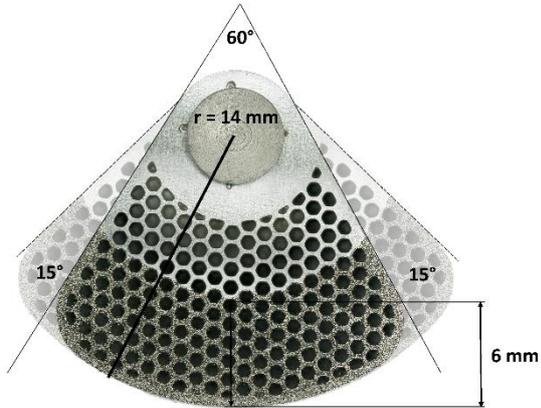


Abbildung 41: Ergebnisse des ESI-Score für die Prüfgruppe Frontzähne nach Auswertung der rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen in % im Randbereich, eigene Grafik.

Ergebnisse

Berechnung des Schleifweges



$$\varphi = \frac{2\pi}{360^\circ} \cdot \alpha$$

bei $\alpha = 30^\circ$

$$\varphi = \frac{2\pi}{360^\circ} \cdot 30^\circ$$

$$\varphi = 0,52$$

$$s = \varphi \cdot r$$

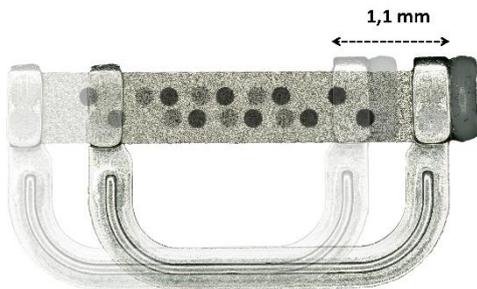
$$s = 14 \cdot 0,52$$

$$s = 2,8 \text{ mm}$$

40 000 U/ min bei 8:1 Untersetzung: 5 000 U/min

$$5\,000 \cdot 2,8 = 14\,000 \text{ mm/min}$$

bei 2,5 min 35 000 mm
bei 5,0 min 70 000 mm

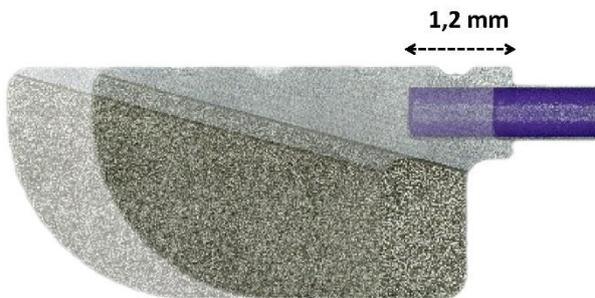


Hub 1,1 mm
12 000 U/min

Untersetzung 2,4:1
5 000 Hübe bei Hub 1,1 mm

$$5\,500 \text{ mm/min}$$

bei 2,5 min 13 750 mm
bei 5,0 min 27 500 mm



Hub 1,2 mm
8 000 U/min

8 000 Hübe à 1,2 mm

$$9\,600 \text{ mm/min}$$

bei 2,5 min 24 000 mm
bei 5,0 min 48 000 mm

Abbildung 42: Berechnung des Schleifweges für die verschiedenen Systeme zur approximalen Schmelzreduktion; eigene Aufnahmen mit dem Keyence, Bewegungseffekte mithilfe von Adobe Photoshop

5.3 Ergebnisse der Verschleißmessungen

5.3.1 Qualitative und quantitative Auswertung des ASR-Instruments Profin Iila zur Ermittlung des Verschleißverhaltens

In Abb. 43 sind die Auswertung der Rauheitsparameter S_a , S_q , S_{dq} und S_{pk} grafisch dargestellt. Bei der Topografie 4 sieht man bei qualitativer Auswertung eine deutliche Veränderung des S_a -Wertes bei T1 und T2. Ebenfalls ist das für die Parameter S_q bei T1 und T2 zu sehen. Der quadratische Mittelwert der Steigungen S_{dq} -Wert zeigt ebenfalls im Bereich der Topografie 4 eine deutliche Reduktion. Der Wert S_{pk} nimmt graduell von T0 bis T2 im Bereich aller Topografien ab.

In Abb. 45 ist die Methodik der qualitativen Untersuchung der Topografien am Beispiel der Topografie 4 dargestellt. In Abb. 44 ist die qualitative Untersuchung der verschiedenen Topografien grafisch dargestellt. Bei dem untersuchten Profin ASR-Instrument gab es im Bereich der Topografie 4 einen erhöhten Verlust von Partikeln und Makrochipping bei T1 und T2. Der Verlust der Partikel war bereits bei T1 erkennbar. Dieses Phänomen tritt bei T1 und folglich nach einem Schleifweg (Berechnung siehe Abb. 42) von 24 m auf. Bei T2 (48 m) nimmt das Phänomen nicht zu. Das spricht dafür, dass es bereits bei den ersten Anwendungen zum Verlust von Partikeln kam. Die Topografie 4 liegt im Zentrum des verwendeten ASR-Instruments. In Abb. 46 sind die rasterelektronenmikroskopischen Übersichtsaufnahmen für T0, T1 und T2 dargestellt.

Ergebnisse

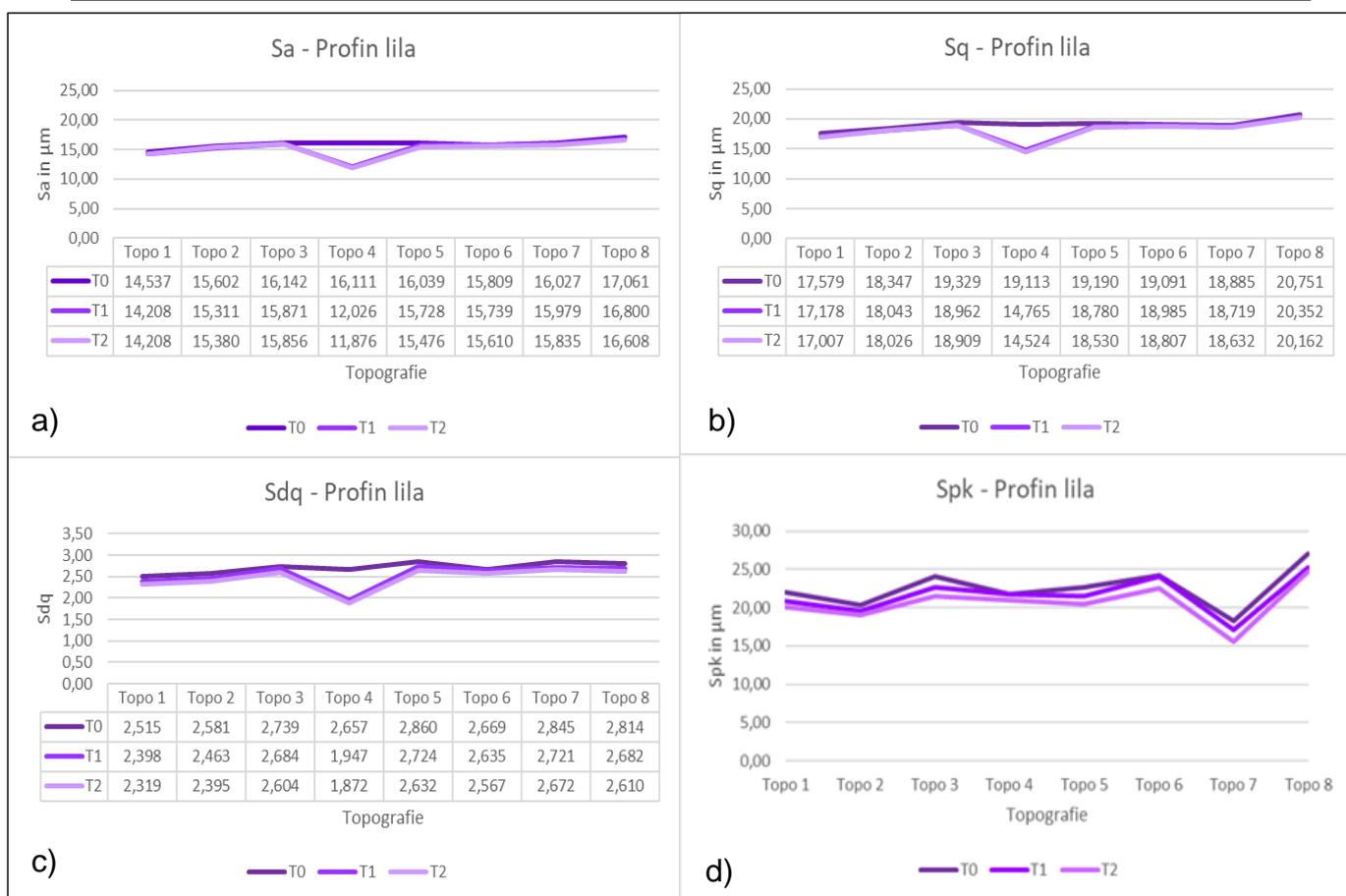


Abbildung 43 a-d: grafische Darstellung der Rauheitsparameter a) Sa, b) Sq, c) Sdq und d) Spk für acht zufällig verteilte Topografien des ASR-Instrumentes Profin lila zu den Zeitpunkten T0, T1 und T2, eigene Grafik.

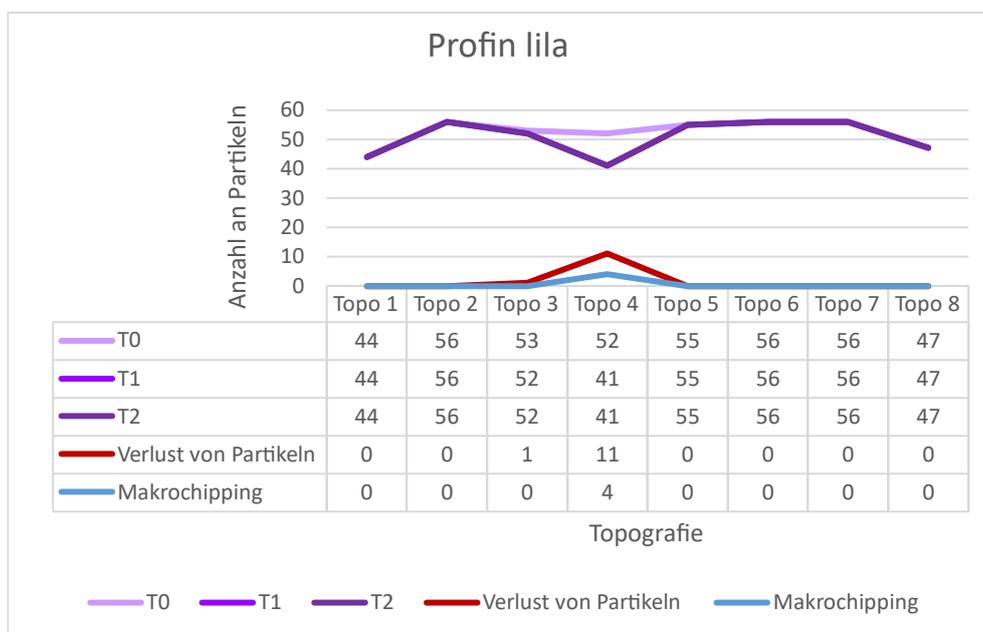


Abbildung 44: qualitative Untersuchung des ASR-Instrumentes Profin lila. Die obere Kurve zeigt die Anzahl der Partikel zu T0, T1 und T2, die unteren Kurven zeigen den Verlust der Partikel und Makrochipping zu T0, T1 und T2, eigene Grafik.

Ergebnisse

Qualitative Untersuchung des Verschleißes am Beispiel von Topografie 4 von Profin lila

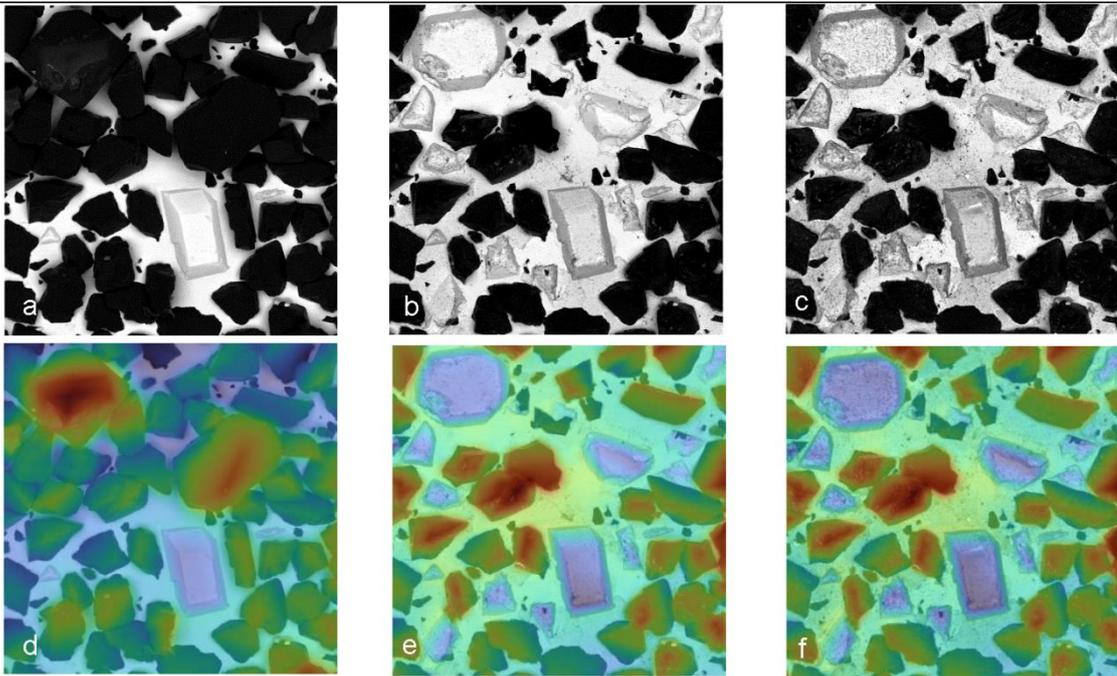
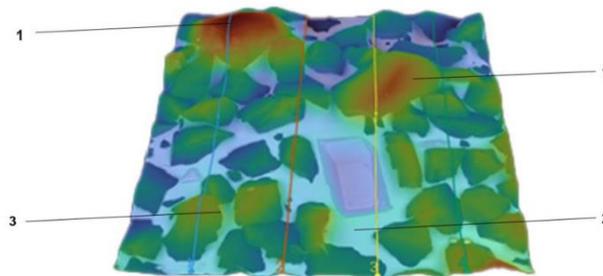
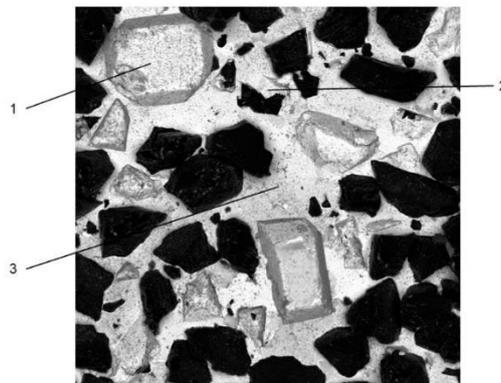


Abb. 45 a-f): originale rasterelektronenmikroskopische Aufnahme von Topografie 4 zu a) T0, b) T1 und c) T2, Falschfarbendarstellung der gleichen Aufnahme zu e) T0, f) T1 und g) T2.



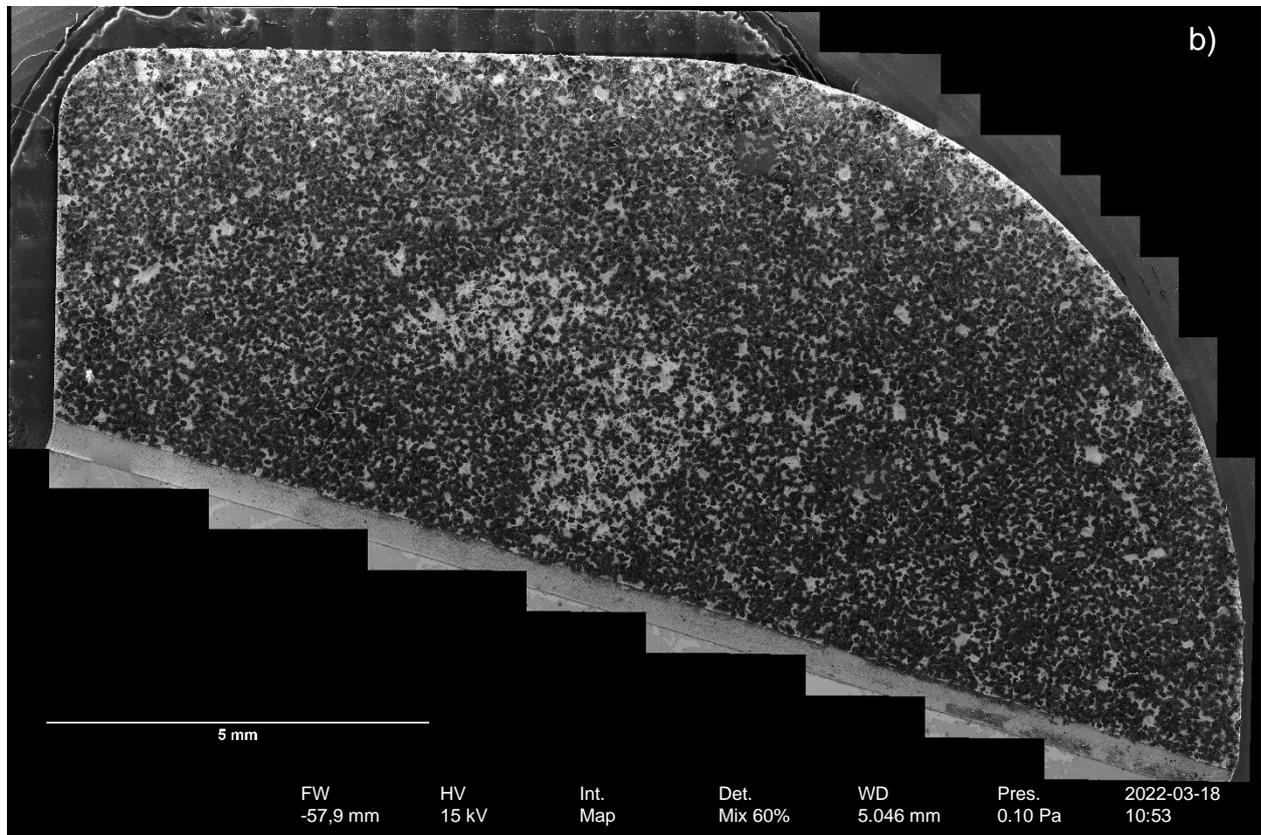
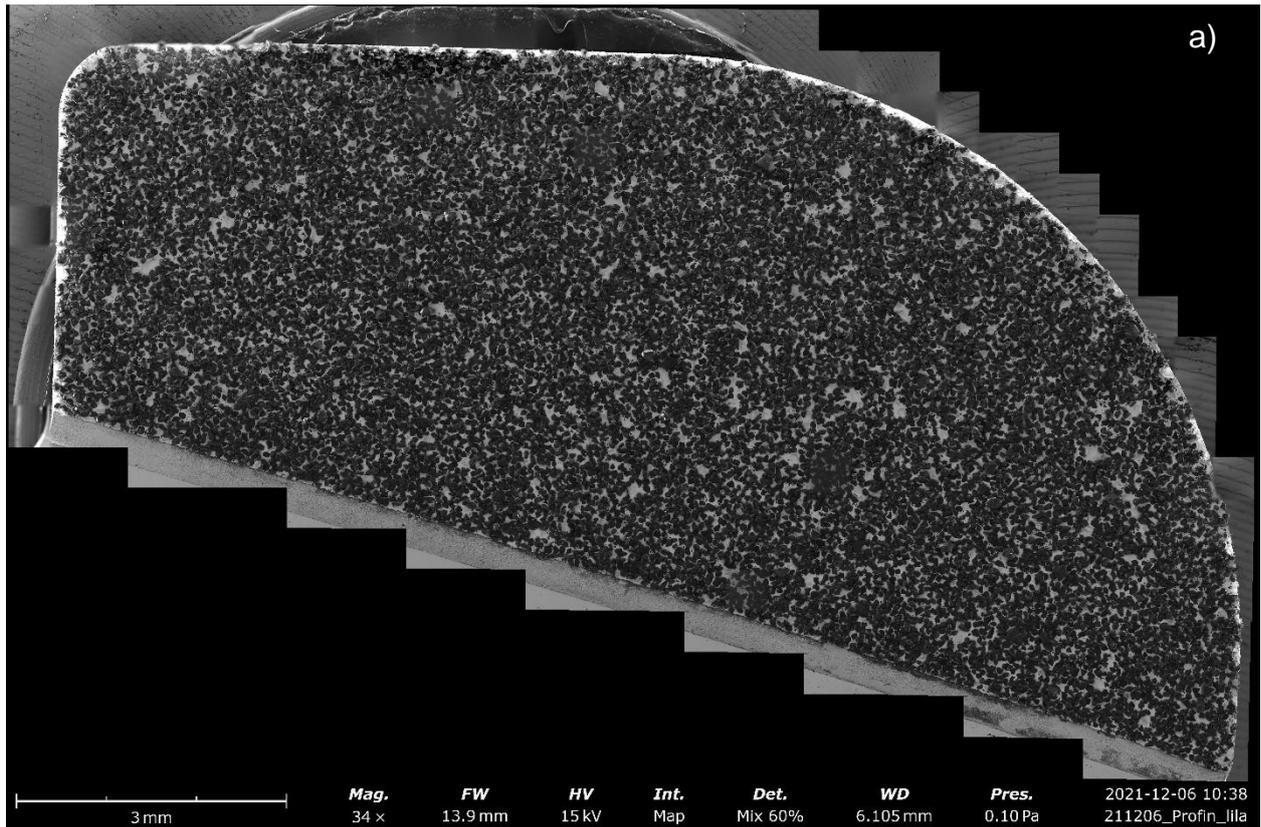
g) Detailaufnahme der Grundbausteine des Abrasivs: 1. Diamantpartikel, 2. Basis 3. Bonding



h) Detailaufnahme der Topografie 4 zu T2: 1) Verlusts eines Diamantpartikels, 2) Makrochipping und 3) Mikrochipping

Abbildung 45: qualitative Untersuchung des Verschleißes am Beispiel von Topografie 4 von Profin lila, eigene Aufnahmen mit dem Phenom XL.

Ergebnisse



Ergebnisse

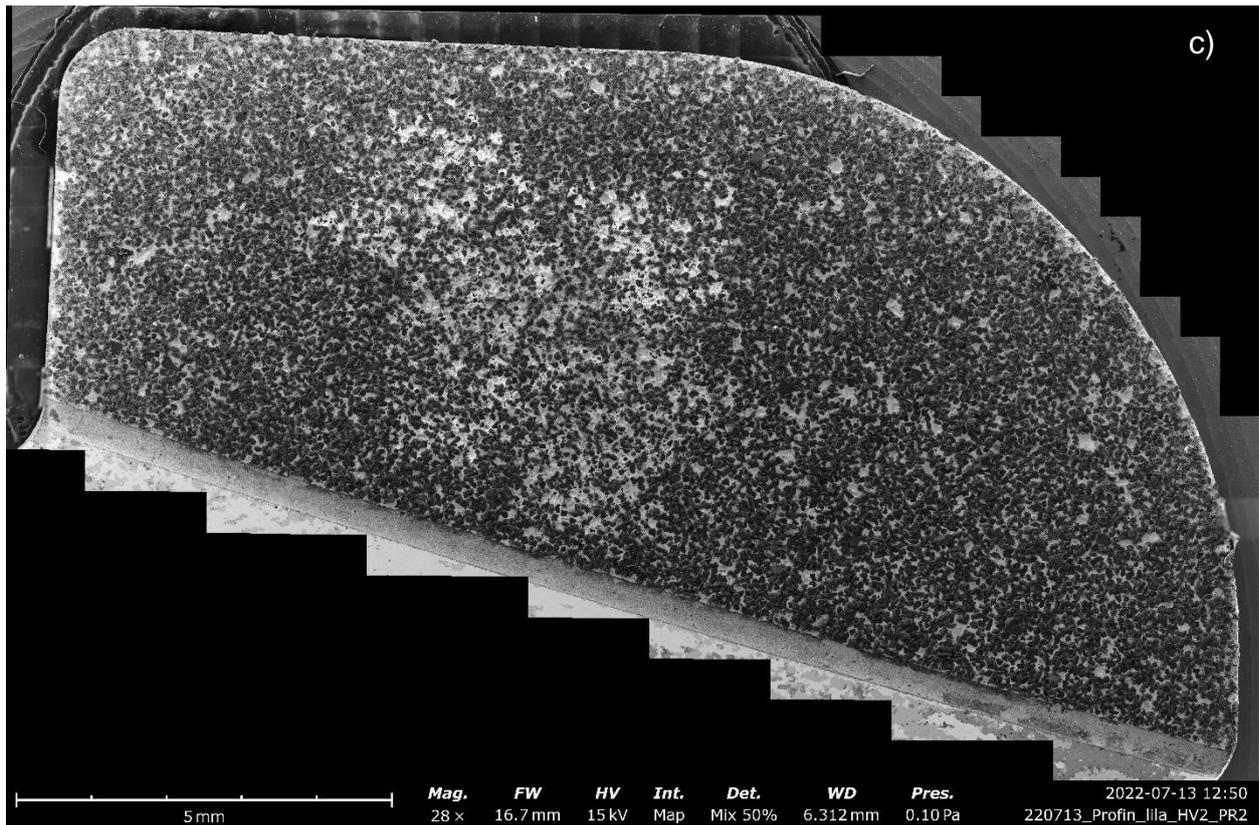


Abbildung 46 a-c): a) rasterelektronenmikroskopische Übersichtsaufnahmen des Instruments Profin lila zu a) T0, b) T1 und c) T2; bei Abb. 46 b) musste die Scale-Bar mit ImageJ konstruiert werden aufgrund eines Softwarefehlers des Phenom XL, eigene Aufnahmen.

5.3.2 Qualitative und quantitative Auswertung des ASR-Instruments CA grau zur Ermittlung des Verschleißverhaltens.

In Abb. 47 sind die Auswertung der Rauheitsparameter Sa, Sq, Sdr und Spk grafisch dargestellt. Im Bereich der Topografien 3 bis 5 sieht man eine deutliche Veränderung des Sa-Wertes bei T1 und T2. Ebenfalls ist das für den Parameter Sq bei T1 und T2 zu sehen. Auch für den Wert Sdq, also den quadratischen Mittelwert der Steigungen, trifft dies zu. Der Prozess ist progredient bei T2 und damit bei einem Schleifweg von 27,5 m. Der Wert Spk, die reduzierte Spitzenhöhe, also die mittlere Höhe der herausragenden Spitzen über dem Kernbereich, nahm zu. Das könnte für die Veränderung des Kernbereichs (Matrix) sprechen. Eine Veränderung des Kernbereichs kann durch die Ansammlung von Debris oder eine Verletzung der Matrix entstehen. In Abb. 48 ist die qualitative Auswertung dargestellt. Nach dem Schleifweg von 13,75 m kommt es zu ersten Verschleißanzeichen, der Verlust der Partikel und Makrochipping dominieren. In Abb. 49 und 50 sieht man die rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen der Topografien 4 und 5 bei T0, T1 und T2. In beiden Topografien sieht man neben Makrochipping und dem Verlust von Partikeln auch eine Verletzung der Matrix.

In Abb. 51 sind die rasterelektronenmikroskopischen Übersichtsaufnahmen für T0, T1 und T2 dargestellt. In einem Ausschnitt dieser Übersichtsaufnahme sieht man eine Flowing-Chip, die einen weiteren Hinweis auf eine Verletzung der Matrix gibt (Abb. 52).

Ergebnisse

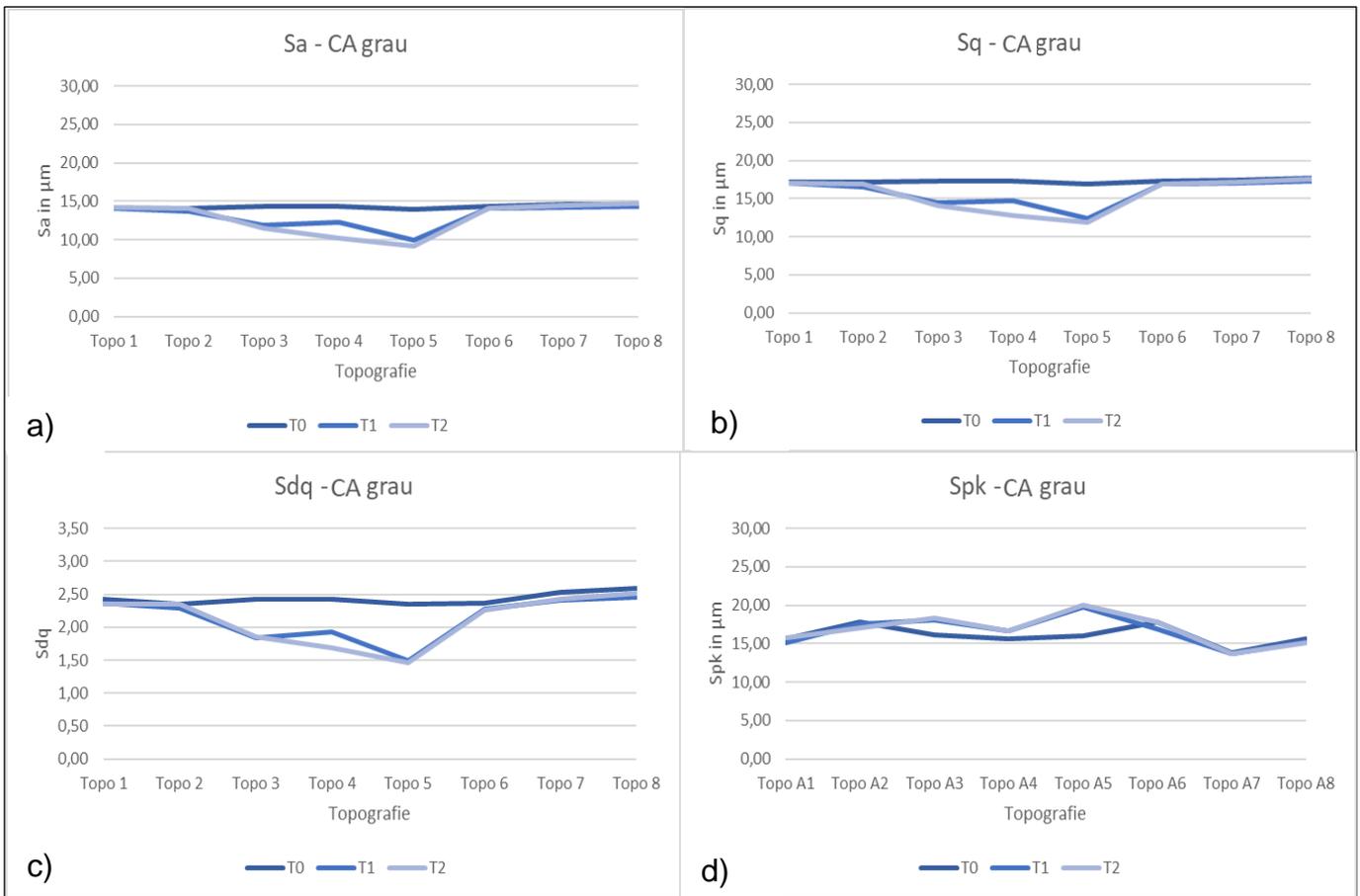


Abbildung 47 a-d: grafische Darstellung der Rauheitsparameter a) Sa, b) Sq, c) Sdq und d) Spk für acht zufällig verteilte Topografien des ASR-Instrumentes Profin lila zu den Zeitpunkten T0, T1 und T2, eigene Grafik.

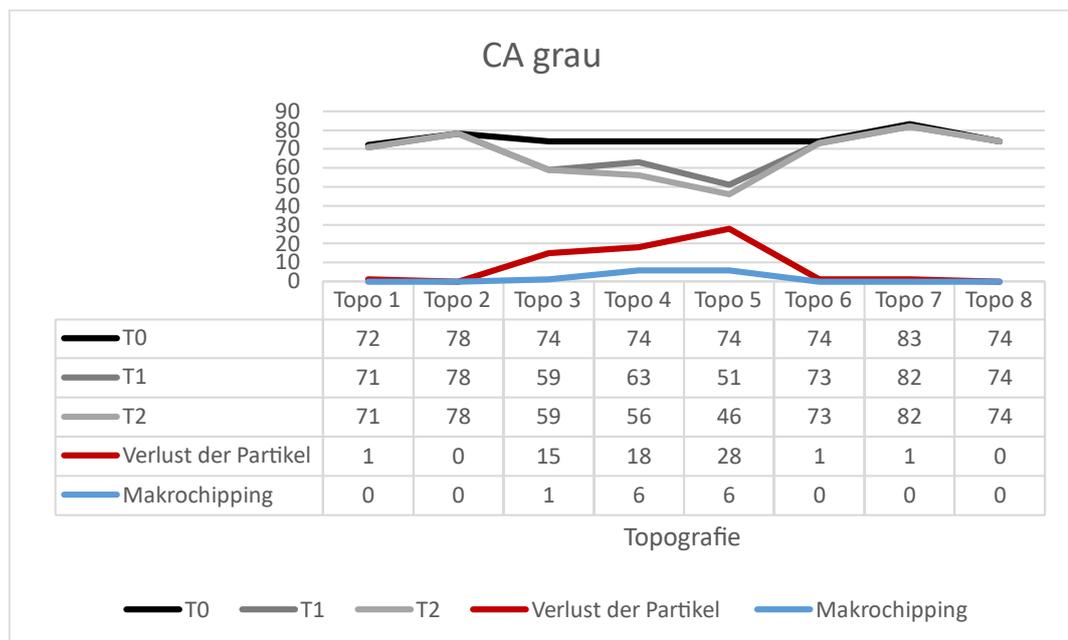


Abbildung 48: qualitative Untersuchung des ASR-Instrumentes CA grau. Die obere Kurve zeigt die Anzahl der Partikel zu T0, T1 und T2. Die unteren Kurven zeigen den Verlust der Partikel und Makrochipping zu T0, T1 und T2, eigene Grafik.

Ergebnisse

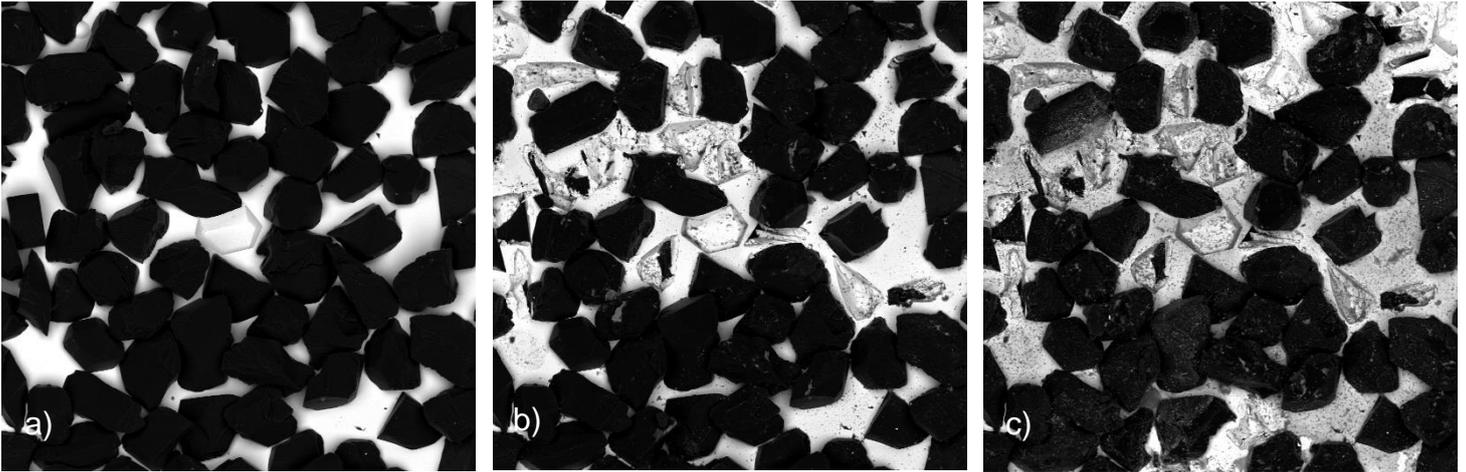


Abbildung 49 a-c: rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen zeigen den progredienten Verschleiß in Topografie 4 zu a) T0, b) T1 und c) T2. Sichtbar ist der Verlust von Partikeln, Makrochipping und Mikrochipping, eigene Aufnahmen mit dem Phenom XL.

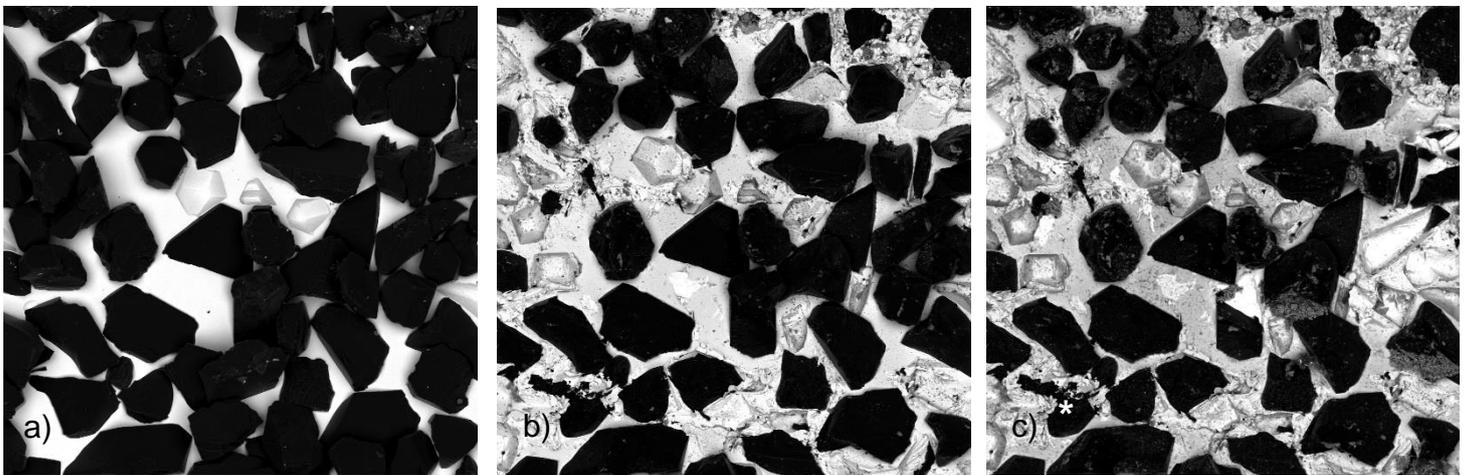


Abbildung 50 a-c: rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen zeigen den progredienten Verschleiß im Bereich der Topografie 5 zu a) T0, b) T1 und c) T2. Sichtbar ist der Verlust von Partikeln, Makrochipping und Mikrochipping. Außerdem sieht man eine Verletzung der Klebebasis (*) und folglich der Matrix des Abrasivs, eigene Aufnahmen mit dem Phenom XL.

Ergebnisse

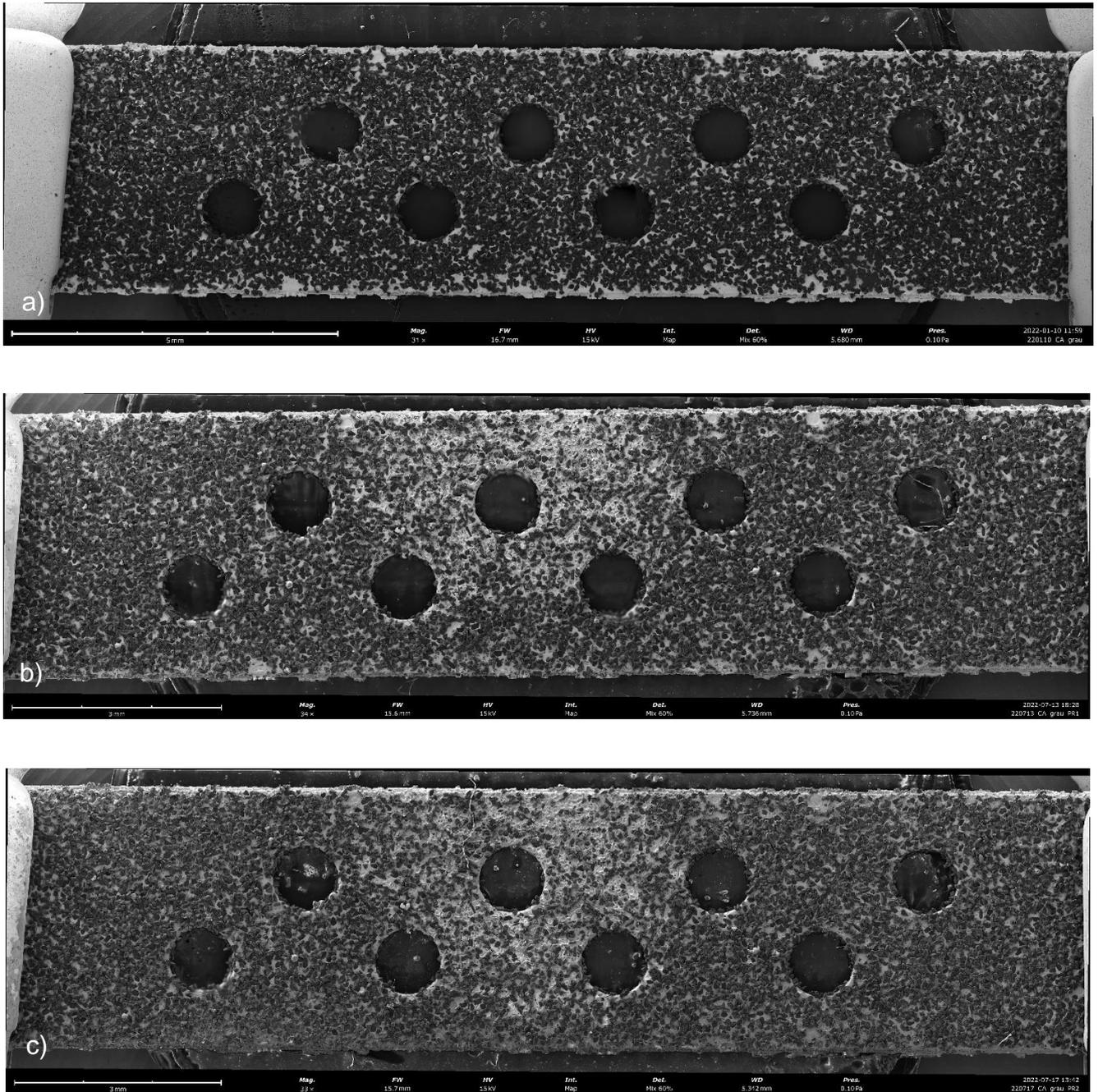


Abbildung 51 a-c: a) rasterelektronenmikroskopische Übersichtsaufnahme des ASR-Instruments CA grau zu a) T0, b) T1 und c) T2, eigene Aufnahmen mit dem Phenom XL.

Ergebnisse

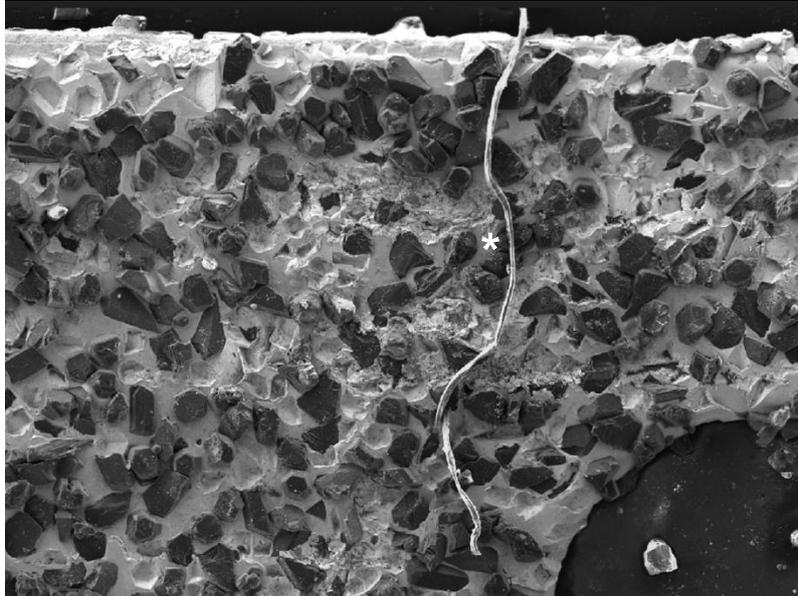


Abbildung 52: Detailausschnitt von CA grau bei T2 man sieht ein Flowing Chip (*). Dieser entsteht durch die plastische Verformung der Matrix des Abrasivs mit Herauslösen der Basis, eigene Aufnahme mit dem Phenom XL.

5.3.3 Qualitative und quantitative Auswertung des ASR-Instruments CA rot zur Ermittlung des Verschleißverhaltens

In Abbildung 53 sind die Auswertung der Rauheitsparameter S_a , S_q , S_dq und S_{pk} grafisch dargestellt. Im Bereich der Topografien 4 bis 5 sieht man eine deutliche Veränderung des S_a -Wertes bei T1 und T2. Ebenfalls ist das für den Parameter S_q bei T1 und T2 zu sehen.

Auch für den Wert S_dq , also den quadratischen Mittelwert der Steigungen, trifft dies zu. Nach dem Schleifweg von 13,75 m kommt es zu ersten Verschleißanzeichen, der Verlust der Partikel und Makrochipping dominieren.

Der Prozess ist progredient bei T2 und damit einem Schleifweg von 27,5 m. Der Wert S_{pk} , die reduzierte Spitzenhöhe, also die mittlere Höhe der herausragenden Spitzen über dem Kernbereich, nahm zu.

In Abbildung 54 ist die qualitative Auswertung dargestellt. In Abbildung 55 sind die rasterelektronenmikroskopischen Übersichtsaufnahmen für T0, T1 und T2 dargestellt.

Ergebnisse

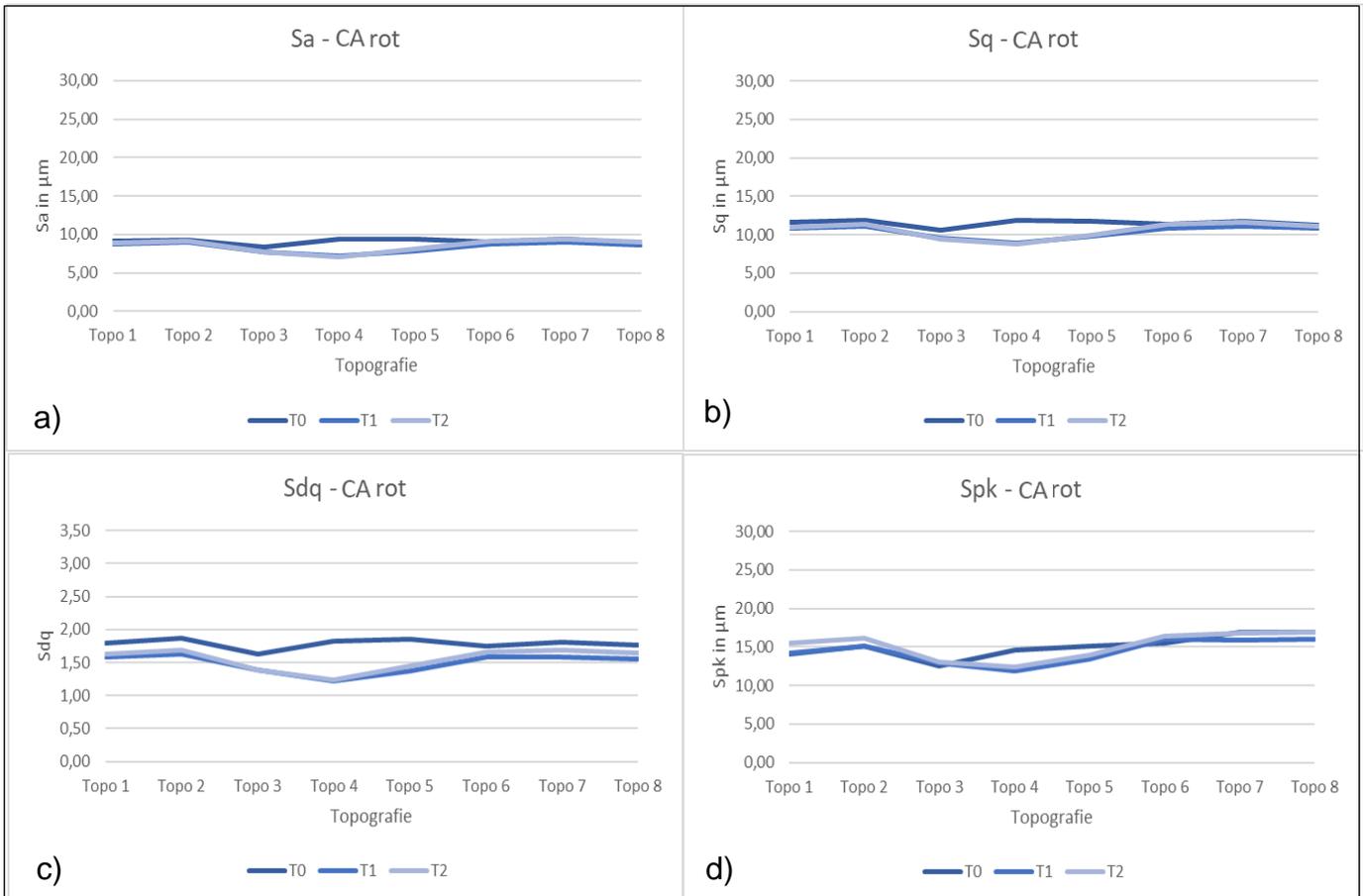


Abbildung 53 a-d: grafische Darstellung der Rauheitsparameter a) Sa, b) Sq, c) Sdq und d) Spk für acht zufällig verteilte Topografien des ASR-Instrumentes CA rot zu den Zeitpunkten T0, T1 und T2, eigene Grafik.

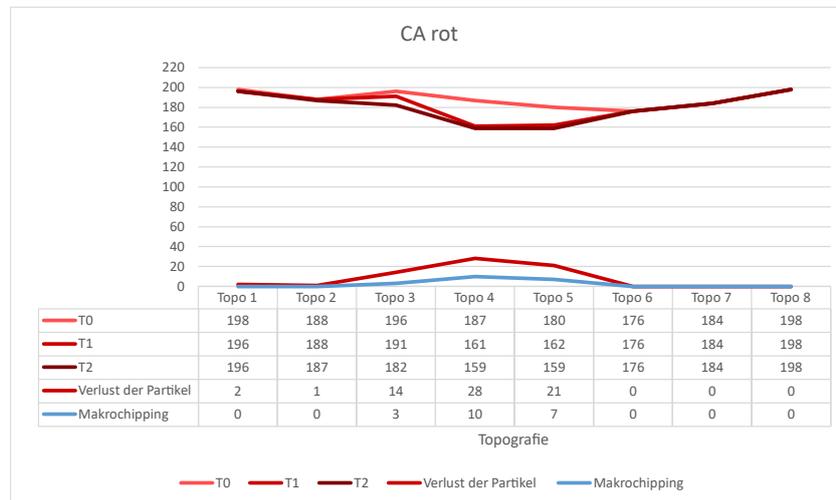


Abbildung 54: qualitative Untersuchung des ASR-Instrumentes CA rot, die obere Kurve zeigt die Anzahl der Partikel zu T0, T1 und T2. Die unteren Kurven zeigen den Verlust der Partikel und Makrochipping zu T0, T1 und T2, eigene Grafik.

Ergebnisse

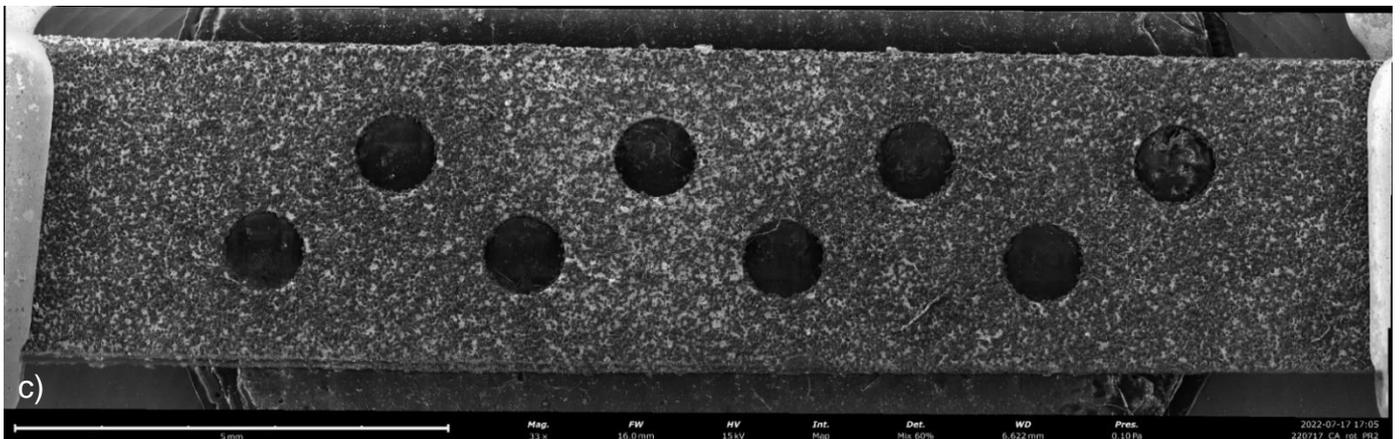
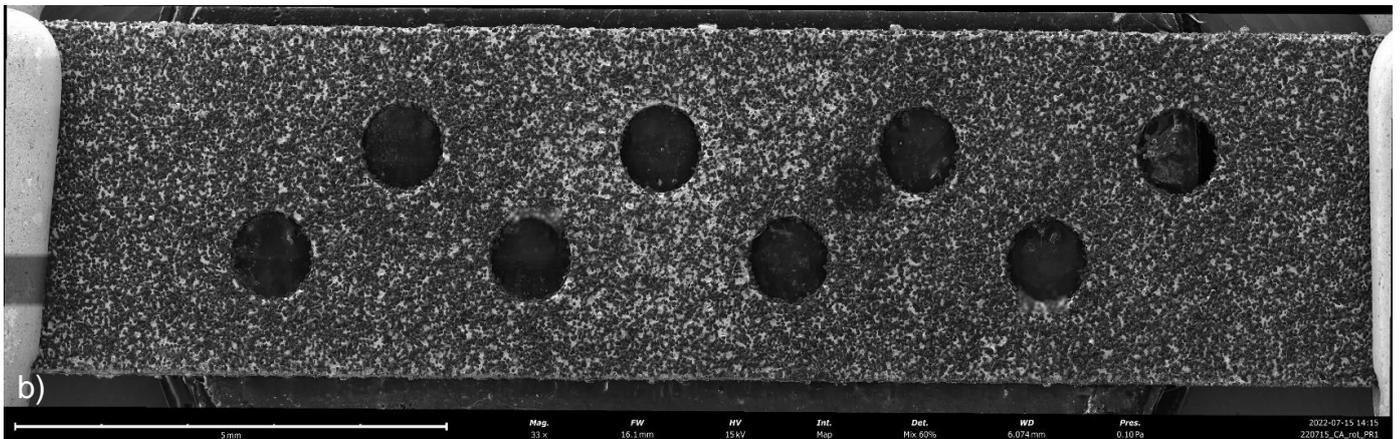
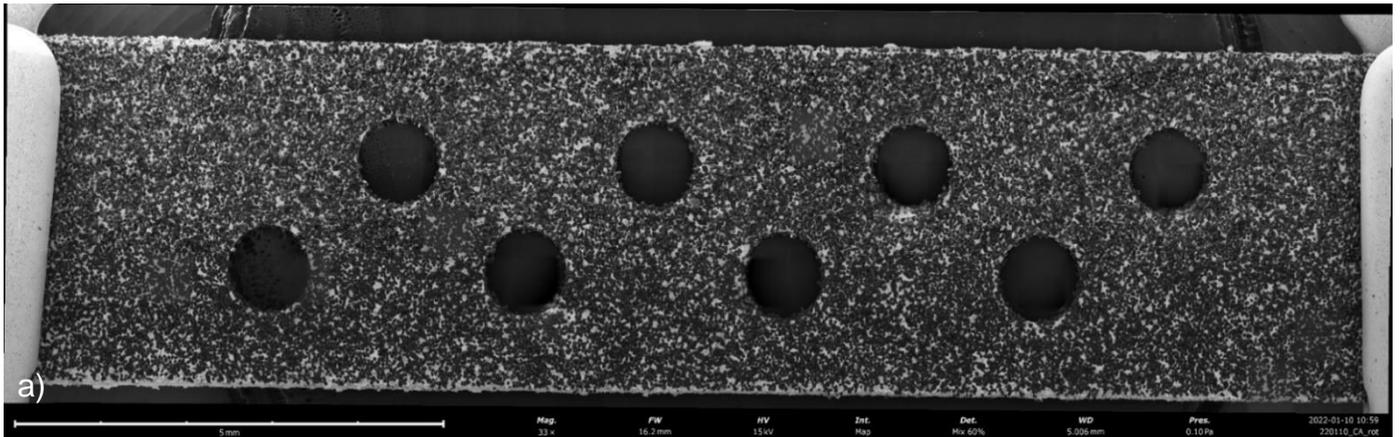


Abbildung 55 a-c): a) rasterelektronenmikroskopische Übersichtsaufnahme des ASR-Instruments CA rot zu a) T0, b) T1 und c) T2, eigene Aufnahmen mit dem Phenom XL.

Ergebnisse

5.3.4 Qualitative und quantitative Auswertung des ASR-Instruments Komet 025 blau zur Ermittlung des Verschleißverhaltens

In Abb. 56 ist die Auswertung der Rauheitsparameter Sa, Sq, Sdq und Spk grafisch dargestellt. Das Komet-System 025 zeigte kaum eine Veränderung der Rauheitsparameter Sa und Sq sowie lediglich eine graduelle Abnahme des Parameters Spk für einen Schleifweg von 35 m (T1) zu 70 m (T2). Lediglich der Rauheitsparameter Sdq und somit der quadratische Mittelwert der Steigungen kam es insbesondere im Bereich der Topografie 6 zu einer Abnahme des Rauheitsparameters. Dies könnte ein Hinweis für ein Abrunden der Abrasivpartikel sein.

Die Unterschiede der Rauheitsparameter in den unterschiedlichen Topografien und damit der Verlauf der Kurven begründen sich in unterschiedlich großen Messflächen aufgrund der Morphologie der Scheiben.

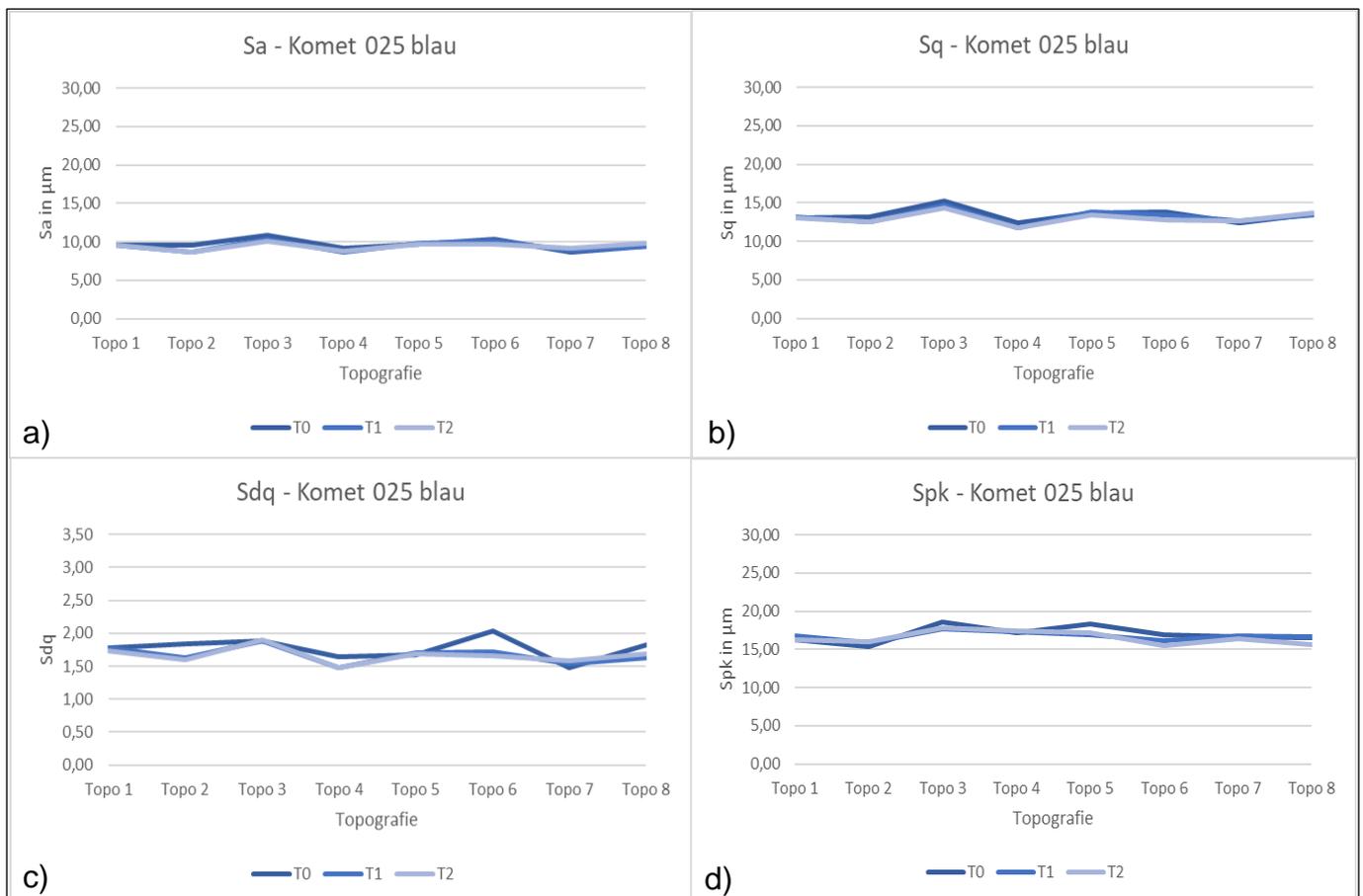


Abbildung 56 a-d: grafische Darstellung der Rauheitsparameter a) Sa, b) Sq, c) Sdq und d) Spk für acht zufällig verteilte Topografien des ASR-Instruments Komet 025 blau zu den Zeitpunkten T0, T1 und T2, eigene Grafik.

Ergebnisse

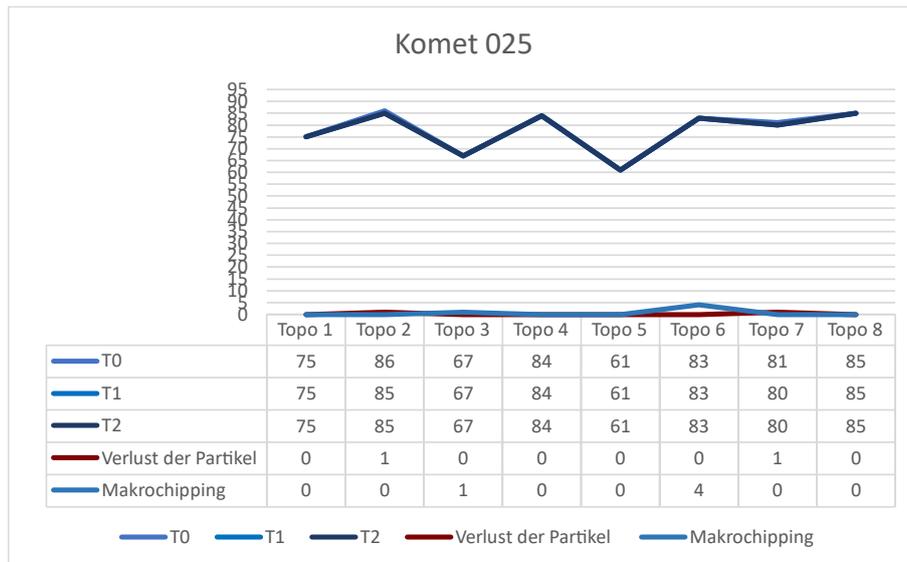


Abbildung 57: qualitative Untersuchung des ASR-Instrumentes Komet 025. Die obere Kurve zeigt die Anzahl der Partikel zu T0, T1 und T2. Die untere Kurven zeigen den Verlust der Partikel und Makrochipping zu T0, T1 und T2, eigene Grafik.

In Abb. 57 sieht man die qualitative Auswertung der rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen. Lediglich im Bereich Topo 6 kamen vereinzelt Verschleißzeichen in Form von Makrochipping vor. Ein Verlust von Partikel konnte nur insgesamt zweimal festgestellt werden. Mikrochipping war dominierend. Auch diese Beobachtung spricht für den Verschleiß der Komet 025 Scheibe durch Mikrochipping mit Abrundung der Diamantpartikel.

In Abbildung 58 sind die rasterelektronenmikroskopischen Übersichtsaufnahmen für T0, T1 und T2 dargestellt.

Ergebnisse

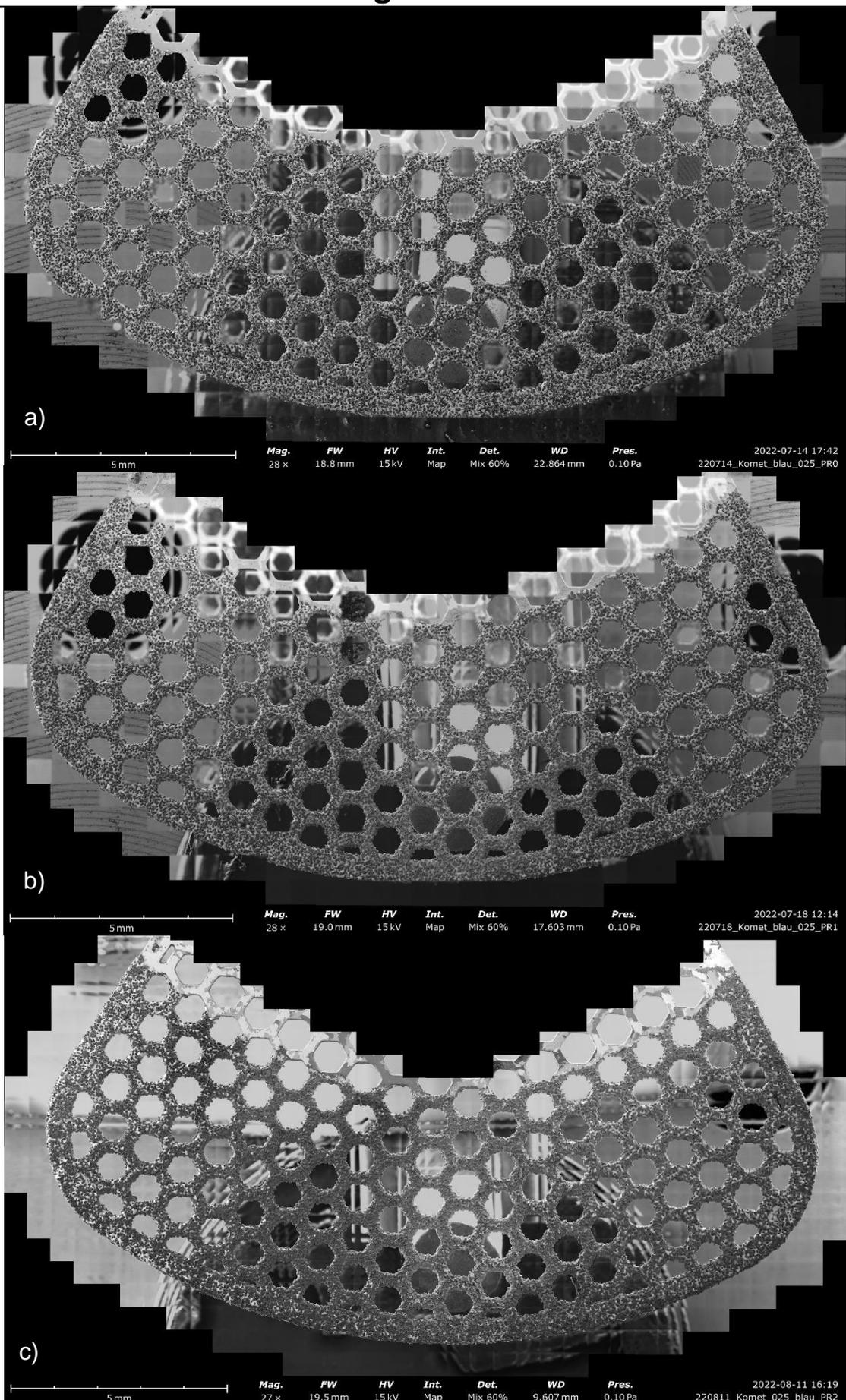


Abbildung 58 a-c: rasterelektronenmikroskopische Übersichtsaufnahme des ASR-Instruments Komet 025 zu a) T0, b) T1 und c) T2, eigene Aufnahmen mit dem Phenom XL.

Ergebnisse

5.3.5 Qualitative und quantitative Auswertung des ASR-Instruments Komet 020 rot zur Ermittlung des Verschleißverhaltens

In Abb. 59 ist die Auswertung der Rauheitsparameter Sa, Sq, Sdq und Spk grafisch dargestellt. Auch das Komet-System mit 020 zeigte für die Rauheitsparameter Sa, Sq und Spk kaum Veränderungen und eine graduelle Abnahme des Rauheitsparameter Sdq.

Auch hier unterschieden sich die Rauheitsparameter in den verschiedenen Topografien aufgrund der unterschiedlichen Größe der Messfläche.

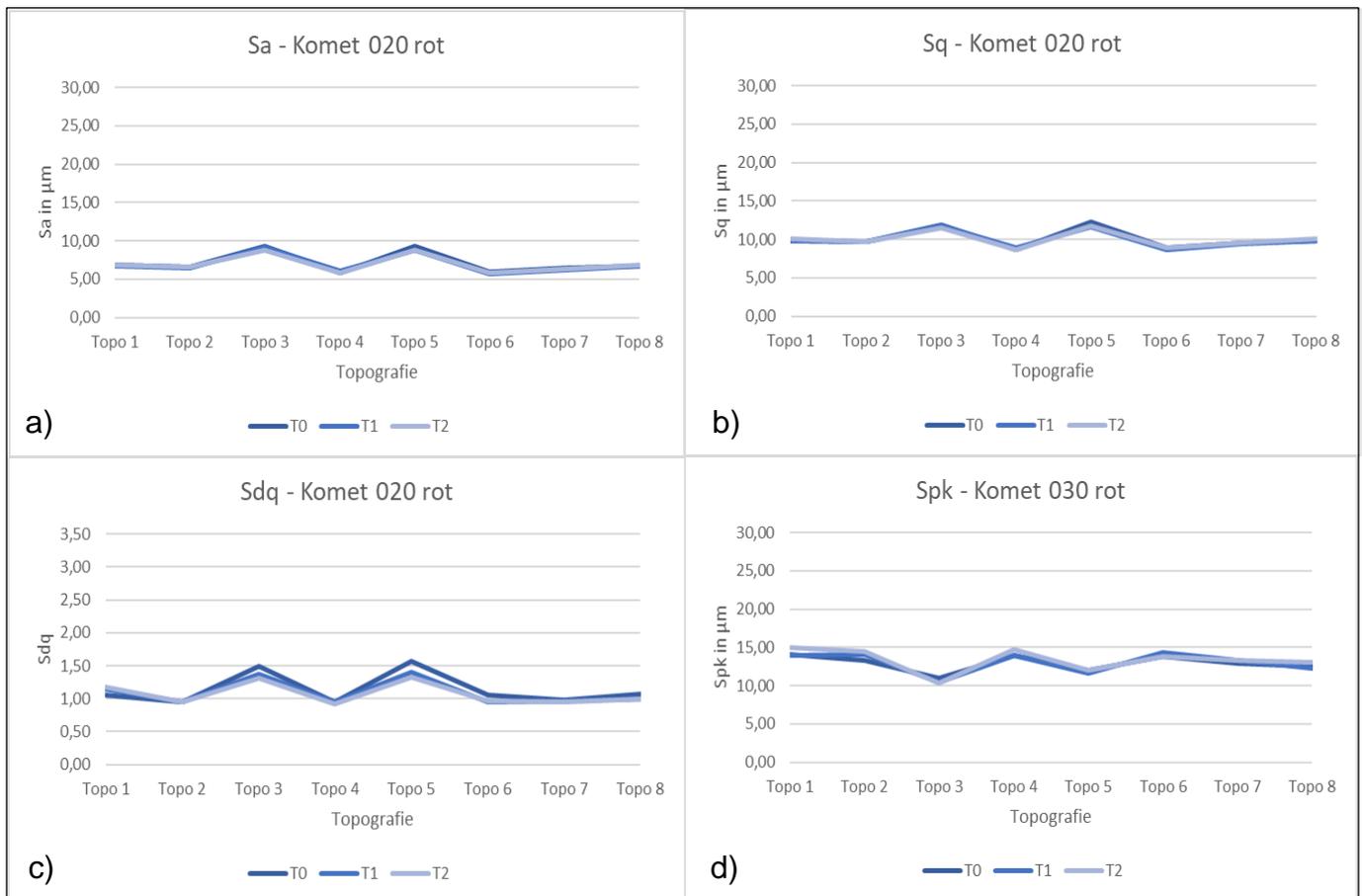


Abbildung 59 a-d: grafische Darstellung der Rauheitsparameter a) Sa, b) Sq, c) Sdq und d) Spk für acht zufällig verteilte Topografien des ASR-Instruments Komet 020 zu den Zeitpunkten T0, T1 und T2, eigene Grafiken.

Eine qualitative Auswertung war nicht in allen Topografien möglich. Aufgrund des zunehmenden Verstopfens mit Debris war das Zählen von Partikeln nicht möglich. Die Rauheitsmessung war davon nicht betroffen, da wie in 4.6.1 beschrieben, die Proben nach den rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen gereinigt wurden.

In Abb. 60 sind die rasterelektronenmikroskopischen Übersichtsaufnahmen für T0, T1 und T2 dargestellt.

Ergebnisse

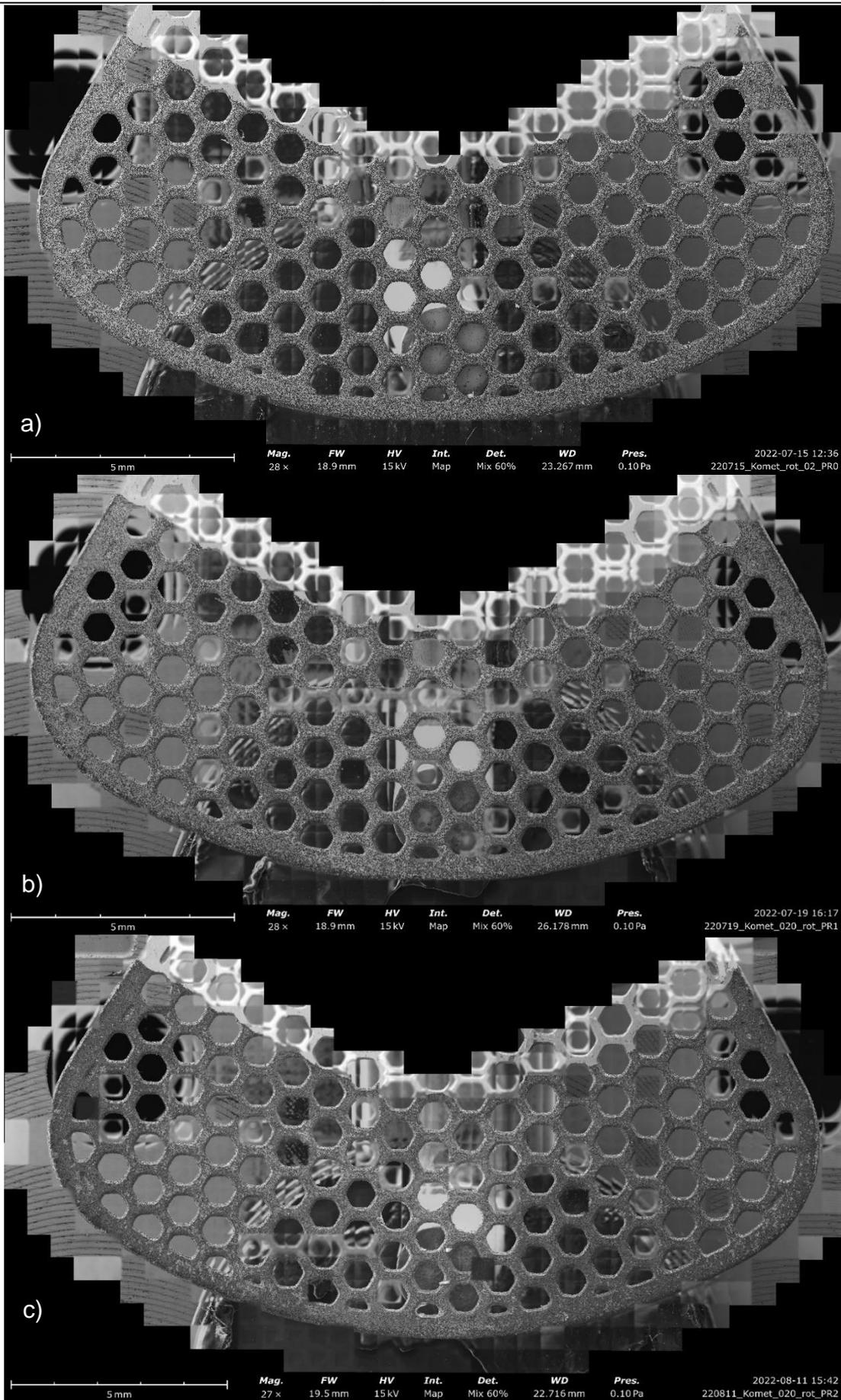


Abbildung 60 a-c: rasterelektronenmikroskopische Übersichtsaufnahme des ASR-Instruments Komet 020 zu a) T0, b) T1 und c) T2, eigene Aufnahmen mit dem Phenom XL.

6. Diskussion

6.1 Diskussion der Fragestellung

Da die approximale Schmelzreduktion eine etablierte kieferorthopädische Behandlungsmethode darstellt, gibt es in der Literatur verschiedene Studien, die sich in vivo und in vitro mit dem Verfahren auseinandergesetzt haben. Etliche Studien haben sich ebenfalls mit dem Vergleich von verschiedenen Systemen in Hinblick auf die Abtragsleistung, die Oberflächenrauheit nach Bearbeitung und dem Verschleiß des Instruments beschäftigt [4, 7, 9, 34, 50, 52, 53, 55-57, 68, 75, 77, 80, 109-114, 156].

Für die klinische Anwendung ist es sinnvoll, verschiedene Systeme miteinander zu vergleichen. In den meisten Studien wurde jedoch nicht eine Universalprüfmaschine zur Objektivierung der Kraft verwendet. Außerdem wurden in den meisten Studien zur quantitativen Beurteilung der Rauheit Linienparameter ermittelt und keine Flächenparameter. Auch das Verschleißverhalten wurde in keiner Studie quantitativ mit Flächenparameter und qualitativ mithilfe der Auswertung rasterelektronenmikroskopischer Aufnahmen beschrieben.

Die hier vorgestellte Studie soll einen neuartigen Versuchsaufbau vorstellen, der in der Zukunft auch für andere ASR-Instrumente Anwendung finden kann.

6.2 Diskussion von untersuchten Materialien

6.2.1 Auswahl der Zähne

Die in dieser Untersuchung verwendeten humane Eckzähne wurden in verschiedenen zahnärztlichen Praxen gesammelt. Aufgrund der Anonymisierung der gesammelten Zähne konnte kein Zusammenhang zwischen dem Alter des Spenders und dem erworbenen Zahnmaterial hergestellt werden. Auf der Einverständniserklärung wurde jedoch das Geburtsdatum des*der Patienten*in vermerkt. Die Altersgruppe der Patient*innen, die ihre Zähne für die Studie spendeten, reichte von 10 Jahre bis 82 Jahre, was durchaus eine repräsentative Stichprobe darstellt. Da humaner Zahnschmelz zwischen verschiedenen Individuen variiert und sich im Verlauf des Lebens durch die Einflüsse der Mundhöhle verändert, wurden die Proben, die für die Rauheits- und Abtragsmessung verwendet wurden, randomisiert.

In dieser Studie sollte unter anderem die Beschaffenheit des Schmelzes im Bereich der Approximalkontakte nach ASR untersucht werden. Dies führt zuallererst dazu, dass nur Zähne in die Studie eingeschlossen werden konnten, die im Approximalbereich keine Demineralisationen, Kavitationen, Füllungen oder iatrogene Schäden durch

Diskussion

vorangegangene Schleifmaßnahmen aufwiesen. Nur so können vergleichbare Daten gewonnen werden.

Die Zähne wurden in 0,5 % Chloramin-T-Lösung gelagert. Die Lösung eignet sich gut für die Lagerung von Zähnen, weil sie die Eigenschaften der Proben nicht verändert [157, 158].

Es erfolgte eine Grobdeputation, um harte und weiche Beläge zu entfernen. Diese hätten sonst die Rauheitsmessungen beeinflusst. Natürlich muss bei der Anwendung von Ultraschall darauf geachtet werden, dass die Oberfläche nicht iatrogen verletzt wird. Manuelle Scaler haben jedoch ein erhöhtes Risiko, Riefen auf der Schmelzoberfläche zu hinterlassen [159]. Daher wurde für diese Studie ein Ultraschallansatz verwendet.

6.2.2 Einbettverfahren: Herstellung der Prüfkörper

Die Prüfvähne wurden in festen Kunststoff eingebettet. Andere Studien haben versucht, eine natürliche Zahnbeweglichkeit durch das Einbetten der Echtzähne in eine Silikonmatrix zu simulieren [7, 9]. Denn der Abtrag des Schmelzes variiert je nach Zahnbeweglichkeit [5, 80, 112].

Zingler et al. wiesen jedoch darauf hin, dass auch das Material über einen gewissen Zeitraum seine Eigenschaften verändert, was wiederum eine Reproduzierbarkeit erschweren kann, vor allem, wenn die Versuche sich über einen längeren Zeitraum erstrecken [4]. Auch muss erwähnt werden, dass es in einer Studie zu einem Abtrag von 0 mm kam, was die Autoren auf das Lösen des Zahnes im Silikon oder auf die Überlagerungstechnik zurückführten [5].

Außerdem hat eine Studie gezeigt, dass die Stärke des Kontaktpunktes je nach Zahnart, Lokalisation und Tageszeit variiert [160]. Die Simulation einer natürlichen Zahnbewegung ist demnach nicht trivial und in der vorliegenden Studie wurde darauf verzichtet.

Durch das Einbettverfahren wurde kein Approximalkontakt wie in anderen Studien hergestellt [7, 53]. Vielmehr ging es um die Vergleichbarkeit der verschiedenen Systeme. Deshalb wurde der Fokus auf das Einbetten des Zahnes senkrecht zur Zahnachse gesetzt.

Die Kugel als Referenzkörper wurde zusätzlich eingebettet, da sich bei den Vorversuchen gezeigt hatte, dass bei der dreieckigen Form von Schneidezähnen das Überlagern schwierig und fehlerhaft war. Zu beachten ist, dass die Vorversuche mit einer älteren Version von Geomagic (Geomagic Control 2015) durchgeführt wurden.

6.2.3 Auswahl der ASR-Instrumente

Es wurden für die vorliegende Studie drei verschiedene handelsübliche Systeme zur approximalen Schmelzreduktion untersucht. Alle Systeme wiesen ein anderes Instrumentenende auf. Die Komet-Scheiben sind segmentierte Wabenscheiben, das Profin-System ein Sägeblatt und das CA-System ein diamantierter Streifen. Auch wurden alle Systeme von einem unterschiedlichen Handstück betrieben. Die vorliegende Arbeit hatte zum Ziel, durch die Objektivierung des Versuchsaufbaus die Systeme direkt miteinander zu vergleichen. Die Vorversuche haben gezeigt, dass ultraschallbetriebene Systeme sich mit dem Versuchsaufbau nicht realisieren konnten.

Bei den Verschleißmessungen für das Profin-System wurde nur das Sägeblatt von Profin lila untersucht, da sich die Arbeitsenden des Profin Systems nicht in der Diamantierung, sondern nur in der Dicke unterscheiden. Die anderen Systeme unterscheiden sich in ihrer Diamantierung. Jedoch konnte die Untersuchung von Livas et al. ein unterschiedliches Verschleißverhalten in Abhängigkeit von der Dicke des Instruments feststellen [117]. Da jedoch die unterschiedlichen Systeme nur exemplarisch untersucht wurden, sollte dies Gegenstand einer weiteren Studie mit einer größeren Stichprobe werden.

6.3 Diskussion der untersuchten Methoden

6.3.1 Scanvorgang

Die Zähne wurden mithilfe eines handelsüblichen Intraoral-scanners (Trios 3, 3Shape) gescannt, der eine gute Genauigkeit zeigt [161-163] vor allem für das Scannen von Einzelzähnen [164]. Zunächst wurde der Scanner über die Okklusalfäche/Inzisalkante geführt, anschließend über alle Flächen. Aufgrund der unterschiedlichen Krümmung der Oberflächen mussten manche Bereiche länger gescannt werden. Wichtig war ein vollständiger Scan ohne Fehlstellen/fehlende Bereiche. Die Daten wurden wie üblich im STL-Format gespeichert und mit der Software Geomagic Control X vermessen.

Mögliche Fehlerquellen für den Scanvorgang sind zum einen behandler-spezifische Faktoren wie die Scantechnik, die Erfahrung des Behandlers, der Abstand des Scankopfes, die Kalibrierung und das Nachscannen einzelner Bereiche [163, 165, 166]. Die Scans der vorliegenden Studie wurden von einer Untersucherin (N.A.), die klinisch Erfahrung mit dem Scanner hatte, mit der gleichen Scantechnik durchgeführt. An jedem Scantag wurde der Scanner zudem kalibriert. Außerdem haben Umgebungsfaktoren wie die Lichtbedingungen und die Umgebungstemperatur Einfluss auf die Scangenaueigkeit [167]. Nach den Autoren Revilla-León et al. sind die optimalen Lichtbedingungen normale Raumlichtbedingungen [167]. Die Proben wurden in

Diskussion

denselben klimatisierten Behandlungsraum gescannt unter normalen Raumlichtbedingungen. Andere Faktoren sind die Ausdehnung des Kunststoffes je nach Umgebungstemperatur und die Feuchtigkeit der Zahnoberfläche. Nach Chen et al. kann Flüssigkeit auf der Zahnoberfläche die Genauigkeit des intraoralen Scannens beeinträchtigen. Das Trocknen der Zahnoberfläche mit der Multifunktionsspritze einer dentalen Einheit, kann diese Fehler reduzieren [168]. Daher wurden die Proben vor dem Scannen mit einer Multifunktionsspritze getrocknet.

Der Vorteil des Einbettens von einzelnen Zähnen ist, dass der Approximalkontakt genau gescannt werden kann. Die Autoren Pellitteri et al. fanden beim Vergleich von drei intraoralen Scannern, dass der verwendete Trios 3 Scanner die höchste Scangenaugigkeit bei Einzelzähnen zeigte [169].

6.3.2 Versuchsaufbau

Die Schmelzreduktion mit den drei untersuchten ASR-Instrumenten wurde an einer Universalprüfmaschine (Zwick/Roell Z005) durchgeführt. Wichtig war für die Programmierung eine Belastung ohne Überschwingung zu erreichen. Zu diesem Zweck mussten Höhe der Grenzkraft, Geschwindigkeit bis zum Belastungspunkt und Haltedauer angepasst werden.

In Vorversuchen hatte sich gezeigt, dass dieser Versuchsaufbau aufgrund der Schwingungen des Ultraschallansatzes nicht mit dem SonicFlex System möglich ist. Daher wurde dieses System in den Hauptversuchen nicht verwendet.

Die Komet-Scheiben mussten mit einem kleinen Haken von der nicht zum Schleifen genutzten Seite verstärkt werden, da die Vorversuchsreihen gezeigt haben, dass die Komet-Scheiben so stark deflektierten und das im Zeitintervall ein Abbruch des Versuchs notwendig war. Der Haken führt jedoch zu einer vermehrten Unwucht, die ebenfalls zu berücksichtigen ist. Denn es befindet sich eine zusätzliche Masse im Abstand vom Schwerpunkt der Komet-Scheibe. Jedoch entstanden ohne den Haken durch das Abgleiten vom Prüfkörper schräge Schliiffacetten, die im Weiteren nicht mit dem Alicona vermessen werden konnten. Da die 2 N als Zielkraft definiert wurden, konnte kein Herabfahren der Traverse bis zum Probenhalter nach Verlust des Kontaktes zur Probe ausgeschlossen werden. Eine Beschädigung des ASR-Tools, des Winkelstücks und der Universalprüfmaschine war folglich möglich. Für die anderen zwei Systeme war eine Verstärkung nicht notwendig.

Die objektive Kraftmessung und deren konstante Einstellung bei 2 N mithilfe einer Universalprüfmaschine führt zu einer besseren Vergleichbarkeit und Reproduzierbarkeit der Abtragsmengen. Zur Objektivierung der Anwendung eines ASR-Tools wurde in den Studie von Gazzani et al. ebenfalls eine Universalprüfmaschine verwendet [67]. Jedoch wurde eine andere Prüfschrift, eine andere Prüfmaschine, eine Kraft von 1 N und ein anderer Versuchsaufbau benutzt [67].

Diskussion

Durch das programmierte Nachführen des ASR-Gerätes wurde eine konstante Kraftübertragung gewährleistet. Aufgrund der unterschiedlichen Krümmung der Zahnoberflächen und der unterschiedlichen Deflexion der Streifen und Scheiben gab es einen unterschiedlichen initialen Anstieg der Kraftkurve. Das war jedoch mit diesem Versuchsaufbau nicht zu vermeiden. Eine Möglichkeit bestände darin, das Intervall der Messung zu verlängern, jedoch hätte es dann schon einen bestehenden Kontakt zwischen Zahn und ASR-Instrument gegeben und damit einen Abtrag über die 30 s hinaus. Immer wenn unterschiedliche Systeme miteinander verglichen werden, ist es aufgrund der unterschiedlichen Morphologie der ASR-Instrumente nicht möglich, völlig gleiche Bedingungen zu schaffen. Die Probe wurde sofort nach dem Versuch entlastet, das Instrument wurde während des Versuchs nachgeführt.

6.3.3 Messung des Abtrags mit Geomagic Control X

Der Abtrag wurde mithilfe der Software Geomagic Control X bestimmt. Die Überlagerung erfolgte über stabile Referenzflächen. Denn das „reference-based“ Aligment führt einer Studie zufolge zu signifikant geringeren Überlagerungsfehlern und besseren Messergebnissen als das globale „Best-Fit Alignment“ und „landmark based alignment“ [170]. Denn eine übliche „Best-Fit-Ausrichtung“ basiert auf einem ICP-Algorithmus (Iterativ Closest Point), der aus allen Datenpunkten eines Scans den Abstandsfehler minimiert. Dieser minimiert die Diskrepanz zwischen zwei Punktwolken und ist sowohl über positive als auch negative Werte gleichmäßig verteilt [171]. Wenn aber, wie in unserem Beispiel lokal eine größere Differenz zwischen zwei Datensätzen vorliegt, kann dies durch den Versuch der Software Abweichungen zu minimieren, zu einer fehlerhaften Auswertung führen. Der Abtrag würde dann als zu gering eingestuft werden.

Da der Methodenfehler für die Überlagerung desselben Scans in Geomagic Control X bei 0,0005 mm und für die Überlagerung des gleichen Zahnes bei 0,00655 mm lag, liegt der kumulative Fehler für die Abtragsmessung bei 0,00705 und damit nicht in einem klinisch relevanten Ausmaß.

6.3.4 Messung der Rauheit der Schmelzoberfläche mit dem Alicona InfiniteFocus

Die Bewertung von Messmethoden der Rauheit an der Schmelzoberfläche kann von verschiedenen Gesichtspunkten betrachtet werden. Zum einen sollte die Wahl von qualitativen und quantitativen Messmethoden diskutiert werden.

Bei quantitativen Rauheitsmessungen in der Werkstoffprüfung werden häufig Oberflächen untersucht, die durch die Fertigung zwar eine gewisse Irregularität der Oberfläche, jedoch, nicht wie biologische Oberflächen, eine natürliche Heterogenität aufweisen. Darauf basierend sollte entschieden werden, ob Linienrauheitsmessungen oder Flächenrauheitsmessungen zur Anwendung kommen.

Bei einer Studie, die den Effekt verschiedener Schleif- und Poliermaßnahmen auf den approximalen Schmelz untersucht, sollten für die ganze Fläche relevante Bewertungen erfolgen. Das bedeutet zum einen, dass es bei Schmelzoberflächen sinnvoll ist, an mehreren Stellen zu messen, um einen repräsentativen Durchschnittswert zu gewinnen, da auf natürlichem Schmelz die Rauheitswerte variieren.

Linienparameter eignen sich eher zur Erfassung von periodischen Profilen. Anders als artifizielle Oberflächen, die ein regelmäßiges Oberflächenprofil zeigen, zeichnet sich der Zahnschmelz als natürliche biologische Oberfläche durch Unregelmäßigkeiten an der Oberfläche durch natürliche Attritionsprozesse oder Perikymatien aus. Die Schmelzoberfläche zeigt folglich ein atypisches aperiodisches Profil. Daher kann man, wenn es um die Rauheitsmessung dieser Oberfläche geht, nicht einfache Variablen anwenden, die für periodische Flächenprofile gelten, sondern muss zusätzlich nach spezifischen Parametern suchen, die die Eigenschaften der Fläche charakterisieren, die z. B. für die Adhäsion von Bakterien oder der vermehrten Ansammlung von Plaque gelten. Daher sind Flächenparameter eher geeignet, um die Oberflächeneigenschaften von Schmelz zu beschreiben.

Die flächenbasierte Rauheitsmessung erlaubt zum anderen die Berücksichtigung der gesamten zu vermessenen Fläche. Dabei werden Variationen der Messwerte aufgrund der Wahl einer Abtastrichtung oder die Limitation auf eine bestimmte Messstrecke vermieden. Die 3D-Rauheitsparameter werden über eine definierte Fläche gemessen und nicht nur über eine einzelne Linie [172]. Auch ist zu entscheiden, ob nur ein einzelner Wert oder mehrere Parameter erfasst werden. Verschiedene Autoren betonen, wie wichtig es ist, zur Charakterisierung der Rauheit einer Oberfläche verschiedene Flächenrauheitsparameter heranzuziehen [112, 115].

Auch nach Seewig et al. ist für Oberflächen, die lokale Strukturen (z. B. Partikel) aufweisen und nicht stark anisotrop sind, dem flächenbasierten Messverfahren der Vorzug zu geben. Linienparameter erfassen durch den Profilschnitt nur Teile der Strukturen [141].

Diskussion

Obwohl die Stylusprofilometrie als etablierte Rauheitsmessmethode gilt, sind heutzutage viele kontaktlose Messmethoden zu finden. Früher wurden standardmäßig taktile Instrumente zur Erfassung von Linienparametern z. B. das Perthometer verwendet. Dabei wird eine diamantierte Ansatzspitze über die zu vermessende Oberfläche geführt [151]. Taktile Verfahren haben jedoch den Nachteil, dass es durch die Diamantspitze es je nach Härte und Beschaffenheit zu Veränderungen der Oberfläche kommen kann [173]. Diese können folgende Messungen beeinflussen [151]. Denn die Kratzer, welche durch den Aufsatz produziert werden, können möglicherweise bei den darauffolgenden Untersuchungsschritten zu Fehlinterpretationen führen. Der Ansatz für die Rauheitsmessung ist konisch mit einem Spitzenwinkel von 90° sowie einen Durchmesser von $5\ \mu\text{m}$ [121]. Dies birgt außerdem die Gefahr, dass die Rauheitsmesswerte eher unterschätzt werden, weil sehr feine Unregelmäßigkeiten von der Tastspitze nicht erfasst werden können [174]. Außerdem können Schmelzproben mit taktilen Messmethoden nicht visuell erfasst werden. Artificielle Schmelzrisse, die zum Beispiel bei der Extraktion eines Zahnes oder bei der weiteren Verarbeitung der Proben entstehen können, können zu unbemerkten Fehlmessungen führen [175]. Beachtet werden muss zudem, dass der Radius der Tastspitze die Rauheitsmessung limitiert und Mikrorauheiten nicht gemessen werden können [173]. Die Erweiterung der Messmethoden auf flächenbasierte Rauheitsparameter gemäß der ISO 25178 ermöglicht heutzutage mit optischen nicht-taktilen Verfahren eine Vermessung der Oberfläche [141].

Eine weitere Objektivierung in der Methodik erfolgte durch die Wahl von Koordinaten, die jeweils wieder für T0, T1 und T2 angesteuert wurden. Dadurch wurde nicht in Regionen mit besonders glatter oder rauem Schmelz, sondern in vorab definierten Arealen gemessen. Es mussten nur in dem Fall die Koordinaten leicht angepasst werden, wenn die Schliiffacette so klein war, dass einer der drei Messstellen außerhalb lag.

Die häufig auf Licht basierenden Mikroskope zur Rauheitsmessung werden von der Oberflächenbeschaffenheit der Proben beeinflusst. Bei den Schmelzproben kann es aufgrund der Transparenz bzw. Transluzenz der Proben zur Beeinflussung der Oberflächenmessung kommen. Polierte Schmelzproben sind hoch transluzent und stark reflektierend, was zu Störungen der Messung des reflektierten Lichtes führen kann [140].

Häufig werden daher Replikas angefertigt, die daraufhin vermessen werden [176]. Diese werden meistens anschließend mit Gold besputtert (bedampft). Es kann jedoch zu Dimensionsveränderungen und Ungenauigkeiten durch die Abformtechnik kommen und Füllpartikel im Abformmaterial können Einfluss auf das Profil und damit auf die Mikrorauigkeit haben [151, 177]. Eine Studie kam zu dem Schluss, dass die hybriden Parameter Sdr und Sdq durch die Replikation nicht korrekt wiedergegeben wurden [176].

Diskussion

Für die polierten Schmelzproben wurde daher in dieser Studie der Polarisator verwendet, zur Minimierung der Reflexion an der Schmelzoberfläche und damit durch die Blockierung des spiegelnden Lichtes [139]. Die Datensätze wurden ebenfalls auf Ausreißer in der z-Achse und fehlende Messpunkte (siehe 4.4 Prinzip der Focus Variation) untersucht. In diesen Bereichen wurde nicht gemessen.

In der vorliegenden Studie wurden die Schmelzoberflächen vor und nach ASR bzw. Politur vermessen. Auf eine Kontrollgruppe mit unbehandelten extrahierten Zähnen wurde verzichtet, um das direkte Vergleichen der Oberflächen zu ermöglichen. Denn eine Kontrollgruppe mit $n = 8$ Flächen stellt keine repräsentative Stichprobe für die Heterogenität der natürlichen Schmelzoberfläche dar. Auch andere Autoren haben daher auf eine Kontrollgruppe verzichtet und die Zahnflächen vor und nach Bearbeitung verglichen [112, 115]. Wichtig war für die Untersuchungen, dass die untersuchten Schmelzregionen direkt verglichen wurden, um feststellen zu können, ob die Schmelzproben nach Politur glatter wurden als unbehandelter Schmelz.

Die untersuchten Schmelzoberflächen wurden jeweils nach der Anwendung durch ein ASR-Instrument nach 30 Sekunden untersucht. Eine Studie von Gazzani et al. fand heraus, dass ein standardisiertes Protokoll der einmaligen Anwendung vorzuziehen ist, da die Oberflächen deutlich glatter waren. Jedoch muss erwähnt werden, dass vier Instrumente für den Abtrag von 0,2 mm mit anschließender Politur (1 Instrument) verwendet wurden oder 5 Stufen mit dem einen Streifen (40 μm) [113]. In der Studie von Gazzani et al. wurden die ASR-Tools außerdem auf der Vestibulärfläche angewendet [113]. In der vorliegenden Studie wurden die darauffolgenden ASR-Streifen nicht angewandt. Denn für das CA gibt es zum Beispiel ein progressives ASR-Protokoll nach Dr. Echarrri für verschiedene Zielabträge. Auch für das Komet-System gibt es ein ASR-Set nach Dr. Drechsler für die verschiedenen Zielabträge. Ziel der vorliegenden Studie war eine Vergleichbarkeit der Rauheit der Schmelzoberfläche nach 30 Sekunden Anwendung mit anschließend 30 Sekunden einheitlicher Politur.

Bei der auf die Schmelzreduktion folgenden Politur wurden in einigen Studien einheitliche Polierscheiben benutzt oder Polierinstrumente für die unterschiedlichen Systeme [4, 80]. Werden unterschiedliche Poliersysteme verwendet, müssten die Rauheitsdaten diesbezüglich diskutiert werden, inwiefern die verschiedenen Politurmaßnahmen Einfluss auf die Rauheit haben. In der vorliegenden Studie wurden ein einheitliches Polierverfahren mit gleichen Poliermitteln und gleichem Schleifweg angewendet. Jedoch erfolgte die Politur an einer Behandlungseinheit von einer Untersucherin (N.A.). ohne Messung der applizierten Kraft. Daher ist eine variable Kraftapplikation zu erwarten. Aufgrund der Randomisierung der Flächen sollte sich dieser Effekt jedoch gleichmäßig auf alle Prüfgruppen erstrecken.

Diskussion

6.3.5 Messung der Rauheit der Schmelzoberfläche mit dem Phenom XL

Als qualitative Methode zur Messung der Rauheit des Schmelzes sind neben lichtmikroskopischen Aufnahmen, rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen zu nennen. Diese bedurften in der Vergangenheit einer Vorbehandlung der Oberfläche in Form von Besputtern. Das Besputtern führt jedoch zu einer Veränderung der Oberfläche. Die Beschichtung kann nur unzulänglich entfernt werden. Außerdem kommt es durch das Vakuum zu möglichen Schmelzrissen, die wiederum Einfluss auf folgende Messungen haben können [150]. Das Beurteilen der polierten Schmelzoberflächen mit rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen ist einer gewissen Subjektivität unterlegen. Daher erfolgte die Beurteilung mithilfe des modifizierten ESI-Index. Auch wenn der Score mit Beispielbildern als Vorlage erhoben wurde, die Aufnahmen mit der Randomisierung anonymisiert wurden, ist die Beurteilung dennoch durch einen Behandler nicht gänzlich objektiv.

Da die Autoren Zhong et al. darauf hinwiesen, dass es wichtig ist, die approximal schwer zugängliche zervikale Region in die Politur miteinzubeziehen [50], wurde in der vorliegenden Studie die Schmelzoberflächen qualitativ sowohl im Bereich der Fläche als auch im Randbereich untersucht. Die Politur der Schmelzproben erfolgte an extrahierten Zähnen mit optimaler Sichtbarkeit der Fläche. Dies ist klinisch nicht der Fall. Auch die Politur der zervikalen Region ist bei der Politur eines isolierten Zahnes deutlich leichter zu erreichen als bei einer geschlossenen Zahnreihe. Das sollte bei der Begutachtung der Schmelzoberfläche mithilfe des ESI-Scores berücksichtigt werden.

Ein weiteres Problem der rasterelektronenmikroskopischen Auswertung der polierten Flächen ist, dass es keine einheitliche Bewertungsskala gibt. So würde die bei der Studie von Shah et al. „glatter als unbehandelter Schmelz“ eingestuft Schmelzoberflächen dem Grad 3 (moderat) bei der Studie von Zhong et al. entsprechen [50, 116]. Die Schmelzoberflächen, die in der Studie von Gupta et al. als „glatt“ bezeichnet wurden, sind eher vergleichbar mit dem Grad 3 aus der Studie von Zhong et al. [74].

6.3.6 Messung des Parameters Verschleiß

In dieser Studie wurden fünf ASR-Instrumente der drei Systeme quantitativ und qualitativ untersucht. Da jeweils ein ASR-Instrument untersucht wurde, handelt es sich um keine repräsentative Stichprobe für eine statistische Auswertung, daher wurden die Ergebnisse rein beschreibend ausgewertet.

Die Dicke der verwendeten Scheibe hat nicht nur Einfluss auf die Abtragsmenge, auch zeigen dickere ASR-Instrumente laut Livas et al. ein geringeres Verschleißverhalten. Die Autoren empfahlen daher einen häufigeren Austausch von dünnen ASR-

Diskussion

Instrumenten [4, 117]. Daher hätte in der vorliegenden Studie zur weiteren Erkenntnisgewinnung eines anderen Verschleißverhaltens auch das Profin rot mit in die Untersuchung einbezogen werden können.

Ebenfalls zu diskutieren ist die Frage, ob die Oberflächen der ASR-Tools zwischen den Messungen gereinigt werden sollten oder nicht. Dies ist zuallererst davon abhängig, ob Rauheitsparameter gemessen werden sollen oder das Verschleißverhalten qualitativ mithilfe von rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen beurteilt wird. In der Studie von Livas et al. in der Linienrauheitsparameter erhoben wurden, wurden die untersuchten Oberflächen vor der Vermessung gereinigt. Dies wurde vor der flächenbasierten Vermessung und der Erhebung von Flächenrauheitsmessdaten auch in dieser Studie getan, da die Akkumulation von Debris zwar für die Charakterisierung der Art des Verschleiß interessant ist, jedoch eben dieser Debris zu Fehlmessung der Rauheitsparameter führen könnte. Anders verhält es sich bei der qualitativen Beurteilung. In der Studie von Grippaudo et al. wird nicht angegeben, ob die ASR-Streifen gereinigt wurden zwischen den Aufnahmen. Bei zwei anderen Studien, die ebenfalls unter anderem rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen zur Untersuchung des Verschleißverhaltens verwendeten, wurden die ASR-Instrumente nicht zwischendurch gereinigt [10, 67].

Um den Verschleiß der ASR-Instrumente zu messen, kann ein Tribometer wie in der Studie von Lione et al. verwendet werden [10]. Durch die Verwendung der Universalprüfmaschine wurde zwar eine konstante Kraft appliziert, jedoch ist keine Messung des Friktionskoeffizient möglich.

Die Messung von bestimmten Flächenrauheitsparametern kann ebenfalls zur Analyse der Oberflächen eines Abrasivs verwendet werden. Kapłonek et al. beschrieben die Verwendung der Fokusvariation für die Untersuchung der aktiven Oberflächen verschiedener Abrasive [129].

Daher wurden in der vorliegenden Studie die Flächenparameter Sa, Sq, Sdq und Spk erhoben, um explorativ mögliche Veränderungen dieser Werte zu erfassen. Diese Messwerte wurden mit der Analyse der rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen kombiniert. Nadolny et al. empfahlen ebenfalls diese Kombination eines Desktop-SEM mit konventionellen Messmethoden [153].

6.3.7 Diskussion der Statistik

In der vorliegenden Studie kamen sowohl parametrische sowie nichtparametrische Test zur Anwendung. Bei der statistischen Auswertung der Abtragswerte wurde eine ANOVA verwendet. Bei der Varianzanalyse stellt sich das Problem des multiplen Testens. Das Problem des multiplen Testens ist, dass der Alpha-Fehler mit der Anzahl der Tests steigt. Parametrische Tests kommen zur Anwendung, wenn die Daten normalverteilt

Diskussion

sind. Daher wird ein Datensatz zunächst auf Varianzhomogenität geprüft. Diese war für die Abtragsmessung der Prämolaren nicht erfüllt. Daher wurde auf dem strengeren Signifikanzniveau von 0,01 geprüft.

Bei der mehrfaktoriellen ANOVA dienen Profilplots der Darstellung und Interpretation von möglichen Interaktionen. Diese dienen der Interpretation, ob eine in der Statistik als signifikanten Haupteffekt identifizierte Größe nicht durch die Interaktion gestört wird. Bei den Tools Komet und Profin sieht man, dass die Linien sich nicht überkreuzen (siehe Abb. 20, S.56, Abb. 21, S. 58). Das bedeutet, dass die mittleren Abweichungen in den Kategorien Profin rot und Komet 045 bei jeder der Kategorie des Faktors „Austausch des Schleifmittels“ gleichbleibt. Die Interaktion Austausch des Schleifmittels stört den Haupteffekt folglich nicht. Das gilt jedoch nicht für das ASR-Tool CA grau und rot. Dort sieht man, dass sich die Linien überkreuzen. Das bedeutet, dass der Haupteffekt durch die Interaktion „Austausch des Schleifmittels“, der in der ANOVA berechnet wurde, gestört wird. Dieser Effekt war jedoch nicht signifikant.

Für die statistische Auswertung der Rauheitsparameter wurden nichtparametrische Tests gewählt, da die Daten nicht normalverteilt waren. Das Problem bei nichtparametrischen Test ist, dass sie zwar robuster sind, jedoch der Beta-Fehler steigt. Das bedeutet, dass die Wahrscheinlichkeit geringer ist, dass signifikante Unterschiede erkannt werden. Für die grafische Darstellung der Rauheitsmesswerte wurden Box-Whiskers-Plots verwendet. Da bei dieser grafischen Darstellung der Median angegeben wird, wurde zusätzlich in der deskriptiven Statistik Mittelwert und Standardabweichung angegeben.

6.4 Diskussion der Ergebnisse

6.4.1 Diskussion der Ergebnisse der Abtragsmessung

Das Ausmaß des Abtrages ist von verschiedenen Faktoren abhängig, wie der Härte des Schmelzes, dem Anpressdruck, der appliziert wird und von den Eigenschaften des abrasiven Instruments [6-8].

In dieser Studie wurde versucht, den Einfluss des Verschleißes des ASR-Instruments auf den Abtrag auszuschließen. Das Instrument wurde nach $n=4$ gewechselt, da Studien gezeigt haben, dass nach der 10. Anwendung der Abtrag deutlich abnahm [7]. Der in dieser Studie beobachtete unterschiedliche Abtrag durch die beiden CA-Streifen (rot, grau) scheint demnach nicht an dem progressiven Verschleiß der ASR-Tools zu liegen. Es wurden ebenfalls die Reihenfolge der Prüfkörper und die entsprechenden Abtragswerte dokumentiert, die im Intervall von $n = 4$ nicht abnahmen. Auch kamen beide ASR-Streifen aus der gleichen Charge (CA rot: Chargennummer LOT 1621A, CA grau: LOT 2121 A, siehe Materialliste). Diese Beobachtung steht im Einklang mit den

Diskussion

Untersuchungen von Johner et al. Sie fanden eine große Streuung in den Abtragsmengen innerhalb der verwendeten ASR-Geräte in ihrer Untersuchung [5]. Es scheint also für die CA-Streifen herstellungsbedingt eine unterschiedliche Abtragsleistung vorzuliegen. Dies müsste jedoch in einer weiteren Studie mit einer größeren Stichprobe untersucht und bestätigt werden.

Für die Politur wurden ebenfalls die Sof-Lex-Scheiben nach $n=4$ gewechselt, da eine Studie von Jost-Brinkmann et al. gezeigt hat, dass die Scheiben nach 60 Sekunden deutliche Verschleißerscheinungen an der Oberfläche zeigen und dies Einfluss auf das Politurergebnis haben kann [47].

Die Komet- Wabenscheiben führen in der vorliegenden Studie zu einem signifikant größerem Schmelzabtrag als das CA-System und das Profin-System. Dies steht in Übereinkunft mit der Studie von Danesh et al. Die Autoren konnten eine mittlere Schmelzreduktion von 0,32 mm bei Frontzähnen feststellen [9]. Aufgrund der unterschiedlichen Abtragsleistungen der in der Studie von Danesh et al. verwendeten ASR-Instrumente waren die Bedingungen der Studie ein Zeitintervall von mindestens 5 Sekunden und ein Schmelzabtrag von mindestens 0,25 mm. In der vorliegenden Arbeit wurde ein Vergleich der Instrumente nach einem Abtrag von 30 Sekunden bei gleicher Kraftapplikation angestrebt. Das Risiko der Beeinflussung der anschließenden Rauheitsmessung durch die Gefahr der Freilegung von Dentin, vor allem bei extrahierten Zähnen von potenziell älteren Patient*innen, wurde als zu große Gefahr angesehen. Daher wurde die Umdrehungszahl für das Komet-System für beide Wabenscheiben (Komet 045 und 030) reduziert. In der Folge ist ein noch größerer Abtrag bei der Verwendung des Komet Systems bei einer Umdrehungszahl von 40 000 U/min nach Herstellerempfehlung zu erwarten.

Der zu erzielende mesiodistale Abtrag ist im Übrigen auch abhängig von der Morphologie des Zahnes. Jedoch wurden die Approximalflächen randomisiert, sodass ein Abtrag an der mesialen Zahnfläche in der Regel durch ein anderes ASR-Instrument erfolgte als auf der distalen.

Für das Clear Aligner Stripping Tool (CA-Tool) wird auch ein „progressives Stripping Protokoll“ zum Erzielen des gewünschten Abtrags propagiert. Daher ist nach der Anwendung von diesem Protokoll nach einem anderen Zeitintervall mit einem größeren Abtrag sowohl für die Frontzahngruppe als auch für die Prämolarengruppe zu rechnen. Da jedoch ein Vergleich der Instrumente nach 30 Sekunden angestrebt wurde, wurde das progressive Protokoll nicht angewandt.

Durch die Politur der Schmelzoberfläche kommt es gegebenenfalls neben der nötigen Glättung zu einem weiteren Substanzabtrag. Dieser Abtrag ist jedoch ebenfalls vom Anpressdruck, der verwendeten Umdrehungszahl und der Wahl des Poliermittels abhängig. Laut einer Studie von Danesh et al. liegt er zwischen 0 – 0,02 mm [9]. Da dieser vernachlässigbar ist, wurden die Zähne nach der Politur nicht nochmals gescannt, um den Schmelzabtrag durch Politur zu bestimmen. Da die Politurzeiten und

Diskussion

das Politurverfahren (Sof-Lex-Scheiben, 45 Sekunden) bei allen Gruppen gleich war, kann man einen zusätzlichen Abtrag gleichermaßen zu dem erreichten Abtrag erwarten.

6.4.2 Diskussion der Ergebnisse der Rauheitsmessung

Die hier angewendete Fokusvariation ist ein kontaktloses Oberflächen-Messverfahren. Das bedeutet jedoch, dass die Werte (wie z. B.: Ra – Sa) aus anderen Studien, die mittels Stylusprofilometrie erhoben wurden, aufgrund der unterschiedlichen Messprinzipien nicht direkt numerisch mit den in dieser Studie erhobenen Werten verglichen werden können. Die Profile zur Ermittlung von Ra werden individuell eingeebnet, bei der Erhebung des Wertes Sa wird die gesamte Fläche eingeebnet [137].

Die Untersuchung hat gezeigt, dass die Schmelzproben bei T0 keinen signifikanten Unterschied zeigten. Das ist auch mit der Randomisierung der Proben zu begründen.

Der Grund für die Messung der Rauheit des Schmelzes ist das Risiko der vermehrten Adhäsion von Plaque [54]. Bollen et al. konkludierte in einer Literaturübersicht, dass es ab einem Grenzwert des Rauheitsparameters Ra von 0,2 µm zu einer vermehrten Plaqueadhäsion kommt [54].

In der vorliegenden Studie erhöhte sich der Sa- Wert nach der Anwendung der ASR-Instrumente sowohl in der Prämolarengruppe (CA grau: 1,81 µm, Profin rot: 1,74 µm, Komet 045: 0,83 µm) als auch in der Frontzahngruppe (Profin lila: 1,94 µm, CA rot 1,69 µm) deutlich über diesen Grenzwert. In dieser Studie zeigte das Komet-System, insbesondere die feinere Diamantierung (Komet 030 rot) signifikant und klinisch relevant eine geringere Erhöhung aller Rauheitswerte und auch des Rauheitsparameters Sa auf einen mittleren Wert von 0,42 µm. Auf eine anschließende Politur ist demnach insbesondere bei der Anwendung des CA-Systems und des Profin-Systems nicht zu verzichten.

Das Komet-System erzielte sowohl mit der 045 Wabenscheibe als auch mit der 030 Wabenscheibe einen ESI-Score von 0-1. Andere rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen kamen zu vergleichbaren Ergebnissen, dass mit oszillierenden Wabenscheiben mit einem Körnungsgrad (< 30 µm) bereits deutlich glattere Oberflächen zu erzielen sind als mit anderen ASR-Instrumenten [50, 68].

Zu beachten ist, dass einige Studien zeigten, dass tiefe Furchen und Kratzer nach der ASR nicht durch Politurmaßnahmen entfernt werden können [114]. Dies konnte ebenfalls in dieser Studie festgestellt werden. Auch in einer SEM-Studie von Bhambri et al. waren nach der Anwendung von diamantierten Scheiben mit anschließender Politur mit Sof-Lex Scheiben noch Riefen sichtbar. Deutlichere Riefen waren zudem zu sehen, wenn die Nachbearbeitung statt mit SofLex Scheiben mit einem feinen Diamantbohrer

Diskussion

erfolgte [53]. Auch in dieser Studie wurden vereinzelt persistierende Riefen im Schmelz bei der qualitativen Auswertung sichtbar (siehe Abb. 61).

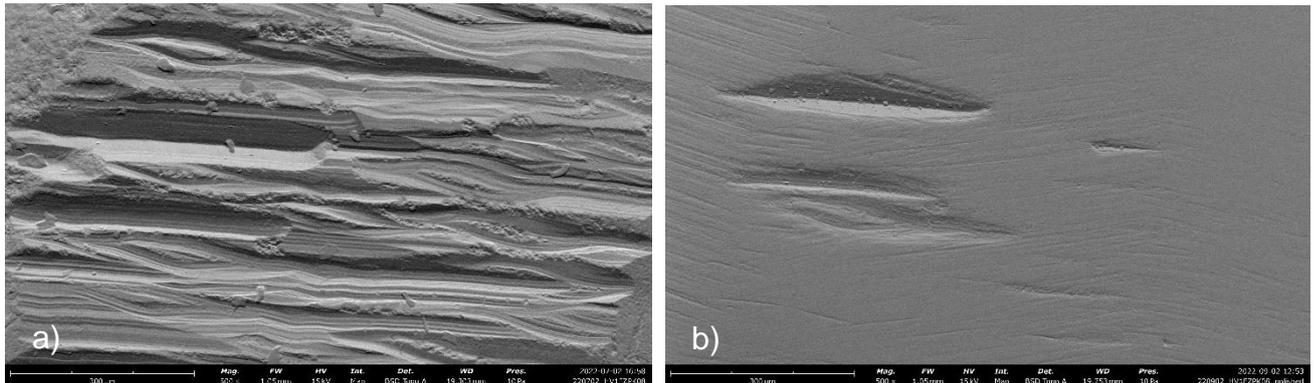


Abbildung 61 a und b: rasterelektronenmikroskopische Aufnahme: a) nach Bearbeitung der Schmelzoberfläche mit Profin lila, b) sichtbare persistierende Riefen und Furchen im Schmelz trotz Politurmaßnahmen, eigene Aufnahmen mit dem Phenom XL.

In der Studie von Danesh et al. wurden ebenfalls Rauheitsmesswerte und SEM-Bilder zur Beurteilung der Schmelzoberfläche vor und nach Politur herangezogen. Auch in dieser Studie wurde beschrieben, dass die Riefen im Schmelz durch die Politur zwar deutlich abgeflacht, aber nicht vollständig entfernt wurden [9]. Diese Beobachtung konnte in dieser Studie für das CA- und das Profin- System ebenfalls bestätigt werden.

Die rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen in den Abbildungen 62-73 zu T1 zeigen die Schmelzoberflächen nach der Bearbeitung mit dem entsprechenden ASR-Instrument. Man sieht die deutlich regelmäßigeren Oberflächen nach der Bearbeitung mit dem Komet 045 und vor allem mit dem Komet 030 im Vergleich zu den Schmelzoberflächen nach der Anwendung des CA- und Profin-Systems.

In der Studie von Zingler et al. konnten die Autoren feststellen, dass nur bei der Anwendung von ASR-Systemen mit einer feinen Körnung Schmelzoberflächen generiert wurden, die glatter als unbehandelte Schmelz waren, wohingegen die Rauheitswerte für gröbere Arbeitsenden erhöht blieben [4]. In Übereinstimmung mit den Untersuchungen von Zhong et al. ist daher eine Politur der Schmelzoberfläche leichter, wenn der Schmelz vor der Politur nicht stark aufgeraut wird. Anzumerken ist, dass in der Studie von Zhong et al. Komet Scheiben mit ($< 30 \mu\text{m}$) verwendet wurden [50].

Die Daten der vorliegenden Studie liegen nahe, dass es vielleicht sogar vorteilhaft ist, dass nach der Benutzung der feineren Komet-Wabenscheiben lediglich eine Politur mit den Sof-Lex Scheiben fein und superfein durchzuführen sind, wie Zhong et al. es beschrieben haben. Nach der Bearbeitung der Schmelzoberfläche kam es lediglich zu einer geringen Erhöhung des Rauheitswertes. Der Rauheitsparameter S_a in der Frontzahngruppe erhöhte sich für das Komet 030 um $0,136 \mu\text{m}$ nach approximaler Schmelzreduktion. Der Mittelwert des ESI-Scores lag sowohl für die Komet 045- als auch mit der Komet 030-Scheibe bei 0,63 beziehungsweise 0,69. Das könnte sich darin begründen, dass die feinen Riefen im Schmelz, die zur Einteilung in Score 1 führt,

Diskussion

durch die anschließende Politur mit der Polierscheibe medium entstehen, da die Sof-Lex Scheiben durch Aluminiumoxidpartikeln beschichtet sind [178].

Die Entstehung einer kariösen Läsion ist multifaktoriell. Daher stellt die Erhöhung der Rauheit der Oberfläche und damit eine vermehrte Plaqueretention nur ein Faktor dar. Bei Patient*innen mit einem erhöhten Kariesrisiko sollte jedoch auf eine adäquate Politur mit anschließender Fluoridierung auf keinen Fall verzichtet werden. Zachrisson weist außerdem darauf hin, dass altersbedingte Unterschiede in der Schmelzoberfläche vorkommen. So liegt etwa der Score 2 des ESI im Bereich von normalem adultem Schmelz [100]. Es stellt sich also die Frage, ob leichte Riefen im Schmelz bei älteren Patient*innen eine normale Schmelzqualität darstellen.

Außerdem bleibt zu überlegen, ob nicht durch natürliche Prozesse die Riefen gemildert werden können. Zum einen geschieht dies durch die natürliche Attrition [107]. Zum anderen durch den natürlichen Remineralisationsprozess [100].

Diskussion

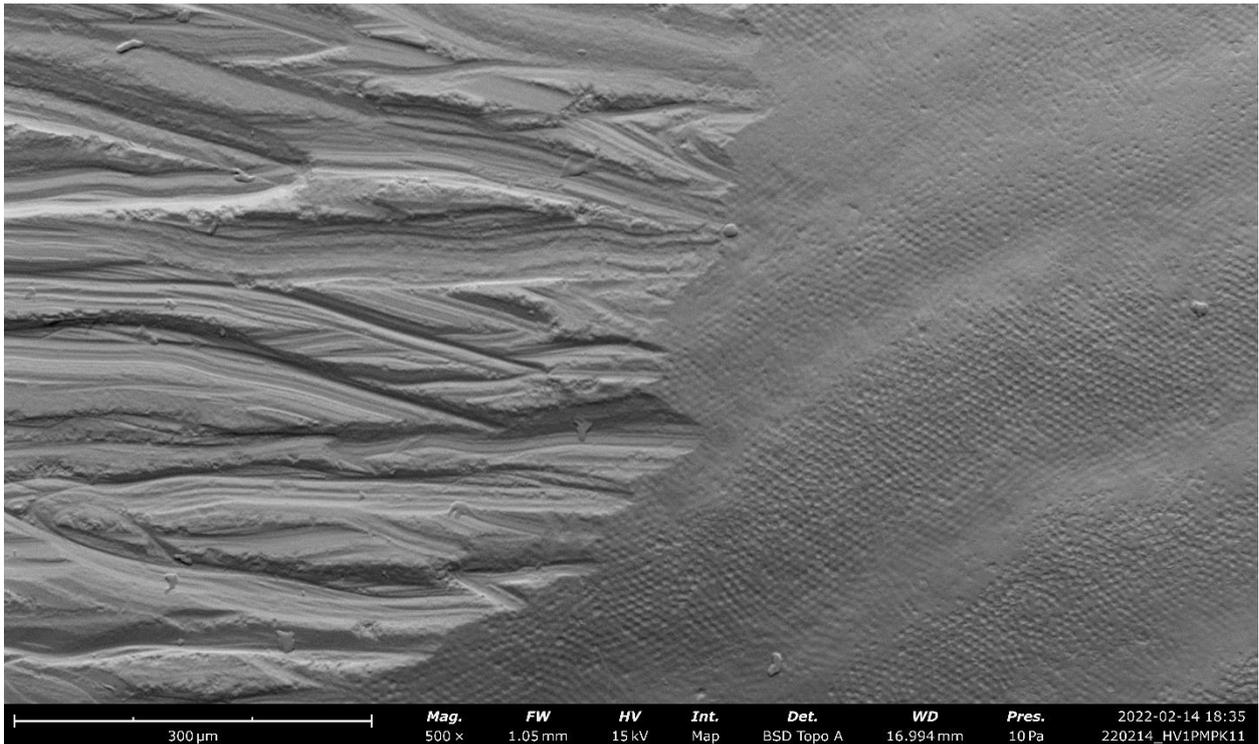


Abbildung 62: rasterelektronenmikroskopische Aufnahme im Randbereich einer Approximalfläche, die mit Profin rot bearbeitet wurde, eigene Aufnahme mit dem Phenom XL.

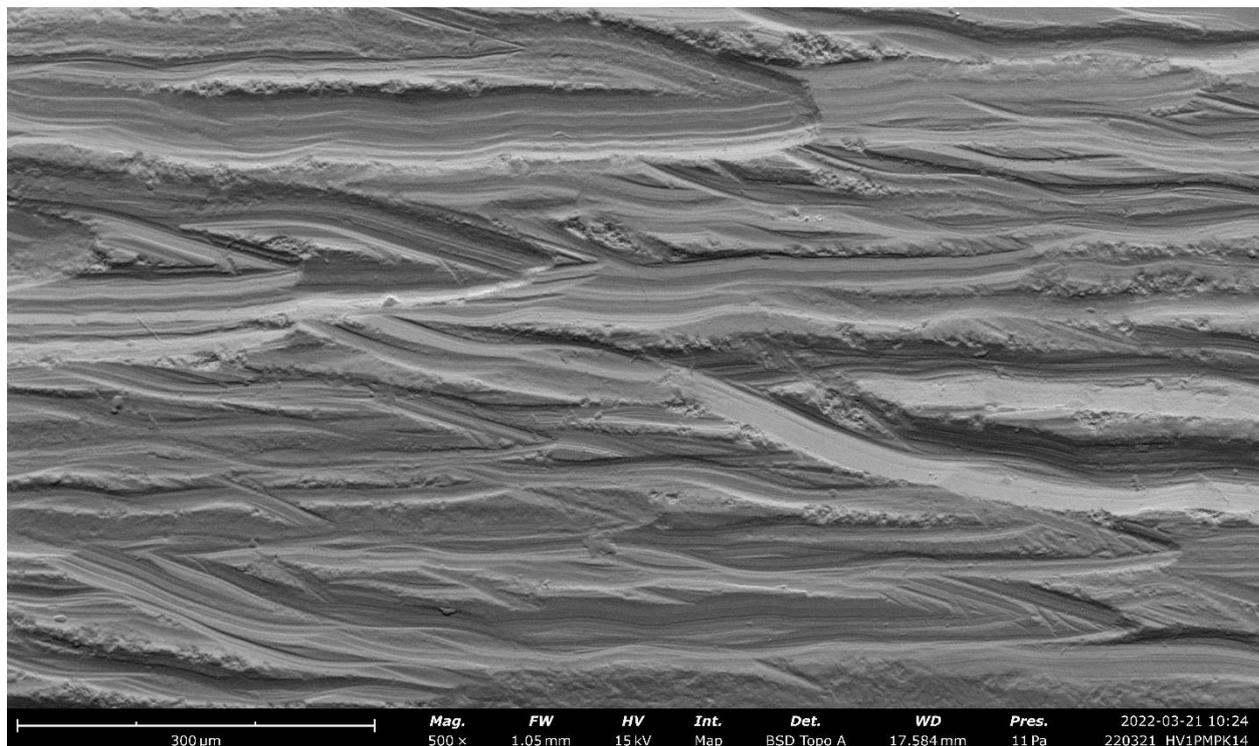


Abbildung 63: rasterelektronenmikroskopische Aufnahme im Bereich der Fläche einer Approximalfläche, die mit Profin rot bearbeitet wurde, eigene Aufnahme mit dem Phenom XL.

Diskussion

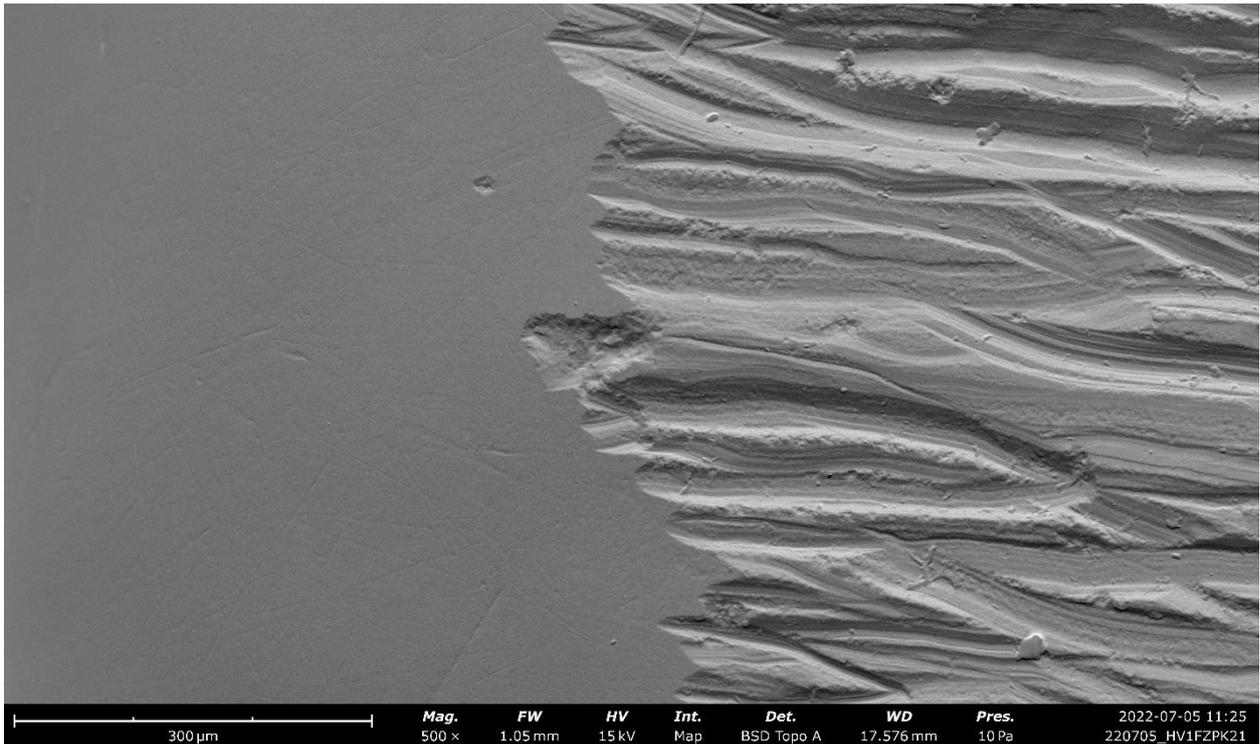


Abbildung 64: rasterelektronenmikroskopische Aufnahme im Randbereich einer Appoximalfläche, die mit Profin lila bearbeitet wurde, eigene Aufnahme mit dem Phenom XL.

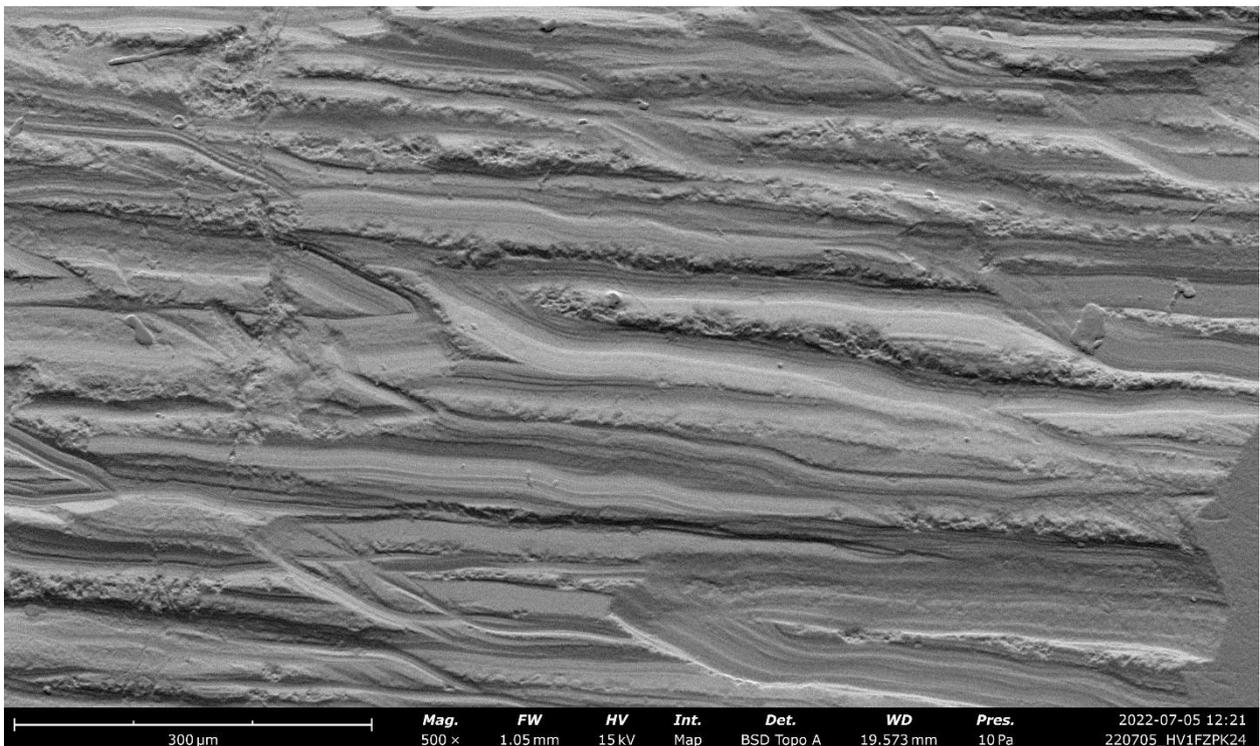


Abbildung 65: rasterelektronenmikroskopische Aufnahme im Bereich der Fläche einer Appoximalfläche, die mit Profin lila bearbeitet wurde, eigene Aufnahme mit dem Phenom XL.

Diskussion

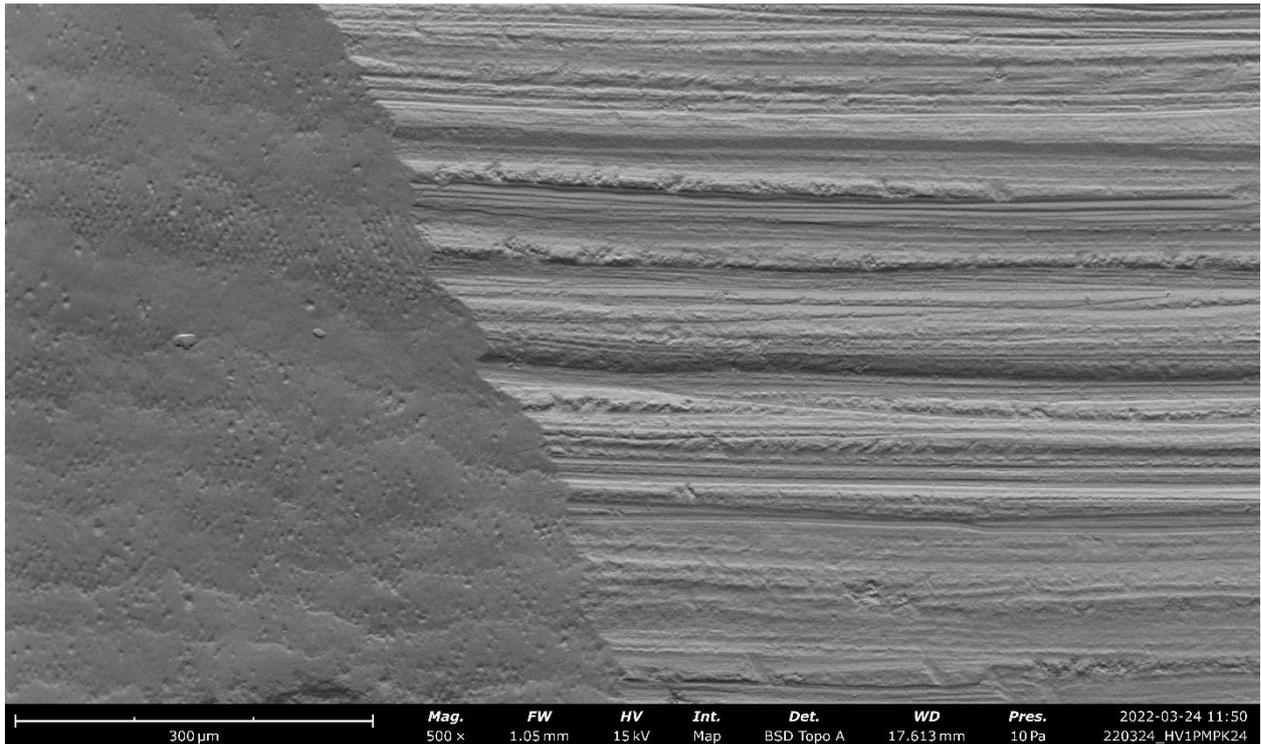


Abbildung 66: rasterelektronenmikroskopische Aufnahme im Randbereich einer Appoximalfläche, die mit Komet 045 bearbeitet wurde, eigene Aufnahme mit dem Phenom XL.

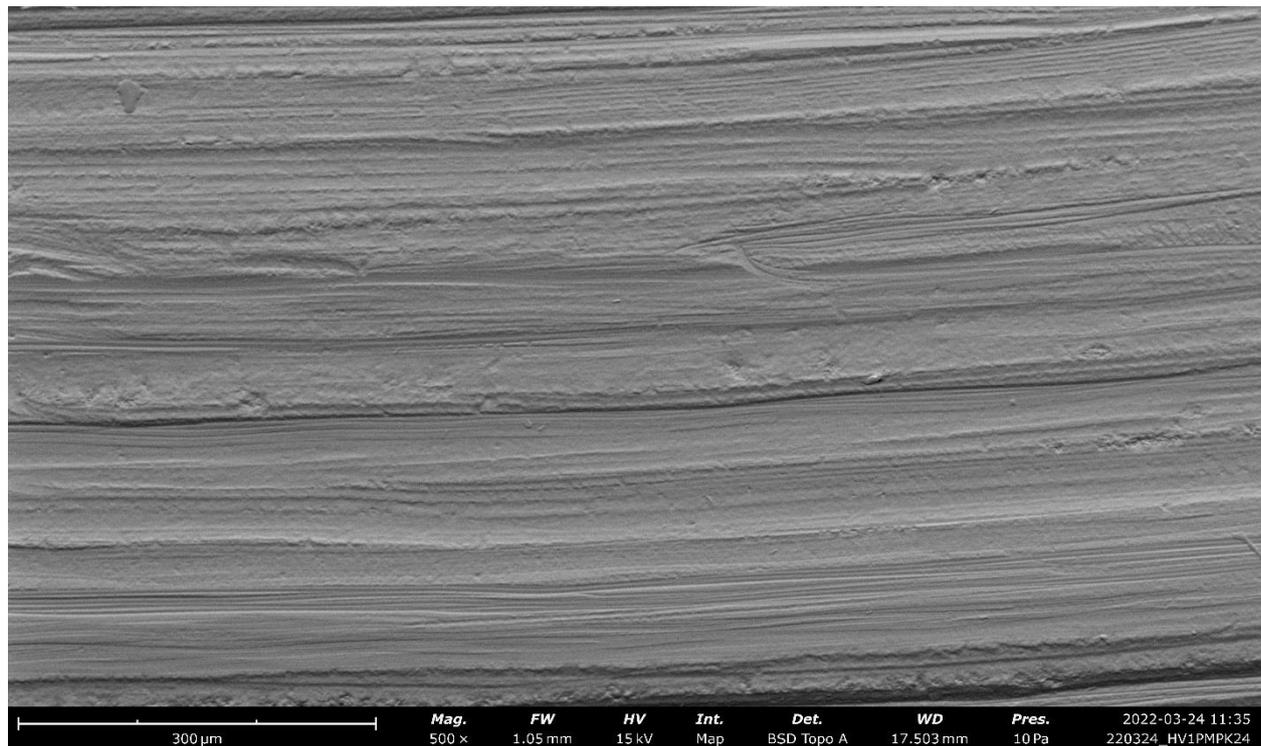


Abbildung 67: rasterelektronenmikroskopische Aufnahme im Bereich der Fläche einer Appoximalfläche, die mit Komet 045 bearbeitet wurde, eigene Aufnahme mit dem Phenom XL.

Diskussion

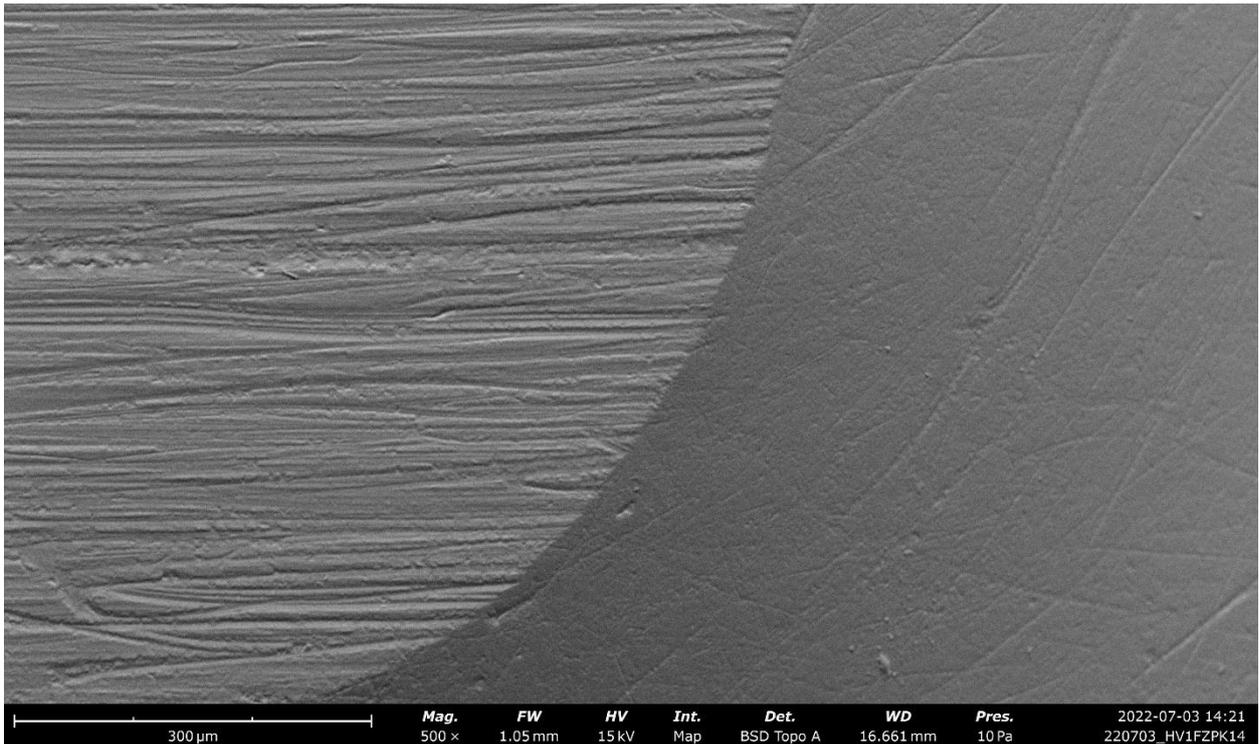


Abbildung 68: rasterelektronenmikroskopische Aufnahme im Randbereich einer Appoximalfläche, die mit Komet 030 bearbeitet wurde, eigene Aufnahme mit dem Phenom XL.

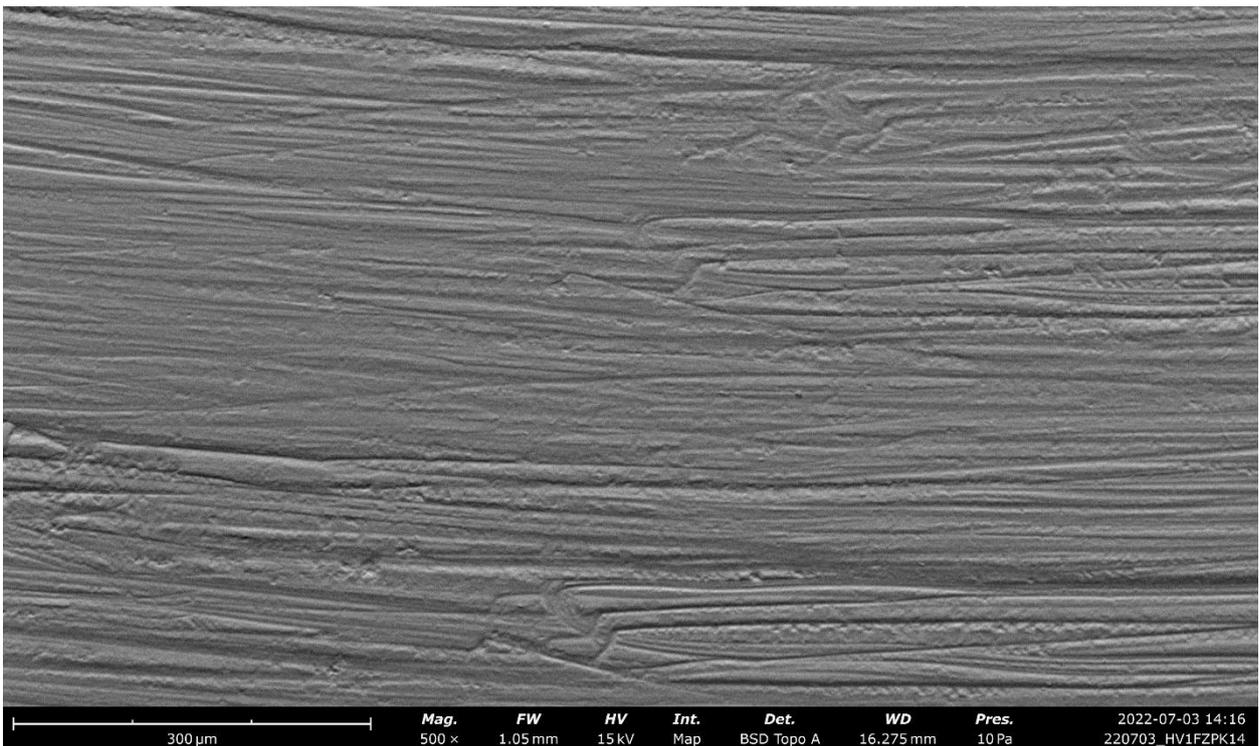


Abbildung 69: rasterelektronenmikroskopische Aufnahme im Bereich der Fläche einer Appoximalfläche, die mit Komet 030 bearbeitet wurde, eigene Aufnahme mit dem Phenom XL.

Diskussion

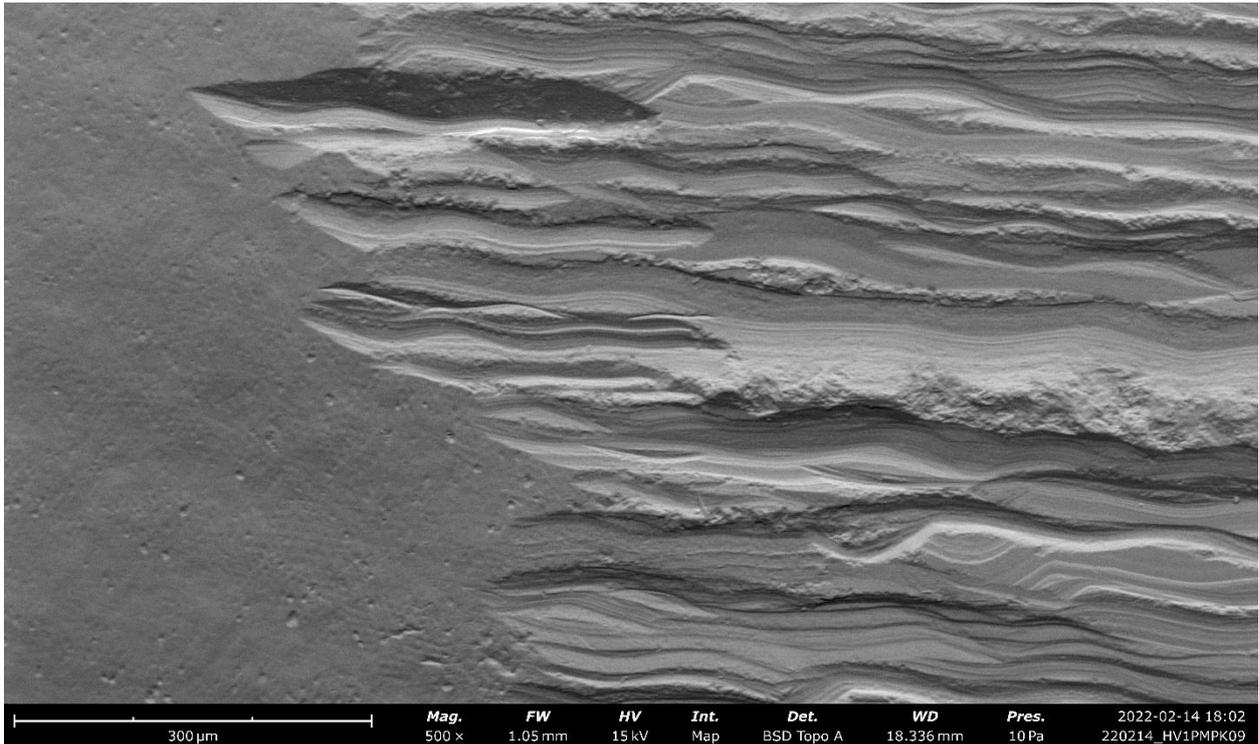


Abbildung 70: rasterelektronenmikroskopische Aufnahme im Randbereich einer Approximalfläche, die mit dem CA grau-Streifen bearbeitet wurde, eigene Aufnahme mit dem Phenom XL.

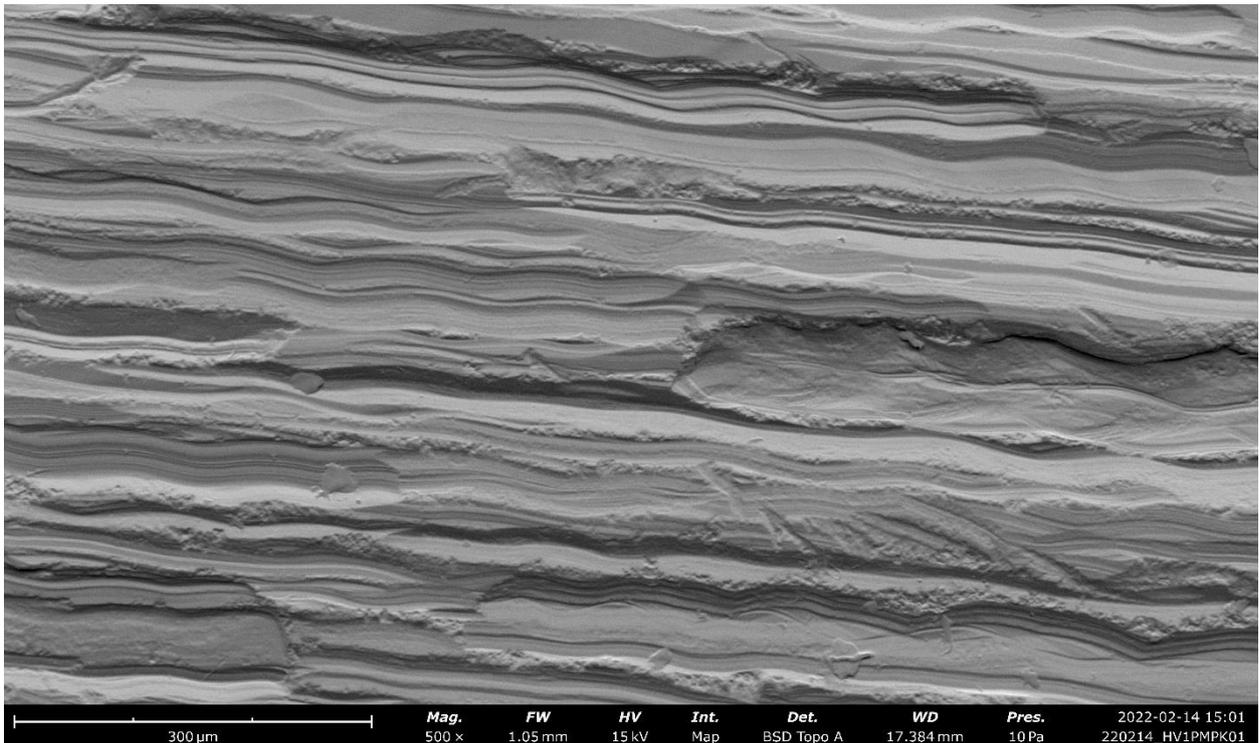


Abbildung 71: rasterelektronenmikroskopische Aufnahme im Bereich der Fläche einer Approximalfläche, die mit dem CA grau-Streifen bearbeitet wurde, eigene Aufnahme mit dem Phenom XL.

Diskussion

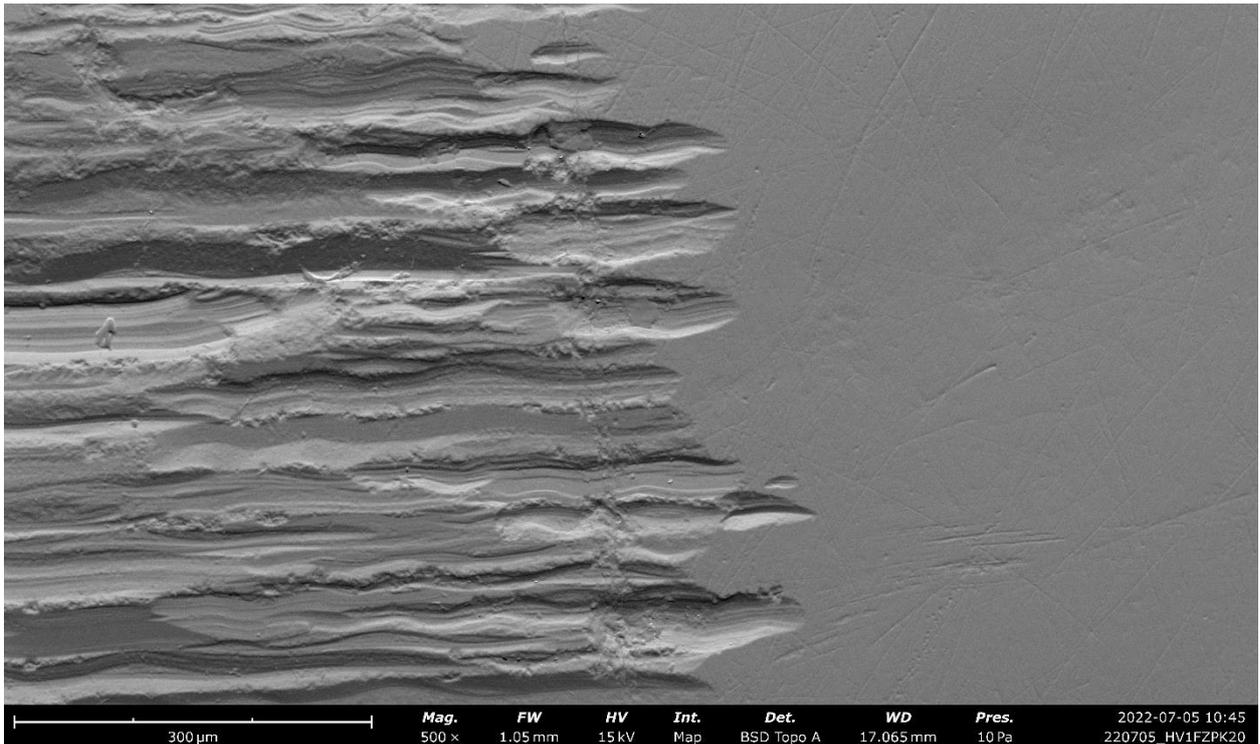


Abbildung 72: rasterelektronenmikroskopische Aufnahme im Randbereich einer Approximalfläche, die mit dem CA rot-Streifen bearbeitet wurde, eigene Aufnahme mit dem Phenom XL.

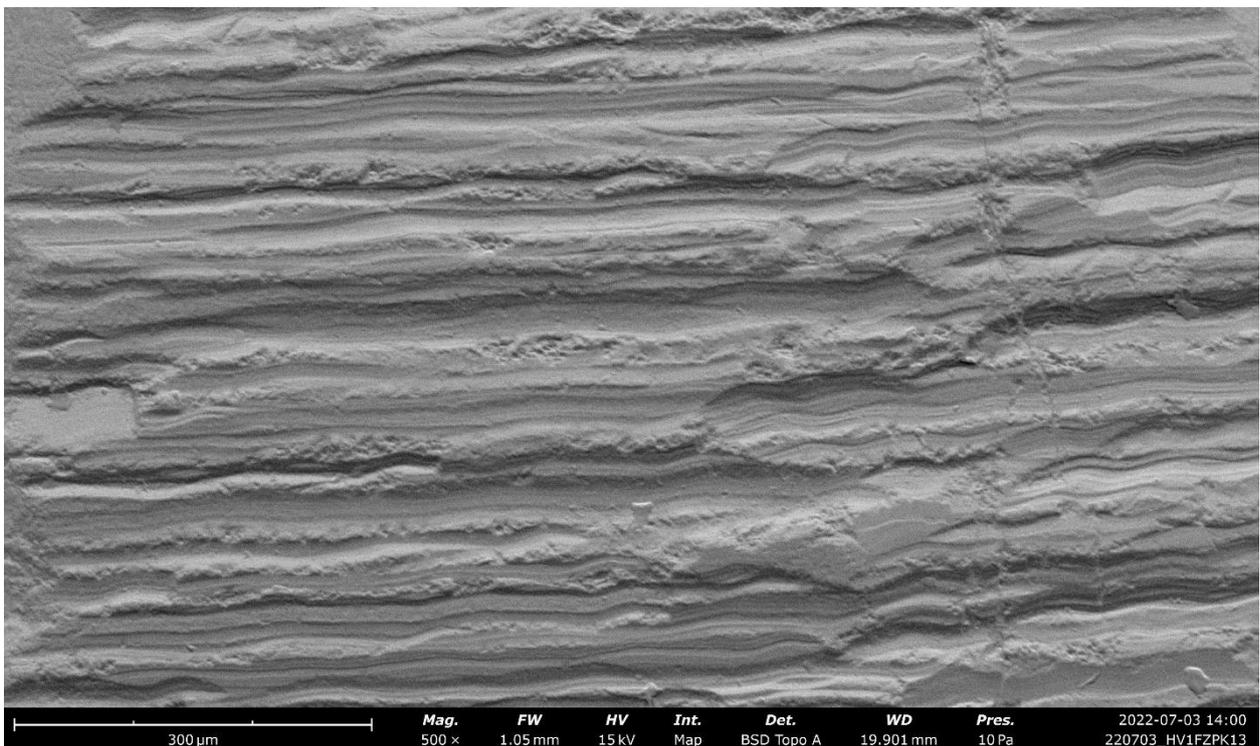


Abbildung 73: rasterelektronenmikroskopische Aufnahme im Bereich der Fläche einer Approximalfläche, die mit dem CA rot-Streifen bearbeitet wurde, eigene Aufnahme mit dem Phenom XL

6.4.3 Diskussion der Ergebnisse der Verschleißmessung

Die Studie von Livas et al. zeigte eine Reduktion der Rauheitsmesswerte als Zeichen eines progressiven Verschleißes des Arbeitsendes bei fünf aufeinander folgenden Anwendungen für jeweils 20 Sekunden. Es wurden quantitativ fünf Systeme durch die Messung von Linienparameter miteinander verglichen. In dieser Studie konnte kein Unterschied zwischen den verschiedenen Systemen festgestellt werden [117]. In der vorliegenden Studie konnten jedoch Anzeichen für unterschiedliches Verschleißverhalten zwischen den untersuchten Systemen festgestellt werden, sowohl bei der qualitativen als auch bei der quantitativen Auswertung. Diese Beobachtung steht im Einklang zu den rasterelektronenmikroskopischen Untersuchungen von Grippaudo et al. Auch sie konnten ein unterschiedliches Abrasionsverhalten zwischen den untersuchten Systemen (HORICO, Komet) feststellen [109].

Sowohl für das Profin-System als auch für das Komet-System wurden bei der Verschleißmessung in dieser Studie dünnere ASR-Instrumente verwendet. Daher wäre es möglich, dass die in der Studie verwendeten ASR-Instrumente Komet-Scheiben 045 und Komet 030 ein anderes Verschleißverhalten zeigen als die Komet-Scheiben 025 und 020. Die Ergebnisse der rein exemplarischen Untersuchung der verwendeten ASR-Instrumenten sollte durch eine neue Versuchsreihe mit einer größeren Stichprobe bestätigt werden.

7. Kurzfassung der Ergebnisse und Schlussfolgerungen

In Hinblick auf die Effizienz der in dieser Studie untersuchten ASR-Instrumente können die in der Zielstellung formulierten Fragen wie folgt beantwortet werden:

- Die untersuchten ASR-Instrumente unterschieden sich in Hinblick auf den Abtrag signifikant. Das Komet-System konnte in 30 Sekunden sowohl in der Frontzahn- (FZ) als auch in der Prämolarengruppe (PM) den höchsten Abtrag (FZ: 0,308 mm; PM: 0,253 mm) erzielen. Bei der Anwendung des Profin-Systems kam es zu einem Abtrag von 0,163 mm (FZ) und 0,15 mm (PM). Das CA-System erreichte für beide Gruppen den geringsten Abtrag 0,093 mm (PM) und 0,088 mm (FZ). Auch kam es beim CA-System zu einem Unterschied in der Abtragsleistung der zwei Streifen.
- Bei allen untersuchten ASR-Instrumenten kam es nach der Bearbeitung der Oberfläche zu einem signifikanten Anstieg der gemessenen Rauheitsparameter (Sa, Sq, Sdr, Svk). In der Prämolarengruppe führte die Komet 045 Scheibe zu einer signifikant geringeren Erhöhung der Rauheitsparameter im Vergleich zu Profin rot und CA grau. Die Profin rot und CA grau Streifen vergrößerten die Schmelzoberfläche signifikant mehr und zeigten eine größere Tiefe der Täler unter dem Kernbereich. Daher könnte dies das Risiko für eine vermehrte Plaqueakkumulation erhöhen. Auf eine anschließende Politur ist demnach nicht zu verzichten.
- Gleiches galt für die Frontzahngruppe. Auch hier kam es bei der Anwendung der Komet 030 Scheibe zum geringsten Anstieg der Rauheitsparameter, für den Parameter Sdr war er nicht signifikant. Eventuell kann bei der Wahl dieses ASR-Instruments sogar demnach auf eine Politurstufe (SofLex medium) verzichtet werden. Dies würde die Dauer der Politur pro Approximalfläche klinisch verkürzen.
- Bei allen Proben konnten nach 45 Sekunden Politur wieder Rauheitswerte vergleichbar mit unbehandeltem Schmelz erreicht werden.
- Die rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen zeigten jedoch vereinzelt persistierende Riefen im Schmelz und einen ESI-Score von 3 für das Profin (rot, lila) und CA-System (grau, rot).
- Das Profin-System (lila) und das CA-System (grau, rot) zeigten progressive Anzeichen für Verschleiß. Es dominierte der Verlust einzelner Diamantpartikel und Makrochipping. Das CA-System zeigte bei der qualitativen Untersuchung Hinweise für einen Verschleiß der Matrix. Bei den Komet-Scheiben (025, 020) dominierte Mikrochipping. Demnach konnten Unterschiede im Verschleißverhalten der untersuchten Instrumente festgestellt werden.
- Als Ergebnis dieser Studie kann konkludiert werden, dass das Komet-System in einem definierten Zeitintervall zu einem größeren Schmelzabtrag führt. Die Schmelzproben zeigten ein regelmäßiges Profil. Nach anschließender Politur

Kurzfassung der Ergebnisse und Schlussfolgerungen

waren die Schmelzproben so glatt wie unbehandelter Schmelz und zeigten sowohl innerhalb der Fläche als auch im Randbereich gute bis sehr gut polierte Schmelzoberflächen.

- Das Profin-System führte zu einem klinisch relevantem Abtrag ($>0,1$ mm) der Schmelzoberfläche für die Frontzahn- und für die Prämolarengruppe. Die Schmelzoberflächen zeigten nach der Bearbeitung raue Oberflächen mit tiefen Riefen. Nach der Politur waren die Schmelzoberflächen jedoch vergleichbar mit unbehandeltem Schmelz. Die qualitative Auswertung der rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen zeigte vereinzelte persistierende Riefen.
- Das CA-System führte sowohl in der Prämolaren- und der Frontzahngruppe zum geringsten Abtrag im untersuchten Zeitintervall. Auch war der Abtrag der verschiedenen Streifen unterschiedlich, obwohl diese aus der gleichen Charge kamen. Demnach ist die Abtragsleistung dieses Systems nicht vorhersagbar. Das CA-System hinterließ Schmelzoberflächen mit stark erhöhten Rauheitswerten. Diese waren nach anschließender Politur so glatt wie unbehandelter Schmelz. Die qualitative Beurteilung der Schmelzoberfläche zeigte einzelne Furchen im Schmelz, die trotz Politur persistierten.
- Auf eine anschließende Politur der Schmelzoberfläche sollte in keinem Fall demnach verzichtet werden. Die Verwendung von ASR-Systemen, die initial eine glattere Schmelzoberfläche hinterlassen, ist jedoch vorteilhaft.

8. Ausblick

Bei künftigen Untersuchungen sollte das Verschleißverhalten der verschiedenen Systeme nicht nur exemplarisch untersucht werden. Außerdem könnte eine EDX-Analyse Aufschluss über die Zusammensetzung der abrasiven Matrix geben und Hinweise dafür liefern, warum es bei einigen ASR-Instrumenten zu einem schnelleren Verschleiß kommt als bei anderen.

Der hier vorgestellte Versuchsaufbau kann in weiteren Studien zum Vergleich verschiedener Instrumente zur approximalen Schmelzreduktion angewandt werden.

9. Literaturverzeichnis

1. Hassan AH, Hobani NM, Almokri SM, Almokri NM, Alotibi FG, Alshouibi EN. Effect of anterior crowding or spacing on oral health-related quality of life: a cross-sectional study. *Patient Preference and Adherence*. 2018;12:461-465.
2. Ley M, Müller-Hartwich R, Jost-Brinkmann P-G. Approximale Schmelzreduktion - wann und wie? *ZWR - Das Deutsche Zahnärzteblatt*. 2005;114(10):471-474.
3. Hellak A, Riepe EM, Korbmacher-Steiner HM. Approximale Schmelzreduktion und ihre Nebenwirkungen. *Kieferorthopädie*. 2012;63(12):1595-1602.
4. Zingler S, Sommer A, Sen S, Saure D, Langer J, Guillon O, Lux CJ. Efficiency of powered systems for interproximal enamel reduction (IER) and enamel roughness before and after polishing-an in vitro study. *Clinical Oral Investigations*. 2016;20(5):933-942.
5. Johner AM, Pandis N, Dudic A, Kiliaridis S. Quantitative comparison of 3 enamel-stripping devices in vitro: how precisely can we strip teeth? *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*. 2013;143(4):168-172.
6. De Felice ME, Nucci L, Fiori A, Flores-Mir C, Perillo L, Grassia V. Accuracy of interproximal enamel reduction during clear aligner treatment. *Progress in Orthodontics*. 2020;21(1):28 p. 1-7.
7. Lombardo L, Guarneri MP, D'Amico P, Molinari C, Meddis V, Carlucci A, Siciliani G. Orthofile(R): a new approach for mechanical interproximal reduction : a scanning electron microscopic enamel evaluation. *Journal of Orofacial Orthopedics / Fortschritte der Kieferorthopädie*. 2014;75(3):203-212.
8. Silvestrini Biavati F, Schiaffino V, Signore A, De Angelis N, Lanteri V, Ugolini A. Evaluation of enamel surfaces after different techniques of interproximal enamel reduction. *Journal of Functional Biomaterials*. 2023;14(2):110 p.1-10.
9. Danesh G, Hellak A, Lippold C, Ziebura T, Schäfer E. Enamel surfaces following interproximal reduction with different methods. *Angle Orthodontist*. 2007;77(6):1004-1010.
10. Lione R, Gazzani F, Pavoni C, Guarino S, Tagliaferri V, Cozza P. In vitro and in vivo evaluation of diamond-coated strips. *Angle Orthodontist*. 2017;87(3):455-459.
11. Hein C, Jost-Brinkmann P-G, Schillai G. Oberflächenbeschaffenheit des Schmelzes nach approximalem Beschleifen-Rasterelektronenmikroskopische Beurteilung unterschiedlicher Polierverfahren. *Fortschritte der Kieferorthopädie* 1990;51(6):327-335.
12. Chudasama D, Sheridan JJ. Guidelines for contemporary air-rotor stripping. *Journal of Clinical Orthodontics*. 2007;41(6):315-320.
13. Fillion D. Zur approximalen Schmelzreduktion in der Erwachsenenkieferorthopädie. *Information aus Orthodontie und Kieferorthopädie* 1995;27:47-105.
14. Ihlow D, Janson I, Fanghänel J, Kirschneck C, Kubein-Meesenburg D, Proff P. Kieferorthopädische Retention : Kriterien, Regeln und Maßnahmen der Rezidivprophylaxe / herausgegeben von Dankmar Ihlow, Ingrid Rudzki ; Autoren: Jochen Fanghänel, Dankmar Ihlow, Christian Kirschneck, Dietmar Kubein-Meesenburg, Peter Proff, Ingrid Rudzki. Stuttgart ; New York: Georg Thieme Verlag; 2018. 288 p.216-219
15. Sarver DM. Enameloplasty and esthetic finishing in orthodontics-identification and treatment of microesthetic features in orthodontics part 1. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry* 2011;23(5):296-302.

Literaturverzeichnis

16. Sehgal M, Sharma P, Juneja A, Kumar P, Verma A, Chauhan V. Effect of different stripping techniques on pulpal temperature: in vitro study. *Dental Press Journal of Orthodontics*. 2019;24(1):39-43.
17. Boese LR. Fiberotomy and reproximation without lower retention nine years in retrospect: part II. *Angle Orthodontist*. 1980;50(3):169-178.
18. Barrer HG. Protecting the integrity of mandibular incisor position through keystone procedure and spring retainer appliance. *Journal of Clinical Orthodontics*. 1975;9(8):486-494.
19. Lautenbach E. *Wörterbuch Zahnmedizin : Zahn, Mund, Kiefer, Gesicht / Ernst Lautenbach*. Hanau: Verlag für Zahnmedizin; 1992. 1888 p.830
20. Sarig R, Lianopoulos NV, Hershkovitz I, Vardimon AD. The arrangement of the interproximal interfaces in the human permanent dentition. *Clinical Oral Investigations*. 2013;17(3):731-738.
21. Pindoria J, Fleming PS, Sharma PK. Inter-proximal enamel reduction in contemporary orthodontics. *British Dental Journal*. 2016;221(12):757-763.
22. Ballard ML. Asymmetry in Tooth Size: A Factor in the Etiology, Diagnosis and Treatment of Malocclusion. *The Angle Orthodontist*. 1944;14(3):67-70.
23. Bolton WA. Disharmony in tooth size and its relation to the analysis and treatment of malocclusion. *The Angle Orthodontist*. 1958;28(3):113-130.
24. Bolton WA. The clinical application of a tooth-size analysis. *American Journal of Orthodontics*. 1962;48(7):504-529.
25. Begg PR. Stone age man's dentition: with reference to anatomically correct occlusion, the etiology of malocclusion, and a technique for its treatment. *American Journal of Orthodontics*. 1954;40(4):298-312.
26. Corruccini RS. Australian aboriginal tooth succession, interproximal attrition, and Begg's theory. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*. 1990;97(4):349-357.
27. Hudson AL. A study of the effects of mesiodistal reduction of mandibular anterior teeth. *American Journal of Orthodontics*. 1956;42(8):615-624.
28. Peck H, Peck S. An index for assessing tooth shape deviations as applied to the mandibular incisors. *American Journal of Orthodontics*. 1972;61(4):384-401.
29. Sheridan JJ. Air-rotor stripping. *Journal of Clinical Orthodontics*. 1985;19(1):43-59.
30. de Harfin JF. Interproximal stripping for the treatment of adult crowding. *Journal of Clinical Orthodontics*. 2000;34(7):424-433.
31. Meredith L, Mei L, Cannon RD, Farella M. Interproximal reduction in orthodontics: why, where, how much to remove? *Australasian Orthodontic Journal*. 2017;33(2):150-157.
32. Lapenaite E, Lopatiene K. Interproximal enamel reduction as a part of orthodontic treatment. *Stomatologija*. 2014;16(1):19-24.
33. Rossouw PE, Tortorella A. Enamel reduction procedures in orthodontic treatment. *Journal of the Canadian Dental Association*. 2003;69(6):378-383.
34. Haubrich J. Praxistipp: Approximale Schmelzreduktion mit dem Ortho-Strips-System. *Kieferorthopädie*. 2007;21(2):99-102.
35. Tarnow DP, Magner AW, Fletcher P. The effect of the distance from the contact point to the crest of bone on the presence or absence of the interproximal dental papilla. *Journal of Periodontology*. 1992;63(12):995-996.
36. Tuverson DL. Anterior interocclusal relations. Part II. *American Journal of Orthodontics*. 1980;78(4):371-393.

Literaturverzeichnis

37. Baysal A, Uysal T, Usumez S. Temperature rise in the pulp chamber during different stripping procedures. *Angle Orthodontist*. 2007;77(3):478-482.
38. Paskow H. Self-alignment following interproximal stripping. *American Journal of Orthodontics*. 1970;58(3):240-249.
39. Boese LR. Fiberotomy and reproximation without lower retention, nine years in retrospect: part I. *Angle Orthodontist*. 1980;50(2):88-97.
40. Zachrisson BU. JCO/interviews Dr. Bjorn U. Zachrisson on excellence in finishing. Part 2. *Journal of Clinical Orthodontics*. 1986;20(8):536-556.
41. Gilmore CA, Little RM. Mandibular incisor dimensions and crowding. *American Journal of Orthodontics*. 1984;86(6):493-502.
42. Betteridge MA. The effects of interdental stripping on the labial segments evaluated one year out of retention. *British Journal of Orthodontics*. 1981;8(4):193-197.
43. Blake M, Bibby K. Retention and stability: a review of the literature. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*. 1998;114(3):299-306.
44. Bennett JC, McLaughlin RP. Kieferorthopädisches Management mit der vorprogrammierten Apparatur : Planung und Durchführung in Fallbeispielen ; [mit 15 Tabellen] / J. C. Bennett / R. P. McLaughlin. Dt. Lizenzausg. ed. Köln: Deutscher Ärzteverlag; 1998. 380 p.4
45. Andrews LF. The six keys to normal occlusion. *American Journal of Orthodontics*. 1972;62(3):296-309.
46. Bennett J C. The future of clinical orthodontics: importance of incisor crown form and size. In Carels C, Willems G (editors) In: *The future of orthodontics*. Belgium: Leuven University Press; 1998. 281 p.213-224.
47. Jost-Brinkmann PG, Otani H, Nakata M. Surface condition of primary teeth after approximal grinding and polishing. *Journal of Clinical Pediatric Dentistry*. 1991;16(1):41-45.
48. Nakhjavani YB, Nakhjavani FB, Jafari A. Mesial stripping of mandibular deciduous canines for correction of permanent lateral incisors. *Journal of Clinical Pediatric Dentistry*. 2017;10(3):229-233.
49. Miethke RR, Jost-Brinkmann PG. Interproximal enamel reduction. In: Tuncay OC, editor. *The Invisalign system*. London: Quintessence Publishing; 2006. 330 p. 255-270.
50. Zhong M, Jost-Brinkmann P-G, Zellmann M, Zellmann S, Radlanski RJ. Clinical evaluation of a new technique for interdental enamel reduction. *Journal of Orofacial Orthopedics / Fortschritte der Kieferorthopädie*. 2000;61(6):432-439.
51. Germeç D, Taner TU. Effects of extraction and nonextraction therapy with air-rotor stripping on facial esthetics in postadolescent borderline patients. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*. 2008;133(4):539-549.
52. Lucchese A, Porcù F, Dolci F. Effects of various stripping techniques on surface enamel. *Journal of Clinical Orthodontics*. 2001;35(11):691-695.
53. Bhambri E, Kalra JPS, Ahuja S, Bhambri G. Evaluation of enamel surfaces following interproximal reduction and polishing with different methods: A scanning electron microscope study. *Indian Journal of Dental Sciences*. 2017;9(3):153-159.
54. Bollen CM, Lambrechts P, Quirynen M. Comparison of surface roughness of oral hard materials to the threshold surface roughness for bacterial plaque retention: a review of the literature. *Dental Materials*. 1997;13(4):258-269.
55. Radlanski RJ, Jäger A, Schwestka R, Bertzbach F. Plaque accumulations caused by interdental stripping. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*. 1988;94(5):416-420.

Literaturverzeichnis

56. Radlanski RJ, Jäger A, Zimmer B, Schwestka R, Bertzbach F. Ergebnisse rasterelektronenmikroskopischer Untersuchungen zum interdentalen Strippen in vitro. *Fortschritte der Kieferorthopädie*. 1989;50(4):276-284.
57. Radlanski RJ, Jäger A, Zimmer B. Morphology of interdentally stripped enamel one year after treatment. *Journal of Clinical Orthodontics*. 1989;23(11):748-750.
58. El-Mangoury NH, Moussa MM, Mostafa YA, Girgis AS. In-vivo remineralization after air-rotor stripping. *Journal of Clinical Orthodontics*. 1991;25(2):75-78.
59. Twesme DA, Firestone AR, Heaven TJ, Feagin FF, Jacobson A. Air-rotor stripping and enamel demineralization in vitro. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*. 1994;105(2):142-152.
60. Jarjoura K, Gagnon G, Nieberg L. Caries risk after interproximal enamel reduction. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*. 2006;130(1):26-30.
61. Koretsi V, Chatzigianni A, Sidiropoulou S. Enamel roughness and incidence of caries after interproximal enamel reduction: a systematic review. *Orthodontics & Craniofacial Research*. 2014;17(1):1-13.
62. Zachrisson BU, Nyøygaard L, Mobarak K. Dental health assessed more than 10 years after interproximal enamel reduction of mandibular anterior teeth. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*. 2007;131(2):162-169.
63. Zachrisson BU, Minster L, Øgaard B, Birkhed D. Dental health assessed after interproximal enamel reduction: caries risk in posterior teeth. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*. 2011;139(1):90-98.
64. Årtun J, Osterberg SK, Kokich VG. Long-term effect of thin interdental alveolar bone on periodontal health after orthodontic treatment. *Journal of Periodontology*. 1986;57(6):341-346.
65. Zach L, Cohen G. Pulp response to externally applied heat. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology*. 1965;19(4):515-530.
66. Omer ABAH, Sanea J. A comparison of thermal changes among four different interproximal reduction systems in orthodontics. *Journal of Contemporary Dental Practice*. 2019;20(6):738-742.
67. Gazzani F, Lione R, Pavoni C, Mampieri G, Cozza P. Comparison of the abrasive properties of two different systems for interproximal enamel reduction: oscillating versus manual strips. *BMC Oral Health*. 2019;19(1):247.
68. Zhong M, Jost-Brinkmann PG, Radlanski RJ, Miethke RR. SEM evaluation of a new technique for interdental stripping. *Journal of Clinical Orthodontics*. 1999;33(5):286-292.
69. Ihlow D, Kubein-Meesenburg D, Hunze J, Dathe H, Planert J, Schwestka-Polly R, Nägerl H. Curvature morphology of the mandibular dentition and the development of concave-convex vertical stripping instruments. *Journal of Orofacial Orthopedics / Fortschritte der Kieferorthopädie*. 2002;63(4):274-282.
70. Ang AG, Steegmans PA, Kerdijk W, Livas C, Ren Y. Radiographic technique and brackets affect measurements of proximal enamel thickness on mandibular incisors. *European Journal of Orthodontics*. 2017;39(1):25-30.
71. Richter AE, Arruda AO, Peters MC, Sohn W. Incidence of caries lesions among patients treated with comprehensive orthodontics. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*. 2011;139(5):657-664.
72. Joseph VP, Rossouw PE, Basson NJ. Orthodontic microabrasive reproximation. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*. 1992;102(4):351-359.
73. Rossouw PE, Tortorella A. A pilot investigation of enamel reduction procedures. *Journal of the Canadian Dental Association*. 2003;69(6):384-388.

Literaturverzeichnis

74. Gupta P, Gupta N, Patel N, Gupta R, Sandhu GS, Naik C. Qualitative and quantitative evaluation of enamel after various post-stripping polishing methods: an in vitro study. *Australasian Orthodontic Journal* 2012;28(2):240-244.
75. Arman A, Cehreli SB, Ozel E, Arhun N, Çetinşahin A, Soyman M. Qualitative and quantitative evaluation of enamel after various stripping methods. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*. 2006;130(2):131.e137-131.e114.
76. Sheridan JJ, Ledoux PM. Air-rotor stripping and proximal sealants. An SEM evaluation. *Journal of Clinical Orthodontics*. 1989;23(12):790-794.
77. Kaswan N, Munjal P, Khanna P, Mittal S, Arora N, Chhabra S. Scanning electron microscopic analysis of enamel morphology post interproximal reduction, finishing and sealant application: an in vitro study. *Iranian Journal of Orthodontics*. 2021;16(2):1-11.
78. Tell RT, Sydiskis RJ, Isaacs RD, Davidson WM. Long-term cytotoxicity of orthodontic direct-bonding adhesives. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*. 1988;93(5):419-422.
79. Ben Mohimnd H, Kaaouara Y, Azaroual F, Zaoui F, Bahije L, Benyahia H. Enamel protection after stripping procedures: an in vivo study. *International Orthodontics*. 2019;17(2):243-248.
80. Danesh G, Podstawa PKK, Schwartz C-E, Kirschneck C, Bizhang M, Arnold WH. Depth of acid penetration and enamel surface roughness associated with different methods of interproximal enamel reduction. *PLoS ONE*. 2020;15(3):e0229595.1-12.
81. Giulio AB, Matteo Z, Serena IP, Silvia M, Luigi C. In vitro evaluation of casein phosphopeptide-amorphous calcium phosphate (CPP-ACP) effect on stripped enamel surfaces. A SEM investigation. *Journal of Dentistry*. 2009;37(3):228-232.
82. Bayram M, Kusgoz A, Yesilyurt C, Nur M. Effects of casein phosphopeptide-amorphous calcium phosphate application after interproximal stripping on enamel surface: an in-vivo study. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*. 2017;151(1):167-173.
83. Chee D, Ren C, Yang Y. An overview on interproximal enamel reduction. *Dentistry - Open Journal*. 2014;1(1):14-18.
84. Stroud JL, English J, Buschang PH. Enamel thickness of the posterior dentition: its implications for nonextraction treatment. *Angle Orthodontist*. 1998;68(2):141-146.
85. Gillings B, Buonocore M. An investigation of enamel thickness in human lower incisor teeth. *Journal of Dental Research*. 1961;40:105-118.
86. Hall NE, Lindauer SJ, Tufekçi E, Shroff B. Predictors of variation in mandibular incisor enamel thickness. *Journal of the American Dental Association*. 2007;138(6):809-815.
87. Harris EF, Hicks JD. A radiographic assessment of enamel thickness in human maxillary incisors. *Archives of Oral Biology*. 1998;43(10):825-831.
88. Stroud JL, Buschang PH, Goaz PW. Sexual dimorphism in mesiodistal dentin and enamel thickness. *Dentomaxillofacial Radiology*. 1994;23(3):169-171.
89. Vellini-Ferreira F, Cotrim-Ferreira FA, Ribeiro JA, Ferreira-Santos RI. Mapping of proximal enamel thickness in permanent teeth. *Brazilian Journal of Oral Sciences*. 2012;11:481-485.
90. Sarig R, Hershkovitz I, Shvalb N, Sella-Tunis T, May H, Vardimon AD. Proximal attrition facets: morphometric, demographic, and aging characteristics. *European Journal of Oral Science*. 2014;122(4):271-278.
91. Grine FE, Stevens NJ, Jungers WL. An evaluation of dental radiograph accuracy in the measurement of enamel thickness. *Archives of Oral Biology*. 2001;46(12):1117-1125.

Literaturverzeichnis

92. Sarig R, Vardimon AD, Sussan C, Benny L, Sarne O, Hershkovitz I, Shpack N. Pattern of maxillary and mandibular proximal enamel thickness at the contact area of the permanent dentition from first molar to first molar. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*. 2015;147(4):435-444.
93. Radlanski RJ. *Orale Struktur- und Entwicklungsbiologie / Ralf J. Radlanski*. Berlin [u.a]: Quintessenz-Verlag; 2011. 606 p.199-255
94. Risnes S, Saeed M, Sehic A. Scanning electron microscopy (SEM) methods for dental enamel. In: Papagerakis P, editor. *Odontogenesis: Methods and Protocols*. New York, NY: Springer New York; 2019. 565 p. 293-308.
95. Mann AB, Dickinson ME. Nanomechanics, chemistry and structure at the enamel surface. *Monographs in Oral Science*. 2006;19:105-131.
96. Besnard C, Harper RA, Salvati E, Moxham TEJ, Romano Brandt L, Landini G, Shelton RM, Korsunsky AM. Analysis of in vitro demineralised human enamel using multi-scale correlative optical and scanning electron microscopy, and high-resolution synchrotron wide-angle X-ray scattering. *Materials & Design*. 2021;206:109739.
97. Wilmers J, Bargmann S. Nature's design solutions in dental enamel: Uniting high strength and extreme damage resistance. *Acta Biomaterialia*. 2020;107:1-24.
98. Lacruz RS, Habelitz S, Wright JT, Paine ML. Dental enamel formation and implications for oral health and disease. *Physiological Reviews*. 2017;97(3):939-993.
99. Carvalho TS, Lussi A. Age-related morphological, histological and functional changes in teeth. *Journal of Oral Rehabilitation*. 2017;44(4):291-298.
100. Zachrisson BU, Årthun J. Enamel surface appearance after various debonding techniques. *American Journal of Orthodontics*. 1979;75(2):121-137.
101. Sanderink RBA, Bernhardt H, Knoke M, Meyer J, Weber C, Weiger R. *Curriculum orale Mikrobiologie und Immunologie*. Berlin: Quintessenz Verlags-GmbH; 2004. 567 p.328
102. Radlanski RJ, Jäger A. [Micromorphology of the approximal contact surfaces and the occlusal abrasion facets of human permanent teeth]. *Deutsche Zahnärztliche Zeitung*. 1989;44(3):196-197.
103. Pokhojaev A, Habashi W, May H, Schulz-Kornas E, Shvalb N, Sarig R. Examination of the interproximal wear mechanism: facet morphology and surface texture analysis. *Journal of Dental Research*. 2018;97(13):1445-1451.
104. Hinton RJ. Differences in interproximal and occlusal tooth wear among prehistoric Tennessee Indians: implications for masticatory function. *American Journal of Biological Anthropology*. 1982;57(1):103-115.
105. Sarig R, Hershkovitz I, Shpack N, May H, Vardimon AD. Rate and pattern of interproximal dental attrition. *European Journal of Oral Science*. 2015;123(4):276-281.
106. Sarig R, Slon V, Abbas J, May H, Shpack N, Vardimon AD, Hershkovitz I. Malocclusion in early anatomically modern human: a reflection on the etiology of modern dental misalignment. *PLoS ONE*. 2013;8(11):e80771.1-10.
107. Radlanski RJ, Jäger A. Zur Mikromorphologie der approximalen Kontaktfläche und der okklusalen Schliiffacetten menschlicher Zähne. *Deutsche Zahnärztliche Zeitung*. 1989;44:196-197.
108. Radlanski RJ. [Scanning electron microscopic studies of the morphology of the interdental abrading enamel surfaces of human permanent teeth]. *Anatomischer Anzeiger*. 1988;167(5):413-415.
109. Grippaudo C, Cancellieri D, Grecolini ME, Deli R. Comparison between different interdental stripping methods and evaluation of abrasive strips: SEM analysis. *Progress in Orthodontics*. 2010;11(2):127-137.

Literaturverzeichnis

110. Kaaouara Y, Mohind HB, Azaroual MF, Zaoui F, Bahije L, Benyahia H. In vivo enamel stripping: A macroscopic and microscopic analytical study. *International Orthodontics*. 2019;17(2):235-242.
111. Meredith L, Farella M, Lowrey S, Cannon RD, Mei L. Atomic force microscopy analysis of enamel nanotopography after interproximal reduction. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*. 2017;151(4):750-757.
112. Baumgartner S, Iliadi A, Eliades T, Eliades G. An in vitro study on the effect of an oscillating stripping method on enamel roughness. *Progress in Orthodontics*. 2015;16:1-6.
113. Gazzani F, Bellisario D, Fazi L, Balboni A, Licoccia S, Pavoni C, Cozza P, Lione R. Effects of IPR by mechanical oscillating strips system on biological structures: a quantitative and qualitative evaluation. *Progress in Orthodontics*. 2023;24(9):1-8.
114. Piacentini C, Sfondrini G. A scanning electron microscopy comparison of enamel polishing methods after air-rotor stripping. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*. 1996;109(1):57-63.
115. Mikulewicz M, Szymkowski J, Matthews-Brzozowska T. SEM and profilometric evaluation of enamel surface after air rotor stripping-an in vitro study. *Acta of Bioengineering and Biomechanics*. 2007;9(1):11-17.
116. Shah L. Manual vs. air rotor stripping "just do it with care"- SEM evaluation. *International Journal of Engineering Research and Reviews*. 2014;2(4):119-126.
117. Livas C BT, Flury S, Pandis N. Quantitative evaluation of the progressive wear of powered interproximal reduction systems after repeated use. *Journal of Orofacial Orthopedics*. 2020;81(81):22-29.
118. Förster R, Förster A. Einteilung der Fertigungsverfahren nach DIN 8580. In: Förster R, Förster A, editors. *Einführung in die Fertigungstechnik: Lehrbuch für Studenten ohne Vorpraktikum*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2018. p. 23-136.
119. Eichner K. Normal-, hoch- und höchsttouriges Bohren und Schleifen von Zahnhartsubstanzen : eine Übersicht über Instrumente, wissenschaftliche Untersuchungen und klinische Folgerungen ; mit 45 Tabellen = Burring and grinding of hard tooth substances at normal, high, and super high speed / hrsg. von Karl Eichner. München: Hanser; 1966.
120. Momber A, Schulz R-R. *Handbuch der Oberflächenbearbeitung Beton: Bearbeitung - Eigenschaften - Prüfung*. Birkhäuser Verlag; 2006. 673 p. 451-497
121. Volk R. *Rauheitsmessung : Theorie und Praxis*. In: Deutsches Institut für Normung, Beuth V, editors. 3., überarbeitete Auflage ed. Berlin, Wien; Zürich: Beuth Verlag GmbH; 2018.190 p.12-75
122. Lipiński D, Kacalak W, Tomkowski R. Methodology of evaluation of abrasive tool wear with the use of laser scanning microscopy. *Scanning*. 2014;36(1):53-63.
123. Lipiński D, Kacalak W. Metrological aspects of abrasive tool active surface topography evaluation. *Metrology and measurement systems*. 2016; 23(4):567-577.
124. Pintaude G. An overview of the hardness differential required for abrasion. *Journal of Tribology*. 2010;132(3):034502-1-4.
125. Swanson PA, Vetter AF. The measurement of abrasive particle shape and its effect on wear. *A S L E Transactions*. 1985;28(2):225-230.
126. Denkena B, Tönshoff HK. *Verschleiß. Spanen: Grundlagen*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2011:135-166.
127. Klocke F. *Schleifen. Fertigungsverfahren 2: Zerspanung mit geometrisch unbestimmter Schneide*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2018:145-302.

Literaturverzeichnis

128. De Pellegrin DV, Corbin ND, Baldoni G, Torrance AA. Diamond particle shape: its measurement and influence in abrasive wear. *Tribology International*. 2009;42(1):160-168.
129. Kapłonek W, Nadolny K, Królczyk GM. The use of focus-variation microscopy for the assessment of active surfaces of a new generation of coated abrasive tools. *Measurement Science Review*. 2016;16(2):42-53.
130. Torrance AA. The effect of grit size and asperity blunting on abrasive wear. *Wear*. 2002;253(7):813-819.
131. Danzl R, Helmlı F, Scherer S. Focus Variation—a robust technology for high resolution optical 3D surface metrology. *Strojnicki Vestnik - Journal of Mechanical Engineering*. 2011;57(3):245-256.
132. Danzl R, Helmlı F, Scherer S. Focus variation - a new technology for high resolution Optical 3D Surface Metrology. 10th International Conference of the Slovenian Society for NDT. September 1-3. 2009.Ljubljana Slovenia: 484-491
133. Wdowik R, Swirad S. Application of focus-variation technique in the analysis of ceramic chips. *Materials Science Forum*. 2019;957:187-194.
134. Helmlı F. Focus Variation Instruments. In: Leach R, editor. *Optical measurement of surface topography*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2011. p. 131-166.
135. Bocaege E, Humphrey LT, Hillson S. Technical note: a new three-dimensional technique for high resolution quantitative recording of perikymata. *American Journal of Physiological Anthropology*. 2010;141(3):498-503.
136. Hiersemenzel F, Petzing J, Leach R, Helmlı F, Singh J. Areal texture and angle measurements of tilted surfaces using focus variation methods IN: *Proceedings of the 3rd International Conference on Surface Metrology, Annecy, France, 21-23 March 2012*, 5pp.
137. Newton L NS, Gomez C, Danzl R, Helmlı F, Blunt L, Leach R. Areal topography measurement of metal additive surfaces using focus variation microscopy. *Additive Manufacturing* 25 (2019) 365–389.
138. Abdalla R RJM, Ren Yan Fang Non-carious cervical lesions imaged by focus variation microscopy. *Journal of Dentistry*. 2017;63:14-20.
139. Nikolaev N, Petzing J, Coupland J. The Focus variation microscope: linear theory and surface tilt sensitivity. *Applied Optics*.2016;55(13):3555-3565.
140. Bello SM, Verveniou E, Cornish L, Parfitt SA. 3-dimensional microscope analysis of bone and tooth surface modifications: comparisons of fossil specimens and replicas. *Scanning*. 2011;33(5):316-324.
141. Seewig J WC, Gröger S. Charakterisierung technischer Bauteiloberflächen - Stand der Oberflächenmesstechnik heute. *Metrologie in der Mikro- und Nanotechnik 2011. Messprinzipien - Messgeräte - Anwendungen*; 4. Fachtagung, Erlangen, 25. und 26. Oktober 2011. Düsseldorf: VDI-Verl. 2011:159-171
142. Christian Wiehr JS. 3D-Kenngrößen nach ISO 25178. *Vortragstexte der 45. Metallographie-Tagung, 14.-16. September 2011 in Karlsruhe*. Frankfurt/Main:MAT-INFO,Werkstoff-Informationsgesellschaft. 2011:3-8
143. Reitbauer J, Harrer F, Eckhart R, Bauer W. Focus variation technology as a tool for tissue surface characterization. *Cellulose*. 2021;28(11):6813-6827.
144. DIN EN ISO 25178-2: Geometrische Produktspezifikation (GPS)–Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft–Teil 2: Begriffe und Oberflächen-Kenngrößen (ISO 25178-2: 2012). Deutsche Fassung EN ISO. 2012:25178-25172.
145. Blateyron F. 3D Parameters and New Filtration Techniques. *Quality Magazine*. 2006;7:1-7.

Literaturverzeichnis

146. Deltombe R, Kubiak KJ, Bigerelle M. How to select the most relevant 3D roughness parameters of a surface. *Scanning*. 2014;36(1):150-160.
147. Piska M, Metelkova J. On the comparison of contact and non-contact evaluations of a machined surface. *MM Science Journal*. 2014;2014(02):476-480.
148. Seewig J. Rauheitskenngrößen für die 3D-Oberflächenmesstechnik im Bereich der Mikro- und Nanotechnik. *Metrologie in der Mikro- und Nanotechnik*. 2003. p. 31-42.
149. Vernon-Parry KD. Scanning electron microscopy: an introduction. *III-Vs Review*. 2000;13(4):40-44.
150. Reich M. Ein neues Rasterelektronenmikroskop für die BSPG / A new scanning electron microscope at the BSPG (Bavarian State Collection of Palaeontology and Geology). 2020;48:56-63.
151. Field J, Waterhouse P, German M. Quantifying and qualifying surface changes on dental hard tissues in vitro. *Journal of Dentistry*. 2010;38(3):182-190.
152. von Ardenne M. Das Elektronen-Rastermikroskop. *Zeitschrift für Physik*. 1938;109(9):553-572.
153. Kapłonek W, Nadolny K. Advanced desktop SEM used for measurement and analysis of the abrasive tool's active surface. *Acta Microscopica*. 2013;22:278-288.
154. Taylor PD. Scanning electron microscopy of uncoated fossils. *Palaeontology*. 1986;29:685-690.
155. Cenicerros M, Rodríguez F, Perera-Mercado Y, Saucedo E, Díaz Barriga Castro E. Application of the Low Vacuum Scanning Electron Microscope to the study of glass-ceramic spherical materials. *Acta Microscopica*. 2014;23:78-84.
156. Radlanski RJ, Jäger A, Zimmer B, Bertzbach F. Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen zur klinischen Anwendung des interdentalen Strippens. *Fortschritte der Kieferorthopädie*. 1990;51(2):117-122.
157. Jaffer S, Oesterle LJ, Newman SM. Storage media effect on bond strength of orthodontic brackets. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*. 2009;136(1):83-86.
158. Mobarak EH, El-Badrawy W, Pashley DH, Jamjoom H. Effect of pretest storage conditions of extracted teeth on their dentin bond strengths. *Journal of Prosthetic Dentistry*. 2010;104(2):92-97.
159. Al Ankily M, Makkeyah F, Bakr MM, Shamel M. Effect of different scaling methods and materials on the enamel surface topography: an in vitro SEM study. *Journal of International Oral Health*. 2020;12:579-585.
160. Dörfer CE, von Bethlenfalvy ER, Staehle HJ, Pioch T. Factors influencing proximal dental contact strengths. *European Journal of Oral Science*. 2000;108(5):368-377.
161. Müller P, Ender A, Joda T, Katsoulis J. Impact of digital intraoral scan strategies on the impression accuracy using the TRIOS Pod scanner. *Quintessence International*. 2016;47(4):343-349.
162. Kihara H, Hatakeyama W, Komine F, Takafuji K, Takahashi T, Yokota J, Oriso K, Kondo H. Accuracy and practicality of intraoral scanner in dentistry: A literature review. *Journal of Prosthodontic Research*. 2020;64(2):109-113.
163. Resende CCD, Barbosa TAQ, Moura GF, Tavares LDN, Rizzante FAP, George FM, Neves FDD, Mendonça G. Influence of operator experience, scanner type, and scan size on 3D scans. *Journal of Prosthetic Dentistry*. 2021;125(2):294-299.
164. Medina-Sotomayor P, Pascual-Moscardo A, Camps A I. Accuracy of 4 digital scanning systems on prepared teeth digitally isolated from a complete dental arch. *Journal of Prosthetic Dentistry*. 2019;121(5):811-820.

Literaturverzeichnis

165. Alkadi L. A Comprehensive review of factors that influence the accuracy of intraoral scanners. *Diagnostics (Basel)*. 2023;13(3291):1-13.
166. Revilla-León M, Kois DE, Kois JC. A guide for maximizing the accuracy of intraoral digital scans. part 1: operator factors. *Journal of Esthetic Restorative Dentistry*. 2023;35(1):230-240.
167. Revilla-León M, Jiang P, Sadeghpour M, Piedra-Cascón W, Zandinejad A, Özcan M, Krishnamurthy VR. Intraoral digital scans-part 1: Influence of ambient scanning light conditions on the accuracy (trueness and precision) of different intraoral scanners. *Journal of Prosthetic Dentistry*. 2020;124(3):372-378.
168. Chen Y, Zhai Z, Li H, Yamada S, Matsuoka T, Ono S, Nakano T. Influence of liquid on the tooth surface on the accuracy of intraoral scanners: an in vitro study. *Journal of Prosthodontics*. 2022;31(1):59-64.
169. Pellitteri F, Albertini P, Vogrig A, Spedicato GA, Siciliani G, Lombardo L. Comparative analysis of intraoral scanners accuracy using 3D software: an in vivo study. *Progress in Orthodontics*. 2022;23(21):1-11.
170. O'Toole S, Cecilie Osnes David Bartlett AK. Investigation into the accuracy and measurement methods of sequential 3D dental scan alignment. *Dental Materials*. 2019.35:495-500
171. Revilla-León M, Gohil A, Barmak AB, Zandinejad A, Raigrodski AJ, Alonso Pérez-Barquero J. Best-fit algorithm influences on virtual casts' alignment discrepancies. *Journal of Prosthodontics*. 2023;32(4):331-339.
172. Gadelmawla ES, Koura MM, Maksoud TMA, Elewa IM, Soliman HH. Roughness parameters. *Journal of Materials Processing Technology*. 2002;123(1):133-145.
173. Helmlí F, Danzl R, Scherer S. Comparison of roughness measurements between a contact stylus instrument and an optical measurement device based on a colour focus sensor. *Technical Proceedings of the 2006 NSTI Nanotechnology Conference and Trade Show*.2006;3:284-287.
174. Passos VF, Melo MA, Vasconcellos AA, Rodrigues LK, Santiago SL. Comparison of methods for quantifying dental wear caused by erosion and abrasion. *Microscopy Research and Technique*. 2013;76(2):178-183.
175. Ren Y-F, Zhao Q, Malmstrom H, Barnes V, Xu T. Assessing fluoride treatment and resistance of dental enamel to soft drink erosion in vitro: applications of focus variation 3D scanning microscopy and stylus profilometry. *Journal of Dentistry*. 2009;37(3):167-176.
176. Mihlbachler MC, Foy M, Beatty BL. Surface replication, fidelity and data loss in traditional dental microwear and dental microwear texture analysis. *Scientific Reports*. 2019;9(1595):1-13.
177. Faria AC, Rodrigues RC, Macedo AP, Mattos Mda G, Ribeiro RF. Accuracy of stone casts obtained by different impression materials. *Brazilian Oral Research*. 2008;22(4):293-298.
178. Sugsompian K, Tansalarak R, Piyapattamin T. Comparison of the enamel surface roughness from different polishing methods: scanning electron microscopy and atomic force microscopy investigation. *European Journal of Dentistry*. 2020;14(02):299-305.

10. Anhang

10.1 Eidesstattliche Versicherung

„Ich, Nicola Patricia Altner, versichere an Eides statt durch meine eigenhändige Unterschrift, dass ich die vorgelegte Dissertation mit dem Thema: „Effizienz approximaler Schmelzreduktion (ASR). Wie vorhersagbar können wir Schmelz abtragen?“/ „Efficiency of interproximal enamel reduction (IPR). How predictable can we reduce enamel?“ selbstständig und ohne nicht offengelegte Hilfe Dritter verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel genutzt habe.

Alle Stellen, die wörtlich oder dem Sinne nach auf Publikationen oder Vorträgen anderer Autoren/innen beruhen, sind als solche in korrekter Zitierung kenntlich gemacht. Die Abschnitte zu Methodik (insbesondere praktische Arbeiten, Laborbestimmungen, statistische Aufarbeitung) und Resultaten (insbesondere Abbildungen, Graphiken und Tabellen) werden von mir verantwortet.

Ich versichere ferner, dass ich die in Zusammenarbeit mit anderen Personen generierten Daten, Datenauswertungen und Schlussfolgerungen korrekt gekennzeichnet und meinen eigenen Beitrag sowie die Beiträge anderer Personen korrekt kenntlich gemacht habe (siehe Anteilserklärung). Texte oder Textteile, die gemeinsam mit anderen erstellt oder verwendet wurden, habe ich korrekt kenntlich gemacht.

Meine Anteile an etwaigen Publikationen zu dieser Dissertation entsprechen denen, die in der untenstehenden gemeinsamen Erklärung mit dem/der Erstbetreuer/in, angegeben sind. Für sämtliche im Rahmen der Dissertation entstandenen Publikationen wurden die Richtlinien des ICMJE (International Committee of Medical Journal Editors; www.icmje.org) zur Autorenschaft eingehalten. Ich erkläre ferner, dass ich mich zur Einhaltung der Satzung der Charité – Universitätsmedizin Berlin zur Sicherung Guter Wissenschaftlicher Praxis verpflichte.

Weiterhin versichere ich, dass ich diese Dissertation weder in gleicher noch in ähnlicher Form bereits an einer anderen Fakultät eingereicht habe.

Die Bedeutung dieser eidesstattlichen Versicherung und die strafrechtlichen Folgen einer unwahren eidesstattlichen Versicherung (§§156, 161 des Strafgesetzbuches) sind mir bekannt und bewusst.“

Datum

Unterschrift

10.2 Lebenslauf

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

10.3 Danksagungen

An erster Stelle bedanke ich mich bei meinem Doktorvater Professor Jost-Brinkmann sehr herzlich für die freundliche Überlassung des Themas, die enge wissenschaftliche Betreuung und für die fortwährende Unterstützung während der gesamten Doktorarbeit.

Ich bedanke mich herzlich bei Professor Wolf-Dieter Müller, für die Unterstützung bei der Erarbeitung des Prüfprotokolls an der Zwick. Ebenfalls bedanke ich mich bei ZTM Utz Hetzelberger für die Unterstützung bei der Herstellung der Prüfkörper. Bei Professor Paul Zaslansky bedanke ich mich recht herzlich für die Einweisung in das Phenom XL und die freundliche und hilfsbereite Unterstützung bei technischen Fragen.

Bei den Firmen Scheu-Dental GmbH (Peter Stückrad), Komet (Michael Küllmer), Dentatus (Mette Palmer) und KaVo Dental GmbH (Frank Emde) bedanke ich mich für die Bereitstellung der für diese Studie verwendeten Materialien.

Aber vor allem bedanke ich mich bei meiner Familie, insbesondere bei meinen Eltern, für die ständige Unterstützung in den Jahren der Promotion. Daher widme ich diese Arbeit meinen Eltern, denen ich alles im Leben verdanke.

10.4 Bescheinigung des Statistikers



CharitéCentrum für Human- und Gesundheitswissenschaften

Charité | Campus Charité Mitte | 10117 Berlin

Institut für Biometrie und klinische Epidemiologie (iBike)

Direktor: Prof. Dr. Frank Konietschke

Postanschrift:
Charitéplatz 1 | 10117 Berlin
Besucheranschrift:
Reinhardtstr. 58 | 10117 Berlin

Tel. +49 (0)30 450 562171
frank.konietschke@charite.de
<https://biometrie.charite.de/>



Name, Vorname: Altner, Nicola
Emailadresse: nicola.altner@charite.de
Matrikelnummer: 217006
Promotionsbetreuer: Prof. Dr. Paul-Georg Jost-Brinkmann
Promotionsinstitution / Klinik: CC03-Charité-Institut für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde - Abteilung für Kieferorthopädie und Kinderzahnmedizin

Bescheinigung

Hiermit bescheinige ich, dass Nicola Altner innerhalb der Service Unit Biometrie des Instituts für Biometrie und klinische Epidemiologie (iBike) bei mir eine statistische Beratung zu einem Promotionsvorhaben wahrgenommen hat. Folgende Beratungstermine wurden wahrgenommen:

- Termin 1: 11.10.2017 (bei Klaus Lenz)
- Termin 2: 12.7.2018 (bei Klaus Lenz)
- Termin 3: 7.6.2021
- Termin 4: 25.5.2023

Folgende wesentliche Ratschläge hinsichtlich einer sinnvollen Auswertung und Interpretation der Daten wurden während der Beratung erteilt:

- Besprechung des Unterschieds zwischen konfirmatorischen und explorativen Analysen. Bei Durchführung mehrerer statistischer Tests im konfirmatorischen Setting für multiples Testen korrigieren oder Analysen explorativ interpretieren.
- Grafische Darstellung z.B. mittels Boxplots

Diese Bescheinigung garantiert nicht die richtige Umsetzung der in der Beratung gemachten Vorschläge, die korrekte Durchführung der empfohlenen statistischen Verfahren und die richtige Darstellung und Interpretation der Ergebnisse. Die Verantwortung hierfür obliegt allein dem Promovierenden. Das Institut für Biometrie und klinische Epidemiologie übernimmt hierfür keine Haftung.

Datum: 12.12.2023

Mareen
Pigorsch

Unterschrift Beraterin, Institutsstempel

Digital unterschrieben von
Mareen Pigorsch
Datum: 2023.12.12 14:00:51
+0100



UNIVERSITÄTSMEDIZIN BERLIN
Institut für Biometrie und Klinische Epidemiologie
Campus Charité Mitte
Charitéplatz 1 | 10117 Berlin

Name der Beraterin: Mareen Pigorsch



CharitéCentrum für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde

Charité | Campus Benjamin Franklin | 12200 Berlin

Charité - Universitätsmedizin Berlin
Abteilung für Kieferorthopädie, Orthodontie und
Kinderzahnmedizin
Aßmannshauer Str. 4-6
14197 Berlin
Leiter: Univ.-Prof. Dr. Paul-G. Jost-Brinkmann

Studienzahnärztin Nicola Altner
nicola.altner@charite.de

Tel.: +49 30 450 562 522
Fax: +49 30 450 562 952
paul-g.jost-brinkmann@charite.de

INFORMATIONEN FÜR TEILNEHMER AN DER STUDIE **„Effizienz approximaler Schmelzreduktion (ASR). Wie** **vorhersagbar können wir Schmelz abtragen? “**

Lieber Patient, liebe Patientin, liebe Eltern !

Bei Ihnen/Ihrem Kind ist die Entfernung von einem oder mehreren Zähnen geplant. Sie sind über den Ablauf und mögliche Risiken eines solchen Eingriffs von Ihrem Zahnarzt/Ihrer Zahnärztin aufgeklärt worden. Nach der Extraktion liegt es in Ihrem Ermessen, ob Sie den Zahn/die Zähne mitnehmen oder entsorgen lassen wollen.

An dieser Stelle wenden wir uns als forschende Einrichtung mit einer Bitte an Sie. Im Rahmen unserer wissenschaftlichen Studie werden Zähne für Laboruntersuchungen benötigt. Daher bitten wir Sie hiermit an unserer Studie mit dem Titel „Effizienz approximaler Schmelzreduktion (ASR). Wie vorhersagbar können wir Schmelz abtragen?“ durch die Spende Ihres Zahnes/Ihrer Zähne bzw. des Zahnes/der Zähne Ihres Kindes teilzunehmen.

Ablauf der Studie

Der Ablauf der Zahnentfernung wird dadurch nicht geändert, es entsteht weder ein Mehraufwand für Sie, noch kommt es zu zeitlichen Verzögerungen Ihrer Behandlung.

Die Ergebnisse der Studie stehen nicht in direktem Zusammenhang mit Ihrer zahnärztlichen Therapie oder mit Ihrem Gesundheitszustand, sollen aber durch wissenschaftliche Erkenntnisgewinnung dazu führen, dass Patienten, an denen eine sogenannte „*approximale Schmelzreduktion*“ durchgeführt wird, davon profitieren.

Hintergrundinformationen zur Studie

Eng stehende Zähne und Platzmangel gehören zu den häufigsten Herausforderungen, vor die ein Kieferorthopäde in seiner täglichen Behandlung gestellt wird.

Eine Möglichkeit zur Platzbeschaffung ist die so genannte „*approximale Schmelzreduktion*“, die häufig bei geringen bis mittleren Engständen angewandt wird.

Bei der „*approximalen Schmelzreduktion*“ werden die Zahnbreiten reduziert, indem die Seitenflächen der Zähne (in der Zahnheilkunde als „Approximalfächen“ bezeichnet) poliert werden. Diese *Reduktion* erfolgt lediglich im Bereich der obersten Schicht des Zahnes, im sogenannten *Schmelz*.

Um dieses Ziel zu erreichen, sind verschiedene Systeme auf dem Markt verfügbar. Da die Reduktion der Zahnbreiten möglichst genau vorgenommen werden soll, ist es wichtig, den zuvor berechneten Betrag exakt umsetzen zu können.

Zweck der Studie

Zweck unserer Studie ist es, die Vorhersagbarkeit des Abtrags der zur approximalen Schmelzreduktion verwendeten Systeme zu verbessern und die klinische Anwendung zu erleichtern.

Mögliche Risiken

Es gibt keine zusätzlichen Risiken, da die Zähne nicht wegen unserer Studie, sondern aus anderen Gründen entfernt werden.

Freiwilligkeit der Teilnahme

Die Teilnahme an dieser Studie ist **freiwillig**. Nur durch Ihre Zustimmung können Sie an der Studie teilnehmen und uns den extrahierten Zahn/die Zähne überlassen.

Sie haben das Recht, ohne Angabe von Gründen an der Studie nicht teilzunehmen, sowie Ihre Einwilligung in einem Zeitraum von 24 Stunden - auch mündlich - zu widerrufen.

Daraufhin werden Ihre Daten und die Zähne vernichtet.

Die Proben werden danach anonymisiert, daher ist nach Ablauf der 24-Stunden-Frist keine Zuordnung zwischen Ihnen und dem entnommenen Zahn/den entnommenen Zähnen mehr möglich.

Aufklärung über den Datenschutz

Es werden durch die Anonymisierung Ihrer Zahnspende keine personenbezogenen Daten im Rahmen dieser Studie erhoben oder weiterverarbeitet.

Der Inhalt des Aufklärungsgesprächs unterliegt der ärztlichen Schweigepflicht.

Die Ergebnisse der Studie können in der medizinischen Literatur veröffentlicht werden, Ihre Identität oder die Zuordnung einer Probe zu Ihrer Person kann jedoch durch die Anonymisierung nicht erfolgen.

Die Zähne werden im Studienlabor der Abteilung für Kieferorthopädie, Orthodontie und Kinderzahnmedizin der Charité - Universitätsmedizin Berlin, CharitéCentrum 03 für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde (Aßmannshäuser Str. 4-6 , 14197 Berlin) untersucht und für maximal 10 Jahre aufbewahrt.

Die Einwilligungserklärung wird an die Studienzahnärztin Nicola Altner (Abteilung für Kieferorthopädie, Orthodontie und Kinderzahnmedizin der Charité - Universitätsmedizin Berlin) übermittelt und ebenfalls für 10 Jahre archiviert.



CharitéCentrum für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde

Charité | Campus Benjamin Franklin | 12200 Berlin

Charité - Universitätsmedizin Berlin
Abteilung für Kieferorthopädie, Orthodontie und
Kinderzahnmedizin
Abmannshäuser Str. 4-6
14197 Berlin
Leiter: Univ.-Prof. Dr. Paul-G. Jost-Brinkmann

Studienzahnärztin Nicola Altner
nicola.altner@charite.de

Tel.: +49 30 450 562 522
Fax: +49 30 450 562 952
paul-g.jost-brinkmann@charite.de

Einwilligungserklärung

für die Teilnahme an der Studie:

Effizienz approximaler Schmelzreduktion (ASR). Wie vorhersagbar können wir Schmelz abtragen?

Hiermit erkläre ich

.....
Vorname Name Geburtsdatum

(im Namen meines Kindes:)

.....
Vorname Name Geburtsdatum

dass ich durch Herrn/Frau
(Name des Zahnarztes / der Zahnärztin)

mündlich und schriftlich über das Wesen und die Bedeutung der wissenschaftlichen Untersuchungen im Rahmen der o. g. Studie informiert wurde und ausreichend Gelegenheit hatte, meine Fragen zu klären.

Mir ist bekannt, dass ich das Recht habe, meine Einwilligung innerhalb von 24 Stunden ohne Angabe von Gründen und ohne nachteilige Folgen für mich

