

Aus der
Poliklinik für Zahnerhaltung und Parodontologie
Klinikum der Ludwig-Maximilians-Universität München



**Untersuchung von Handzahnbürstenborsten aus Rizinusöl
im Hinblick auf Verschleiß, mechanische und
chemische Eigenschaften**

Dissertation
zum Erwerb des Doktorgrades der Zahnmedizin
an der Medizinischen Fakultät
der Ludwig-Maximilians-Universität München

vorgelegt von
Lilli Heusinger

aus
Oschatz

2025

Mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät der
Ludwig-Maximilians-Universität zu München

Erstes Gutachten: PD Dr. Dalia Kaisarly
Zweites Gutachten: Prof. Dr. Moataz Elgezawi
Drittes Gutachten: Prof. Dr. Bogna Stawarczyk

Dekan: Prof. Dr. med. Thomas Gudermann

Tag der mündlichen Prüfung: 13.05.2025

Hinweis:

Die im nachfolgenden Text genannten Handelsnamen, Warenbezeichnungen und Gebrauchsbezeichnungen sind teilweise patent- und urheberrechtlich geschützt. Aus dem Fehlen eines besonderen Hinweises bzw. des Zeichens ® darf nicht geschlossen werden, dass kein patent- oder urheberrechtlicher Schutz besteht.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	4
Zusammenfassung	7
Abstract	10
Abbildungsverzeichnis	12
Tabellenverzeichnis	16
Abkürzungs- und Einheitenverzeichnis	17
1. Einleitung	18
1.1 Karies und Parodontalerkrankungen	19
1.2 Oraler Biofilm	20
1.3 Verschleiß	20
1.3.1 Oraler Verschleiß	21
1.3.2 Borstenverschleiß – Empfehlung zur Zahnbürstenauswechslung.....	24
1.3.3 In-vitro Versuche zur Zahnputzsimulation	27
1.4 Methoden zur Untersuchung und Bewertung von Zahnbürstenborstenenden	28
1.5 Methoden zur Oberflächenanalyse	30
1.6 Zahnbürsten	31
1.6.1 Funktion und Entwicklung der Zahnbürsten	31
1.6.2 Konstruktionselemente	33
1.6.3 Borstenmaterialien	36
1.6.4 Untersuchungen verschiedener Bürstenkonfigurationen.....	37
1.6.5 Putzdauer, Putzhäufigkeit und Putztechnik	38
1.6.6 Handzahnbürste versus elektrische Zahnbürste	40
1.6.7 Anforderungen an Zahnbürsten	40
2. Zielsetzung	43
3. Material und Methoden	44
3.1 Gruppeneinteilung.....	44
3.1.1 ADA Control Referenzzahnbürste	45
3.1.2 Alterra Bambus Zahnbürste	46
3.1.3 Alverde Zahnbürste.....	47
3.1.4 Dr. Best Green Clean Zahnbürste	48
3.1.5 Hydrophil Bambus Zahnbürste	49
3.1.6 Prokudent Recycling Zahnbürste	50
3.2 Probenherstellung	51
3.3 Zahnputzsimulator	55
3.4 Arbeitsablauf	60
3.5 Berechnung der Dauer der Zahnputzsimulation	60
3.6 Makroskopische Untersuchung der Zahnbürstenköpfe	61
3.7 Mikroskopische Untersuchung der Zahnbürstenborsten	61
3.7.1 Borstenendabrundung	62

3.7.2	Borstenoberflächenbeschaffenheit	65
3.7.3	Borstengesamtbeurteilung	66
3.8	Micro-Computertomographische Untersuchung	67
3.9	Oberflächenanalyse des Dentins	68
3.9.1	Quantifizierung der Dentinabrasion	68
3.9.2	Bestimmung der Oberflächenrauheit des Dentins	72
3.10	Chemische Elementaranalyse	74
3.11	Mechanische Untersuchung	75
3.12	Statistische Auswertung der Ergebnisse	78
4.	Ergebnisse	79
4.1	Makroskopischer Zahnbürstenverschleiß	79
4.1.1	ADA Control Referenzzahnbürste	79
4.1.2	Alterra	80
4.1.3	Alverde	80
4.1.4	Dr. Best	81
4.1.5	Hydrophil	81
4.1.6	Prokudent	82
4.2	Mikroskopische Borstenqualität	84
4.2.1	Borstenendabrundung	84
4.2.2	Borstenoberflächenbeschaffenheit	85
4.2.3	Borstengesamtbeurteilung	87
4.2.4	Mikroskopische Aufnahmen der Zahnbürstenborsten	88
4.3	Micro-Computertomographische Untersuchung	92
4.4	Oberflächenanalyse des Dentins	94
4.4.1	Quantifizierung der Dentinabrasion	94
4.4.2	Oberflächenrauheit des Dentins	95
4.5	Chemische Elementaranalyse	96
4.6	Elastizitätsmodul	98
5.	Diskussion	99
5.1	Borstenverschleiß und Bewertung der DIN 20126	99
5.2	Zahnbürstenauswechslung	103
5.3	Micro-Computertomographische Untersuchung	105
5.4	Dentinveränderungen	106
5.5	Borstenzusammensetzung und deren Nachhaltigkeit	107
5.6	Elastizitätsmodul und Bürstensteifheit	109
5.7	Schlussfolgerung	111
5.8	Ausblick	112
6.	Anhang	114
6.1	Technische Abmessungen der untersuchten Zahnbürsten	114
6.2	Verpackungen der untersuchten Zahnbürsten	115
6.3	Apparative Ausstattung	120
6.4	Anleitung Probenherstellung	121

6.5	Anleitung Keyence Oberflächenrauheit	126
6.6	Anleitung Messung des E-Moduls der Borsten mittels des Mikrozugversuchs	128
6.7	Anleitung Quantifizierung der Dentinabrasion: Laserscan	132
7.	Literaturverzeichnis	135
8.	Danksagung.....	152
9.	Affidavit.....	153
10.	Publikationsliste	154

Zusammenfassung

Zahnbürsten sind seit Jahrhunderten ein unverzichtbares Hilfsmittel in der täglichen Mundhygiene. Seit den 1940er Jahren sind Zahnbürsten mit Borsten aus synthetischen Materialien auf Basis von Erdöl und/oder Erdgas auf dem Markt, die bis heute den Standard darstellen. Zunehmend werden jedoch Zahnbürstenborsten aus alternativen Rohstoffen wie Rizinusöl hergestellt. Derzeit bestehen noch wenige Untersuchungen, die diese neuartigen Zahnbürsten mit denen aus herkömmlichen Materialien vergleichen. Angesichts dieser Entwicklung und der wichtigen Rolle, die Zahnbürsten in der Prävention oraler Erkrankungen spielen, ist eine umfassende Untersuchung notwendig.

Das Ziel dieser Studie ist die Untersuchung von Handzahnbürsten mit Borsten aus Rizinusöl im Ausgangszustand und im Verlauf einer Zahnputzsimulation, die sechs Monaten Zähneputzen entspricht. Betrachtet wurden dabei der Borstenverschleiß, die Oberflächenveränderung des Dentins, sowie Elastizitätsmodul und chemische Zusammensetzung der Borsten. Die Ergebnisse wurden dabei mit denen einer herkömmlichen erdölbasierten Zahnbürste verglichen, die denselben Experimenten unterzogen wurde.

Insgesamt wurden fünf verschiedene Handzahnbürstenmodelle ($n = 8$) mit Borsten auf Basis von Rizinusöl untersucht, deren Härtegrad von den jeweiligen Herstellern als „mittel“ klassifiziert wurde. Die hierfür ausgewählten Bürsten waren Alterra Bambus Zahnbürste, Alverde Zahnbürste, Dr. Best Green Clean Zahnbürste, Hydrophil Bambus Zahnbürste und Prokudent Recycling Zahnbürste. Als Referenzmodell kam die Zahnbürste ADA Control zum Einsatz. Der Verschleiß der Zahnbürsten wurde in einem Zahnputzsimulator mit 70 Zyklen/min und 150 g Auflagegewicht für insgesamt 50 k Zyklen (entspricht 6 Monaten Zähneputzen) getestet. Als Putzoberfläche dienten in Kunststoff eingebettete Dentinstäbchen aus Rinderzähnen. Vor Beginn der Simulation und nach 12,5 k Simulationszyklen wurden makroskopische Aufnahmen der Bürstenköpfe ($n = 3$ /Intervall) und rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen (REM, 50-fache Vergrößerung) der einzelnen Borsten ($n = 9$ /Intervall) angefertigt. Die makroskopischen Bilder wurden nach dem Conforti-Index, modifiziert nach Van Leeuwen klassifiziert. Die Borsten wurden anhand von REM-Aufnahmen im Hinblick auf Endabrundung und Oberflächenbeschaffenheit bewertet. Die Endabrundung der Borsten wurde mittels einer zu diesem Zweck angefertigten transparenten Maske, modifiziert nach der Norm „DIN EN ISO 20126“ in die Kategorien „akzeptabel“ und „inakzeptabel“ eingeteilt. Ebenfalls konnte die Qualität der Borstenoberflächen anhand von Sichtprüfung mithilfe einer eigens entwickelten weiteren Klassifizierung in „akzeptabel“ oder „inakzeptabel“ bestimmt werden. Aus den beiden Einzelbewertungen wurde eine Gesamtbewertung für die Borsten der Zahnbürstenmodelle gebildet, wobei eine Borste nur dann als „akzeptabel“ galt, wenn beide Einzelbewertungen positiv ausfielen. Die Einzelbewertungen sowie die Gesamtbewertung wurden durch den Friedmann-Test auf signifikante Unterschiede zwischen den einzelnen Modellen untersucht. Weiterhin wurden jeweils vor und nach der gesamten Zahnputzsimulation microcomputertomographische (Micro-CT) Bilder der Bürstenköpfe ($n = 1$) in hoher Auflösung (18 μm) erstellt und qualitativ bewertet. Um die Oberflächenveränderungen des Dentins zu bewerten, wurden die

Dentinstäbchen nach Abschluss der Simulation untersucht. Hierbei wurde die Abrasion des Dentins als mittlerer vertikaler Höhenverlust mithilfe eines Laserscanners quantifiziert. Außerdem wurde die Oberflächenrauheit mit einem Digitalmikroskop (Keyence) teilautomatisiert gemessen. Die chemischen und mechanischen Eigenschaften wurden vor Beginn der Untersuchung im Ausgangszustand analysiert und unter den Zahnbürstenmodellen verglichen. Die chemische Zusammensetzung der Borsten wurde im REM (EDAX) bestimmt. Zur Untersuchung der mechanischen Eigenschaften der Borsten wurde das E-Modul in einem Mikrozugtest ermittelt.

Auf den makroskopischen Bildern waren nach der gesamten Zahnputzsimulation nur minimale Veränderungen wie Verbiegen, Abspreizen oder Auffasern der äußeren Zahnbürstenborsten zu erkennen wie nach Van Leeuwen im modifizierten Conforti-Index beschrieben. Die mikroskopischen Aufnahmen zeigten bei Auswertung mit der transparenten Maske, dass die Borstenenden bei ADA Control und Dr. Best mit 100%, Prokudent mit 96%, Alverde mit 87%, Alterra mit 82% und Hydrophil mit 73% überwiegend akzeptabel gerundet waren. Während die Borstenoberflächen der untersuchten Zahnbürsten ADA Control, Alterra, Prokudent (100%) und Alverde (98%) eine gute Qualität aufwies, konnte Hydrophil (71%) mit deutlich weniger akzeptabler Borstenoberflächen zu allen Simulationszeitpunkten die Untersuchung gemessen an der „DIN EN ISO 20126“ bestehen. Besonders im Ausgangszustand, sowie nach 12,5 k Zyklen erreichte Hydrophil im Vergleich wenige akzeptable Borstenoberflächen. Die Gesamtbewertung der Borsten fiel bei den Modellen ADA Control und Dr. Best zu 100%, Prokudent zu 96%, Alverde zu 84% und Alterra zu 82% akzeptabel aus. Lediglich die Zahnbürste von Hydrophil bei nur 51% aller untersuchten Borsten eine akzeptable Borstengesamtbeurteilung. Die Micro-CT Aufnahmen zeigten insgesamt geringe Unterschiede im Aussehen der einzelnen Borsten und in der Konfiguration der Borstenbüschel nach der Simulation von 50 k Zyklen. Weder bei der Dentinabrasion (- 60,1 – (- 95,4) μm , Alverde – Alterra) noch bei der Dentinrauheit (3,4-3,8 μm , Hydrophil – Alterra) zeigten sich signifikante Unterschiede zwischen den Zahnbürstenmodellen. Die Zusammensetzung der Elemente aller untersuchten Zahnbürstenmodelle war ähnlich wie die der Kontrollzahnbürste ADA. Das Elastizitätsmodul lag bei 1,14-1,81 MPa (Prokudent - Alterra).

Damit zeigten die untersuchten Handzahnbürsten mit Rizinusölborsten bei den mechanischen und chemischen Eigenschaften, sowie den untersuchten Dentinveränderungen weder untereinander noch im Vergleich zur Kontrollzahnbürste relevante Unterschiede. Mikroskopisch, makroskopisch und microcomputertomographisch ermittelte Abnutzungserscheinungen waren bei allen Modellen über die gesamte Simulation gering. Im Rahmen dieser Untersuchung kann keine pauschale Empfehlung zur Nutzungsdauer einer Handzahnbürste aufgrund von Abnutzungserscheinungen nach sechs Monaten gegeben werden. Die Endabrundungen und Oberflächenbeschaffenheiten der Borsten aller Zahnbürstenmodelle waren mehrheitlich akzeptabel, es ergaben sich dennoch Unterschiede zwischen den Modellen. Daher sollte in zukünftigen Versionen der „DIN EN ISO 20126“ eine Überarbeitung der Bestehensgrenze von 50 % zur Borstenendabrundung nachgedacht werden und auch die Eigenschaft der Borstenoberflächenbeschaffenheit sollte stärker mit in die Norm einbezogen werden. Weitergehende Untersuchungen sollten Faktoren wie Variationen der Kraft beim Zähneputzen, mikrobielle Einflüsse oder anatomische Zahnformen

berücksichtigen und in aussagekräftiger Stichprobengröße durchgeführt werden, um belastbare allgemeine Empfehlungen aussprechen zu können.

Abstract

Toothbrushes were and still are a classic aid in daily oral hygiene. Toothbrush bristles made from alternative raw materials such as castor oil are increasingly being produced but have hardly been investigated to date. Particularly in view of the fact that toothbrushes play an important role in the prevention of oral diseases, new types of toothbrushes based on alternative raw materials such as castor oil should also be investigated to determine whether they meet the requirements such as adequate bristle end rounding and maintain the current standard.

The aim of this study is to examine manual toothbrushes with castor oil bristles in their initial state and during a tooth brushing simulation of up to six months with regard to their wear, the surface change of the dentin, their modulus of elasticity and their chemical composition.

A total of five different medium-hard manual toothbrush models with castor oil-based bristles were tested. The selected castor oil-based brushes were Alter-ra Bamboo Toothbrush, Alverde Toothbrush, Dr. Best Green Clean Toothbrush, Hydrophil Bamboo Toothbrush and Prokudent Recycling Toothbrush. The ADA Control toothbrush was used as the reference and standard toothbrush ($n = 8$). All brush models were examined for wear and associated dentine changes in the initial state and after a simulated brushing period. The dentin abrasion of the toothbrush was quantified using laser scanning. The surface roughness was measured using a digital microscope (Keyence). With regard to the mechanical properties of the toothbrushes, the bristles were also subjected to a microtensile test to determine the E-modulus and examined for their chemical composition (EDAX). The toothbrushes were subjected to 70 cycles/min of 12.5 k, 25 k, 37.5 k and 50 k cycles and a contact weight of 150 g in a toothbrush simulator. The surfaces to be brushed were dentin rods made of bark teeth embedded in a synthetic material. A total of six months of tooth brushing (≈ 50 k cycles) were simulated. Before and after the individual brushing intervals, macroscopic and microscopic (SEM, 50x magnification) images ($n = 9$ /interval) were taken for the bristle end roundings. The macroscopic images of the toothbrushes were categorized according to the Conforti index modified by Van Leeuwen. Using a mask modified according to the "DIN EN ISO 20126" standard, the microscopic images were then analyzed and examined for significant differences using the Friedmann test. The brush heads ($n=1$) were scanned in the initial state and after 50 k cycles of tooth brushing simulation in the microcomputer tomograph at high resolution (18 μm) and qualitatively evaluated. The quality of the bristle surface was also assessed and an overall bristle evaluation (consisting of bristle rounding and bristle surface together) was recorded.

The macroscopic images showed only minimal changes such as bending, splaying or fraying of the outer toothbrush bristles after the entire toothbrushing simulation, as described by Van Leeuwen in the modified Conforti index. When evaluated with the transparent mask, the microscopic images showed that the bristle ends of ADA Control (100%), Dr. Best (100%), Prokudent (96%), Alverde (87%), Alterra (82%) and Hydrophil (73%) were acceptably rounded. While the bristle surfaces of the tested toothbrushes ADA Control, Alterra, Prokudent (100%) and Alverde (98%) were of good quality, Hydrophil (71%) was able to pass the test with significantly less acceptable bristle surfaces at all simulation times. Hydrophil achieved few acceptable bristle surfaces in the initial state and after 12.5 k cycles in contrast to the further course of the simulation. The overall evaluation of the bristles for the tested toothbrush models ADA Control (100%), Dr. Best (100%), Prokudent (96%), Alverde (84%) and Alterra (82%) was acceptable. Only the toothbrush from

Hydrophil (51%) only achieved an acceptable overall bristle rating for half of all the bristles examined. The micro-computed tomography images showed little overall difference in the appearance of the individual bristles and in the configuration of the bristle tufts after the 50 k simulation.

The examination of the dentin revealed a dentin roughness of 3.4-3.8 μm (Hydrophil - Alterra). The dentin abrasion of the individual toothbrushes did not differ significantly. The modulus of elasticity was 1.14-1.81 MPa (Prokudent - Alterra). The composition of the elements of all toothbrush models examined was similar to that of the control toothbrush (ADA).

Most of the bristles of the toothbrushes examined had acceptable bristle end rounding and bristle surfaces. In terms of wear, dentine roughness, mechanical and chemical properties, the bristles made from castor oil were similar to conventional polyamide bristles.

This study shows that toothbrushes with castor oil bristles should also be investigated in the future, particularly with regard to their properties, safety and cleaning effectiveness when brushing teeth. This is particularly true in view of the fact that toothbrushes made from alternative raw materials such as castor oil are increasingly being sold. The tests carried out here offer various starting points to build on in future studies on toothbrushes.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Tribologisches System Mundhöhle am Beispiel Zähneputzen: (1) Grundkörper: Zahn (2) Gegenkörper: Zahnbürste (3) Zwischenmedium: Zahnpasta mit Abrasivpartikeln (4) Umgebungsmedium: Speichel/ Luft modifiziert aus DIN 50320 [47].....	21
Abbildung 2 Drei-Körper-Verschleiß – Abrasion am Beispiel von Nahrungsbolus mit Abriebpartikeln modifiziert nach Kunzelmann [62]	22
Abbildung 3 Conforti-Index modifiziert nach Van Leeuwen zur Bewertung der Zahnbürstenabnutzung nach Kategorien [128]	26
Abbildung 4 Schemazeichnung zur Beurteilung der Borstenendabrundung nach Chong & Beech: Doppelmaske bestehend aus zwei Einzelkonturen (schwarz) mit Zwischenbereich als Intervall für eine akzeptable Borstenendrundung (blau schraffiert) einer Borste (rosa) [2].....	28
Abbildung 5 Klassifikation akzeptabel und nicht akzeptabel abgerundeter Borstenenden nach Reiter & Wetzels in Anlehnung an die Klassifikation von Silverstone & Featherstone [160, 170]	29
Abbildung 6 (a) Miswak [231], (b) Baum Arak	31
Abbildung 7 Bestandteile einer Handzahnbürste modifiziert nach DIN 22254: 1 Büschel, 2 Filamente, 3 Besteckungsebene, 4 Bürstenkopf, 5 Besteckungsebene, 6 Besteckungsoberfläche, 7 Besteckungsfläche, 8 Bürstenkopf, 9 vorgefertigte Bohrung zur Büschelaufnahme, 10 Bürstenhals [225].....	33
Abbildung 8 Vier verschiedene Grifftypen: (a) gerade, (b) gewinkelt, (c) versetzt, (d) gewinkelt und versetzt modifiziert nach Mintel & Crawford [237].....	34
Abbildung 9 Auswahl von Zahnbürstenprofilen von der Seite: (a) plan mit parallel stehenden Borsten, (b) Hoch-Tief, (c) gezackt/ gewellt, (d) mit verlängerten Außenborsten, (e) konturiert (hier konkav), (f) schrägstehende Borsten.....	36
Abbildung 10 Schematische Darstellung eines Borstenendes an (a) einer abgerundeten homogenen Nylonborste, (b) einer Naturborste mit zentralem Markkanal [2]	37
Abbildung 11 Handzahnbürstenmodelle (von links nach rechts): (a) ADA Control Referenzzahnbürste, (b) Alterra Bambus Zahnbürste, (c) Alverde Zahnbürste, (d) Dr. Best Green Clean, (e) Hydrophil Bambus Zahnbürste, (f) Prokudent Recycling Zahnbürste	44
Abbildung 12 ADA Control Zahnbürste (Oral B, Procter & Gamble, Schwalbach, Deutschland): Ansichten (a) von lateral, (b) im 45° Winkel, (c) von oben, (d) von frontal, (e) Gesamtansicht von oben	45
Abbildung 13 Alterra Bambus Zahnbürste (Dirk Rossmann GmbH, Burgwedel, Deutschland): Ansichten (a) von lateral, (b) im 45° Winkel, (c) von oben, (d) von frontal, (e) Gesamtansicht von oben	46
Abbildung 14 Alverde Zahnbürste (dm-drogerie markt GmbH + Co. KG, Karlsruhe, Deutschland): Ansichten (a) von lateral, (b) im 45° Winkel, (c) von oben, (d) von frontal, (e) Gesamtansicht von oben	47
Abbildung 15 Dr. Best Green Clean Zahnbürste (GlaxoSmithKline Consumer Healthcare GmbH & Co. KG, München, Germany): Ansichten (a) von lateral, (b) im 45° Winkel, (c) von oben, (d) von frontal, (e) Gesamtansicht von oben	48
Abbildung 16 Hydrophil Bambus Zahnbürste (wasserneutral GmbH, Hamburg, Deutschland): Ansichten (a) von lateral, (b) im 45° Winkel, (c) von oben, (d) von frontal, (e) Gesamtansicht von oben	49
Abbildung 17 Prokudent Recycling Zahnbürste (Dirk Rossmann GmbH, Burgwedel, Deutschland): Ansichten (a) von lateral, (b) im 45° Winkel, (c) von oben, (d) von frontal, (e) Gesamtansicht von oben	50
Abbildung 18 Maxillärer Rinderfrontzahn ca. 20 mm x 20 mm	51
Abbildung 19 IsoMet™ Low Speed Saw Niedertourentrenners (Buehler, Illinois, USA)	52
Abbildung 20 (a) Vorbereitung der Flamme, (b) Befestigung des Rinderzahnes auf dem Isometplättchen, (c) Einspannen in die Säge.....	52

Abbildung 21 (a) Sägen eines Dentinstäbchens in inziso-apikaler Richtung, (b) Sägen des Dentinstäbchens entlang der Längsachse in 2 mm Abstand	53
Abbildung 22 Fertig gesägtes Dentinstäbchen mit den Abmessungen 2 mm x 3 mm x mindestens 15 mm	53
Abbildung 23 (a) Einzelteile der Aluminiummatrize, (b) Aufgeschraubte Gussform zur Herstellung von drei Proben, (c) Zugeschraubte Matrize und Applikation des Provisorienkunststoffs	54
Abbildung 24 Vorbereitete Dentinprobe: (a) Gravur der Referenzbereiche (schwarze Pfeile), (b) Abgeklebte Referenzbereiche als Vorbereitung auf die Zahnputzsimulation	55
Abbildung 25 (a) Zahnputzsimulator „Zahnbürst-Prüfmaschine-linear LR1“ (Syndicad, München, Deutschland), (b) Für diese Untersuchung fixierte Zahnbürstenmodelle im Zahnputzsimulator	55
Abbildung 26 (a) Einschleiben der Probe in den Probenhalter (roter Pfeil), (b) Fixieren der Probe im Probenhalter mit der Abdeckung	56
Abbildung 27 (a) Mittige Ausrichtung der Zahnbürste zur Probe, (b) Parallele Ausrichtung des Zahnbürstenkopfes zur Probe	57
Abbildung 28 Justierungsmöglichkeiten zum Ausrichten der Zahnbürste	57
Abbildung 29 Einstellung des Auflagegewichtes von 150 g für jede Zahnbürste	58
Abbildung 30 Herstellung der Slurrylösung im Verhältnis 1:1 mit Leitungswasser und Zahnpaste Colgate Total (Colgate Palmolive GmbH, Hamburg, Deutschland)	58
Abbildung 31 Bedienung des Zahnputzsimulators mit LCD-Displayanzeige: (a) Schalter für die Referenzfahrt, (b) „Start/Stopp-Schalter“, (c) Einstellung der Zyklenzahl	59
Abbildung 32 Arbeitsablauf: Überblick über den Ablauf der Zahnputzsimulation im Zahnputzsimulator, die Untersuchungen der Zahnbürsten und -borsten, der Dentin-Probenkörper sowie der Mikro-CT-Untersuchungen.....	60
Abbildung 33 Berechnung der Zyklen zur Simulation von 1,5 Monaten Zähneputzen im Zahnputzsimulator	60
Abbildung 34 Stiftprobenteller mit aufgeklebten Zahnbürstenborsten (helle Striche) vor der Bespinnerung	61
Abbildung 35 Rasterelektronenmikroskop ZEISS GEMINI® FESEM SUPRATM55VP, Carl Zeiss SMT AG, Oberkochen, Deutschland	62
Abbildung 36 DIN 20126 Sichtprüfung der Endabrundung der Filamente: (a) bestandene Borstenenden, (b) nichtbestandene Borstenenden [294]	63
Abbildung 37 Herstellung der transparenten Maske auf Grundlage der Sichtprüfung für bestandene Borstenenden aus der DIN 20126 [294].....	63
Abbildung 38 Transparente Maske zur Beurteilung der Borstenendabrundung: (b) bis (f) 5 verschiedene Formen akzeptabler Endabrundung sowie (a) und (g) zwei gespiegelte Konturen modifiziert nach DIN EN ISO 20126 [294]	64
Abbildung 39 REM-Aufnahme von drei Borsten bei 50-facher Vergrößerung: Überprüfung der Borstenendabrundung der obersten Borste mithilfe der transparenten Maske (roter Pfeil).....	64
Abbildung 40 REM-Aufnahmen von je einer Borste bei 50-facher Vergrößerung Borstenendabrundung: (a) akzeptabel Grad 1, (b) inakzeptabel Grad 0 (rote Pfeile)	65
Abbildung 41 REM-Aufnahmen von je einer Borste bei 50-facher Vergrößerung Borstenoberflächenqualität: (a) Grad I akzeptabel, (b) Grad II inakzeptabel	66
Abbildung 42 Micro-Computertomograph (Micro-CT 40, Scanco Medical AG, Schweiz) [314].....	67
Abbildung 43 Schema der untersuchten Schicht im oberen Drittel des Bürstenkopfs für die zweidimensionale Darstellung der Borsten	67
Abbildung 44 3D-Scanner „Oberflächen Scan KF-30“ (Hardware: SyndiCAD, München, Deutschland; Software: Certiga, Unterhaching, Deutschland)	68
Abbildung 45 Dentin-Probe: (a) unbesprüht, (b) dünn mit Entspiegelungsspray besprüht	68

Abbildung 46 (a) Aufnahme einer Probe in den metallischen Probenkörper, (b) Montage des metallischen Probenkörpers im Laserscanner	69
Abbildung 47 Voreinstellung des Fokus und Auswahl des Messfensters.....	69
Abbildung 48 (a) Scharfer Laserpunkt während Laserscan (roter Pfeil), (b) Gleichzeitige Ausgabe eines Höhenprofils am Computer	70
Abbildung 49 Gescannter Bereich des Dentinstäbchens mit den seitlichen Referenzflächen (R1, R2) und der Abrasionsspur.....	71
Abbildung 50 Berechnete Verschleißspur unter der interpolierten Ebene in Match 3D (rot)	71
Abbildung 51 Digitalmikroskop VHX-970F (Keyence Deutschland GmbH, Neu-Isenburg, Deutschland)	72
Abbildung 52 Farbige 3D-Höhenprofil	72
Abbildung 53 (a) arithmetisches Mittel in der Fläche (b) Summe aus dem Höhenwert der höchsten und tiefsten Spitze im definierten Bereich modifiziert nach Keyence Deutschland GmbH [315]	73
Abbildung 54 „Genesis Spectrum EDAX®“ (AMETEK, Mahwah, USA)	74
Abbildung 55 Mikrozugprüfgerät TC 550 (SyndiCAD, München, Deutschland)	75
Abbildung 56 Abgetrennte Borsten der Zahnbürste ADA Control in transparentem Gefäß	75
Abbildung 57 Messung des Borstendurchmessers mit der Schieblehre an definierter Position (schwarzer Punkt), siehe roter Pfeil	76
Abbildung 58 Platzieren einer Borste zwischen den Probenhaltern (roter Pfeil)	76
Abbildung 59 Messung der freien Länge eines Filaments mit der Schieblehre	77
Abbildung 60 Spannungs-Dehnungsdiagramm des Elastizitätsmoduls	77
Abbildung 61 Verschleiß der Zahnbürstenborsten ADA Control bei 0 k, 12,5 k, 25 k, 37,5 k und 50 k Zyklen (von links nach rechts) in seitlicher (obere Zeile) und frontaler (untere Zeile) Ansicht: nach allen Intervallen ist keine Abnutzung sichtbar	79
Abbildung 62 Verschleiß der Zahnbürstenborsten Alterra bei 0 k, 12,5 k, 25 k, 37,5 k und 50 k Zyklen (von links nach rechts) in seitlicher (obere Zeile) und frontaler (untere Zeile) Ansicht: nach 37,5 k und 50 k Zyklen ist nur eine leichte Abflachung der Borstenkante sichtbar (Pfeil)	80
Abbildung 63 Verschleiß der Zahnbürstenborsten Alverde bei 0 k, 12,5 k, 25 k, 37,5 k und 50 k Zyklen (von links nach rechts) in seitlicher (obere Zeile) und frontaler (untere Zeile) Ansicht: nach 12,5 k Zyklen ist eine leichte Aufspreizung der Borsten sichtbar, die mit zunehmender Zyklenzahl stärker wird (Pfeil).....	80
Abbildung 64 Verschleiß der Zahnbürstenborsten Dr. Best bei 0 k, 12,5 k, 25 k, 37,5 k und 50 k Zyklen (von links nach rechts) in seitlicher (obere Zeile) und frontaler (untere Zeile) Ansicht: ab 37,5 k Zyklen werden die Borsten immer mehr seitlich verbogen	81
Abbildung 65 Verschleiß der Zahnbürstenborsten Hydrophil bei 0 k, 12,5 k, 25 k, 37,5 k und 50 k Zyklen (von links nach rechts) in seitlicher (obere Zeile) und frontaler (untere Zeile) Ansicht: bei 50 k Zyklen verbiegen sich die Borsten entlang der Putzrichtung und es kommt zu einer Abflachung der Borsten (Pfeil).....	81
Abbildung 66 Verschleiß der Zahnbürstenborsten Prokudent bei 0 k, 12,5 k, 25 k, 37,5 k und 50 k Zyklen (von links nach rechts) in seitlicher (obere Zeile) und frontaler (untere Zeile) Ansicht: ab 25 k Zyklen spreizen sich zunehmend Borsten ab (Pfeil)	82
Abbildung 67 Balkendiagramm: Anzahl der Borsten mit akzeptabler Endabrundung während der verschiedenen Simulationszeitpunkte (0 k, 12,5 k, 25 k, 37,5 k und 50 k Zyklen)	85
Abbildung 68 Balkendiagramm: Anzahl der Borsten mit akzeptabler Oberflächenbeschaffenheit während der verschiedenen Simulationszeitpunkte (0 k, 12,5 k, 25 k, 37,5 k und 50 k Zyklen)	86
Abbildung 69 Balkendiagramm zur Borstengesamtbeurteilung (\sum akzeptable Borstenendabrundung & akzeptable Borstenoberflächenbeschaffenheit) während der verschiedenen Simulationszeitpunkte (0 k, 12,5 k, 25 k, 37,5 k und 50 k Zyklen)	88

Abbildung 70 Mikroskopische Aufnahmen (200 µm) von Zahnbürstenborsten ADA Control (links) und Alterra (rechts) nach verschiedenen Zyklen	89
Abbildung 71 Mikroskopische Aufnahmen (200 µm) von Zahnbürstenborsten Alverde (links) und Dr. Best (rechts) nach verschiedenen Zyklen.....	90
Abbildung 72 Mikroskopische Aufnahmen (200 µm) von Zahnbürstenborsten Hydrophil (links) und Prokudent (rechts) nach verschiedenen Zyklen	91
Abbildung 73 Makroskopische Aufnahmen (erste Spalte) und microcomputertomographische Aufnahmen in 2D Borstenoberfläche (zweite Spalte) und 3D (restliche Spalten) der verschiedenen Zahnbürstenköpfe nach 0 k und 50 k Zyklen: (a) – (c)'' ADA Control 0 k Zyklen, (d) – (f)'' ADA Control 50 k Zyklen bei der Borstenoberfläche leichte Deformierung der Borstenbüschel im vorderen und hinteren Bereich sichtbar, (g) – (j)'' Alterra 0 k Zyklen, (k) – (m)'' Alterra 50 k Zyklen bei der Borstenoberfläche leichte Deformierung der Borstenbüschel im vorderen Bereich sichtbar, (n) – (p)'' Alverde 0 k Zyklen, (q) – (s)'' Alterra 50 k Zyklen bei der Borstenoberfläche Deformierung der Borstenbüschel sichtbar	92
Abbildung 74 Makroskopische Aufnahmen (erste Spalte) und microcomputertomographische Aufnahmen in 2D Borstenoberfläche (zweite Spalte) und 3D (restliche Spalten) der verschiedenen Zahnbürstenköpfe nach 0 k und 50 k Zyklen: (a) – (c)'' Dr. Best 0 k Zyklen, (d) – (f)'' Dr. Best 50 k Zyklen bei der Borstenoberfläche leichte Deformierung der Borstenbüschel im vorderen und hinteren Bereich sichtbar, (g) – (j)'' Hydrophil 0 k Zyklen, (k) – (m)'' Hydrophil 50 k Zyklen bei der Borstenoberfläche leichte Deformierung der Borstenbüschel im vorderen und hinteren Bereich sichtbar, (n) – (p)'' Prokudent 0 k Zyklen, (q) – (s)'' Prokudent 50 k Zyklen bei der Borstenoberfläche leichte Deformierung der Borstenbüschel im vorderen und hinteren Bereich sichtbar	93
Abbildung 75 Spektrendiagramme zur Elementverteilung der Zahnbürstenfilamente in weiß und/oder grün: (a) ADA Control, (b) Alterra grün, (c) Alterra weiß, (d) Alverde, (e) Dr. Best grün, (f) Dr. Best weiß, (g) Hydrophil, (h) Prokudent grün, (i) Prokudent weiß	97
Abbildung 76: REM-Aufnahme bei 50-facher Vergrößerung von drei Borsten der Zahnbürste Alverde nach 50 k Zyklen Zahnputzsimulation: akzeptable Borstenoberflächenbeschaffenheit jedoch inakzeptable Borstenendabrundung (überprüft mit transparenter Maske) der mittleren Borste (roter Pfeil)	103
Abbildung 77 (a) Rizinusbaum „Ricinus communis“ [347], (b) Rizinussamen [348]	108
Abbildung 78 Verpackung Alterra Bambus Zahnbürste: biobasierte Borsten aus Rizinusöl (Oval)	115
Abbildung 79 Verpackung Alverde Zahnbürste aus Holz: Borsten aus biologisch nachwachsenden Ressourcen (Oval); empfohlene Zahnbürstenauswechslung nach zwei Monaten (roter Pfeil).....	116
Abbildung 80 Verpackung Dr. Best Nature Green Clean Zahnbürste aus nachwachsenden Rohstoffen: nachhaltiges Borstenmaterial aus Rizinusöl (Oval)	117
Abbildung 81 Verpackung Hydrophil Zahnbürste: biobasierte Borsten aus Rizinusöl/ biobasiertes Nylon (Oval)	118
Abbildung 82 Verpackung Prokudent Recycling Zahnbürste: biologische Rohstoffe auf Basis von Rizinusöl, erdölfrei (Oval); empfohlene Zahnbürstenauswechslung nach zwei Monaten (roter Pfeil)	119

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Empfehlungen für Zahnbürsten von 1948 bis 1983 [2, 87, 95, 221].....	35
Tabelle 2 Klassifizierung der Borstenoberflächenqualität in Grad I und II	65
Tabelle 3 Borstengesamtbeurteilung bestehend aus der Borstenendabrundung und der Borstenoberflächenbeschaffenheit.....	66
Tabelle 4 Makroskopischer Überblick der Zahnbürsten nach allen Simulationszeitpunkten und Bewertung des Zahnbürstenverschleißes nach dem Conforti-Index modifiziert nach Van Leeuwen [128].....	83
Tabelle 5 Borstenendabrundung der verschiedenen Zahnbürsten: Anzahl (n) akzeptabel endgerundeter Borsten an den verschiedenen Simulationszeitpunkten (0 k, 12,5 k, 25 k, 37,5 k und 50 k Zyklen)	84
Tabelle 6 Borstenoberflächenbeschaffenheit der verschiedenen Zahnbürsten: Anzahl (n) der akzeptablen Borsten an den verschiedenen Simulationszeitpunkten (0 k, 12,5 k, 25 k, 37,5 k und 50 k Zyklen)	86
Tabelle 7 Borstengesamtbeurteilung der verschiedenen Zahnbürsten: Anzahl (n) insgesamt bestandener Borsten (alle bestandenen Borsten für die Borstenendabrundung und die Oberflächenbeschaffenheit gesamt) an den verschiedenen Simulationszeitpunkten (0 k, 12,5 k, 25 k, 37,5 k und 50 k Zyklen)	87
Tabelle 8 Bemerkungen für die Zahnbürstenborsten aus den REM-Aufnahmen	88
Tabelle 9 Werte der Dentinabrasion [μm] durch die verschiedenen Zahnbürstenmodelle nach 50 k Zyklen Zahnputzsimulation: Mittelwerte und Standardabweichung (SD), 2,5% Quantile und Median	94
Tabelle 10 Mittelwerte und Standardabweichung (SD) der Oberflächenrauheit des Dentins [μm]: Mittlere arithmetische Höhe Sa und maximale Höhe Sz.....	95
Tabelle 11 Mittelwerte und Standardabweichung (SD) der prozentualen Elementverteilung der Zahnbürstenborsten	96
Tabelle 12 Mittelwerte und Standardabweichung (SD) des Elastizitätsmoduls [GPa] der Zahnbürstenborsten	98
Tabelle 13 Technische Abmessungen der mit der Schieblehre untersuchten Zahnbürsten ADA Control, Alterra Bambus, Alverde, Dr. Best Green Clean, Hydrophil und Prokudent	114
Tabelle 14 Apparative Ausstattung der Untersuchung	120

Abkürzungs- und Einheitenverzeichnis

Abkürzung	Langform
ADA	American Dental Association
At.%	Prozentsatz des atomaren Gewichts
BOP	Bleeding on probing (Blutung auf Sondierung)
BZÄK	Bundeszahnärztekammer
Ca.	circa
CLSM	Konfokale Laser-Scanning-Mikroskopie
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
DMS 5	Deutsche Mundgesundheitsstudie 5
EDX	engl. Energy Dispersive X-ray spectroscopy
EPS	Extrazelluläre Polymere Substanzen
IDZ	Institut Deutscher Zahnärzte
k	Kilo (= 1000)
KZVB	Kassenzahnärztliche Bundesvereinigung
MPa	Megapascal
N	Newton
GPa	Gigapascal
PAR-Klassifikation	Klassifikation parodontaler Erkrankungen
PLA	Polylactatacid (Polymilchsäure)
RDA	Relative Dentinabrasivität
REM	Rasterelektronenmikroskop
S	Sekunde
WHO	World Health Organization
Wt.%	Massenanteil
%	Prozent
2D, 3D	Zweidimensional. dreidimensional

1. Einleitung

Zahnbürsten werden seit mehreren Jahrhunderten genutzt [1]. Sie waren und sind bis heute das effektivste Mittel in der häuslichen Mundhygiene [2-8]. Mit der Entwicklung der ersten vollsynthetischen Faser des US-amerikanischen Unternehmens DuPont im Jahre 1938, wurden Naturfasern nach und nach durch Polyamid ersetzt [9]. Die stetige Weiterentwicklung in der Fertigungstechnik bis hin zur Massenproduktion machte die Handzahnbürste erstmals für die Allgemeinbevölkerung erschwinglich und zugänglich.

Heutzutage kann sich in industriellen Gesellschaften jeder eine Zahnbürste leisten. Es wird davon ausgegangen, dass der Markt gesättigt ist [10]. Die Handzahnbürste mit Borsten aus Polyamidfasern ist das am weitesten verbreitete Instrument zur täglichen Mundhygiene [2, 11]. Die Borsten der Zahnbürste werden in der Regel auf der Basis von Erdöl und/oder Erdgas erzeugt [12].

Angesichts der Endlichkeit fossiler Ressourcen und des wachsenden Verbraucherwunsches nach umweltbewusstem und nachhaltigem Leben hat die Dentalindustrie begonnen alternative Rohstoffe zur Herstellung von Borsten zu nutzen. Eine verbreitete Alternative sind Zahnbürsten mit Borsten aus Rizinusöl, das aus den Samen des Rizinusbaums gewonnen wird. Rizinusöl ist ein nachwachsender Rohstoff und stellt eine umweltfreundliche Alternative zu erdölbasierten Materialien dar.

Um die Reinigungseffizienz und Anwendungssicherheit zu gewährleisten, sollten Zahnbürsten mit Borsten aus Rizinusöl in ihren mechanischen und chemischen Eigenschaften gleichwertig zu herkömmlichen Polyamidzahnbürsten sein. So gilt die Endabrundung von Zahnbürstenborsten beispielsweise als ein etablierter Standard in ihrer Herstellung. Inwieweit sich Zahnbürsten aus Rizinusöl von herkömmlichen aus Erdöl oder Erdgas hergestellten Polyamid-Zahnbürsten unterscheiden, ist nicht ausreichend bekannt.

Auf den Verpackungen von Zahnbürsten aus Rizinusöl wird darauf hingewiesen, dass alle zwei Monate eine neue Zahnbürste verwendet werden sollte. Es herrscht jedoch Unklarheit darüber, aus welchem Grund zu diesem Zeitpunkt eine Auswechslung erfolgen sollte. Es gibt kaum Untersuchungen, die zeigen, inwieweit die Zahnbürste nach zwei Monaten abgenutzt ist. Ziel ist es den Verschleiß der Zahnbürstenborsten mit zunehmender Benutzungsdauer genauer zu untersuchen, um das Auswechslungsintervall der Zahnbürste, bezogen auf die Abnutzung der Borsten, besser bestimmen zu können.

Gerade im Hinblick darauf, dass Zahnbürsten eine wichtige Rolle in der Prävention von oralen Erkrankungen spielen, sollten Zahnbürsten auf der Basis von Rizinusöl untersucht werden, ob sie den Anforderungen, die auch für herkömmliche Polyamid-Zahnbürsten gelten, entsprechen können.

1.1 Karies und Parodontalerkrankungen

Laut der WHO sind mehr als 3,5 Milliarden Menschen der Weltbevölkerung von oralen Erkrankungen betroffen. Karies und Parodontalerkrankungen zählen zu den beiden weltweit führenden oralen Erkrankungen [13]. Die Zahnkaries oder Karies ist eine hochkomplexe, multifaktorielle Erkrankung, lokalisiert an der Zahnhartsubstanz, die sowohl den Entstehungsprozess als auch die daraus resultierende Läsion bezeichnet [14-16]. Grundlage für die Entwicklung eines pathogenen Prozesses bildet der bakterielle Biofilm [14, 16, 17].

Durch ein komplexes Zusammenspiel aus säureproduzierenden Bakterien, welche in der Lage sind, einfache Kohlenhydrate wie beispielsweise Saccharose zu fermentieren, der häufigen Aufnahme von kariogenen Mahlzeiten, sowie zahlreichen Wirtsfaktoren wie der chemischen Zusammensetzung der Zahnhartgewebe, der Speichelzusammensetzung und -fließrate, entstehen Schwankungen des pH-Wertes an der Grenzfläche zwischen dentaler Zahnplaque und Zahnoberfläche. Diese können zu Störungen des physiologischen Gleichgewichts der Mundflora führen und die Demineralisierung des Zahnes begünstigen. In der Konsequenz findet eine chemische Auflösung der Zahnhartsubstanzen statt [14-20].

Charakteristische Befunde für die Entmineralisierung der Zahnoberfläche sind weißliche oder bräunliche Opazitäten oder Rauigkeiten auf der Zahnoberfläche [15, 21]. Eine initiale kariöse Läsion kann sich bis zur Kavitation weiterentwickeln. Sobald der Oberflächeneinbruch des Schmelzes stattgefunden hat, ist es nicht mehr möglich den Defekt mit häuslichen Mundhygienemitteln wie einer Zahnbürste zu reinigen und es bedarf einer Restauration.

Auch parodontale Erkrankungen wie Gingivitis und Parodontitis entstehen auf der Grundlage von dentalen Biofilmen [22-28]. Während bei der Gingivitis lediglich entzündliche Veränderungen der Gingiva stattfinden, beschreibt die Parodontitis die Entzündungen des gesamten Zahnhalteapparates. Typische Zeichen für eine Gingivitis sind Rötung, Schwellung und erhöhte Blutungsneigung [22]. Da die Gingivitis eine reversible Erkrankung ist, kann diese durch die Kontrolle des supragingivalen Biofilms, mithilfe von Zahnbürste und approximalen Mundhygienemitteln regenerieren [29].

Eine Parodontitis bezeichnet hingegen die voranschreitende Zerstörung des Zahnhalteapparates, die sich durch den Verlust des klinischen Attachements, eine erhöhte Taschensondierungstiefe, den radiologisch gesicherten Knochenabbau und das Bluten auf Sondieren äußert [30, 31]. Von der schweren Parodontitis, der sechsthäufigsten Erkrankung weltweit, sind nahezu 10% der Menschen betroffen [32, 33].

Karies und Parodontitis stellen die häufigsten Gründe dar, weshalb beim Menschen Zahnverlust auftreten kann [33, 34]. Die mangelhaft ausgeführte Mundhygiene gilt als eine bedeutende Ursache zur Entstehung dieser komplexen Erkrankungen [20, 35]. Die dentale Biofilmkontrolle stellt ein zentrales Mittel zur Prävention dar [36]. Hierfür können mechanische Zahnreinigungsmittel wie die Zahnbürste einen zentralen Platz einnehmen. Diese früh und stetig durchgeführten präventiven Maßnahmen zeigen, dass dentale Erkrankungen verhindert oder im frühen Krankheitsstadium positiv beeinflusst werden können [37, 38].

1.2 Oraler Biofilm

Die Mehrzahl aller Organismen lebt in Biofilmen organisiert, welche an Oberflächen gebunden sind [39]. Biofilme sind hochkomplexe bakterielle Populationen [25]. Diese komplizierte Mikroorganismengemeinschaft ist in der Lage Infektionen am Individuum auszulösen [14]. Die Mundhöhle besteht aus zahlreichen Oberflächen, denen eine Vielzahl von Bakterien anhaften [40]. In 1 g von Zahnoberflächen anhaftendem Biofilm befinden sich ca. 10^{10} - 10^{11} Bakterien.

Dentale Plaque, oraler Biofilm oder umgangssprachlich auch Zahnbelag genannt, ist eine Zusammensetzung aus Bestandteilen von Bakterienzellen, bakteriellen Stoffwechselprodukten, Bestandteilen des Speichels und von Nahrungsresten. Während supragingivale Plaque eine besondere Bedeutung in der Entstehung von Karies und Gingivitis zukommt, ist subgingivale Plaque entscheidend für die Entstehung von Parodontalerkrankungen [25].

Eine Zahnplaque entwickelt sich in mehreren Phasen. An einer sauberen Zahnoberfläche oder einem gerade durchgebrochenen Zahn kommt es innerhalb kürzester Zeit zur Bildung eines sogenannten Pellicles. Dieses wird aus Proteinen des Speichels gebildet. Durch spezifische Rezeptoren können sich sogenannte Frühbesiedler an diese Schicht anheften. Diese bilden die Voraussetzung für das Anheften weiterer Bakterien. Wird diese Schicht nicht entfernt, nimmt die Plaque an Dicke und Komplexität zu. Es entsteht ein ausgereifter oraler Biofilm [25, 41-43].

Damit sich orale Biofilme nicht immer weiter ausdifferenzieren, muss eine regelmäßige Mundhygiene bestehend aus häuslichem Zähneputzen sowie Reinigung der Interdentalräume stattfinden. Da der Interdentalraum mit der Zahnbürste schwer zu erreichen ist, müssen zusätzliche Hilfsmittel wie Interdentalbürstchen und Zahnseide zum Einsatz kommen. Wird die Plaqueschicht bzw. der Biofilm über einen langen Zeitraum nicht entfernt, kommt es zur Ausbildung einer Entzündung des umliegenden Gewebes [44-46].

1.3 Verschleiß

Als Verschleiß wird der progrediente Materialverlust aus der Oberfläche eines Festkörpers bezeichnet, der durch den Kontakt und die Relativbewegung eines festen, flüssigen oder gasförmigen Gegenkörpers verursacht wird. Kleinste Verschleißpartikel und die Änderung des Stoffes und der Form der beanspruchten Oberflächenschicht machen Verschleiß sichtbar. Verschleißmechanismen bezeichnen ablaufende physikalische und chemische Prozesse, die in der Lage sind Oberflächenverluste hervorzurufen [47, 48]. Zur Einordnung der verschiedenen Verschleißmechanismen wird sich den Grundlagen der Tribologie bedient [48]. Sie befasst sich mit der Thematik von Reibung und Verschleiß, einschließlich Schmierung [49].

1.3.1 Oraler Verschleiß

Zum genaueren Verständnis von Zahnverschleiß sollte die Mundhöhle als Teil eines tribologischen Systems betrachtet werden [50]. Tribologische Systeme bestehen aus vier Hauptkomponenten: einem Grundkörper, dem dazugehörigen Gegenkörper, einem Zwischenstoff sowie einem Umgebungsmedium [47]. Den Grundkörper stellt bezogen auf die Mundhöhle ein Zahn dar. Der Gegenkörper kann ein antagonistischer Zahn, dem Weichgewebe, der Zunge oder auch mechanische Mundhygienehilfsmittel wie die Zahnbürste entsprechen. Mögliche Zwischenmedien können die Zahnpasta oder Nahrungsbestandteile sein. Das Umgebungsmedium wird meist aus Speichel und Luft gebildet [50] (Abbildung 1).

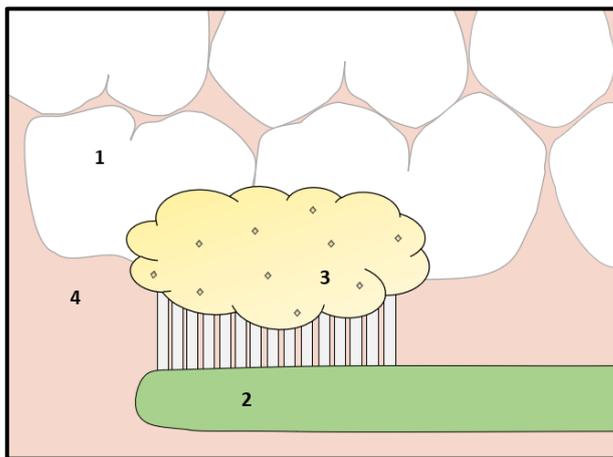


Abbildung 1 Tribologisches System Mundhöhle am Beispiel Zähneputzen: (1) Grundkörper: Zahn (2) Gegenkörper: Zahnbürste (3) Zwischenmedium: Zahnpasta mit Abrasivpartikeln (4) Umgebungsmedium: Speichel/ Luft modifiziert aus DIN 50320 [47]

Der Mund stellt eine dynamische Umgebung dar, in der sowohl mechanische als auch chemische Abläufe stattfinden [48, 51]. Mechanische Vorgänge sind entweder durch den direkten Kontakt oder den Abrieb durch Partikel bestimmt. Hinzu kommt eine chemische Beeinflussung, die durch Säuren aus der Nahrung bedingt sein kann. In diesem Zusammenhang kann zwischen Abrasion, Attrition, Erosion und Abfraktion unterschieden werden [48, 52, 53]. Beim Zahnverschleiß handelt es sich um ein komplexes, multifaktorielles Geschehen [54-57]. Unter anderem spielen die Ernährungsgewohnheiten, bestimmte Nahrungsbestandteile, die Mundhygiene oder auch Erkrankungen wie Saurereflux eine Rolle [54].

Die verschiedenen Verschleißmechanismen wirken meistens in Kombinationen und bestehen unterschiedlich lange und intensiv [51, 56, 57]. Sie können jeweils charakteristische klinische Abnutzungsmuster entstehen lassen [58]. Die zunehmende Aufnahme von weicher, verarbeiteter Kost hat seit der industriellen Revolution zu einem Rückgang von mechanischem Zahnverschleiß geführt [51, 58]. Jedoch scheint mit dem Aufkommen der modernen Existenz ein deutlich gesteigener Verbrauch von Säuren die orale Flora aus dem Gleichgewicht zu bringen und es treten vermehrt Erosionen auf [58]. Zervikaler, starker okklusaler oder erosiver Verschleiß stellen die bedeutendsten Formen von extremer dentaler Abnutzung dar [51].

Die Abrasion wird in der Zahnmedizin am häufigsten für die Beschreibung von dentalem Verschleiß verwendet [48]. Charakterisiert wird sie durch zwei bewegliche Oberflächen, zwischen denen sich eine Schicht von Abriebpartikeln befindet, die in der Lage sind Material von beiden Oberflächen abzutragen. Die dentale Abrasion ist eine Form des Drei-Körper-Verschleißes. Sie entsteht durch die Wechselwirkung von Zähnen und anderen Fremdkörpern und führt zu Materialabtrag [51, 54, 55, 59]. Der Schweregrad der Abrasion ist größtenteils von der Form, Härte und Größe der dazwischenliegenden Partikel abhängig. Auch bei dieser Art des dentalen Verschleißes ist nicht jede Abrasion pathologisch [51]. Häufige Ursachen für das Auftreten von Abrasion sind Demastikation, die übermäßige oder falsche Anwendung von Mundhygieneprodukten und exogene Gründe, als Beispiel sei hier ein Handwerker genannt, der Schrauben mit den Zähnen „festhält“ [55, 59].

Die Abrasion kann generalisiert oder lokalisiert auftreten. Tritt Abrasion in Form von keilförmigen Defekten nur bukkal in den zervikalen Bereichen auf, so ist dies ein mögliches Zeichen für unsachgemäßes Zähneputzen mit Zahnpasta [51, 59, 60] (Abbildung 1). In der westlichen Gesellschaft wurde die Zahnpasta als Abrasivmittel identifiziert [59, 61]. Bei der Wirkung von abrasiven Nahrungsmitteln auf die Gesamtheit der Zahnoberflächen, wird von einem generalisierten Auftreten gesprochen (Abbildung 2).

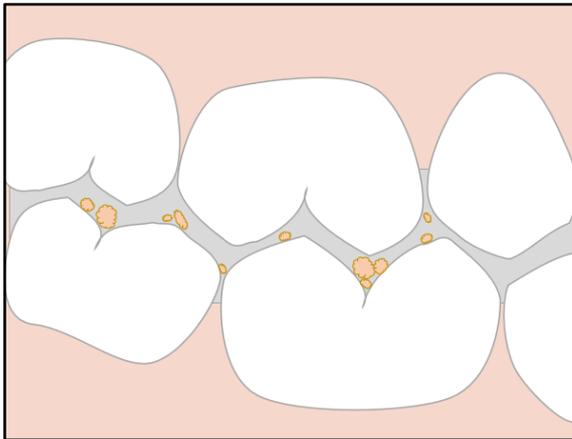


Abbildung 2 Drei-Körper-Verschleiß – Abrasion am Beispiel von Nahrungsbolus mit Abriebpartikeln modifiziert nach Kunzelmann [62]

Klinisch entsteht ein Abnutzungsbereich anstelle einer einzelnen Facette [58, 60]. Abrasion tritt im Zusammenhang mit Nahrungsaufnahme als Zeichen der Alterung auf und ist somit physiologisch [60]. Grundsätzlich sind hiervon häufig die bukkalen Höcker der unteren Molaren und die palatinalen Höcker der oberen Molaren betroffen [58]. Da der Schmelz eine sehr hohe Härte besitzt, ist er recht widerstandsfähig gegenüber mechanischer Belastung. Dentin hingegen ist ca. 10 mal weicher und deutlich organischer, weswegen es auch anfälliger gegenüber Abrasion ist [55, 59, 60]. Mithilfe von Abrasivpartikeln wird eine plastische Verformung der Zahnoberfläche erzeugt, die sich als zarte Rillen darstellt [55]. Typische klinische Merkmale, die für Abrasion sprechen, sind abgerundete Kanten und bei Dentinfreilegung eine deutliche Abgrenzung zum Schmelz. Das Dentin erscheint möglicherweise gelb-braun und nimmt ein schalenförmiges Aussehen an [48, 58, 60].

Attrition ist in der Tribologie eine Form des Zwei-Körper-Verschleißes. Zwei Oberflächen sind hier direkt miteinander in Kontakt [51]. Aufgrund der Tatsache, dass keine Oberfläche vollkommen glatt ist, entstehen Punkt-zu-Punkt-Kontakte, die an den Oberflächenunebenheiten abgerissen werden [48, 51]. Bei der dentalen Attrition entsteht Abnutzung durch den direkten Kontakt von Zahn zu Zahn [48, 51, 54, 58, 63]. Im Mund kann diese Art der Abnutzung sowohl okklusal als auch bukkal, lingual und interproximal stattfinden [51, 60].

Der Begriff Erosion, wie er in der Zahnmedizin verwendet wird, bedeutet in der Tribologie eher Korrosion oder tribochemischer Verschleiß [51, 55]. Erosion im Zusammenhang mit Zahngewebe bezeichnet den Verlust der strukturellen Integrität und die Veränderung der physikalischen Eigenschaften bis hin zur Aufweichung der Zahnhartsubstanz durch den Kontakt mit Säuren, die nicht bakteriellen Ursprungs sind [58, 64-66]. Bei neutralem pH-Wert ($\text{pH} = 7$) ist Hydroxylapatit - das Grundmaterial des Schmelzes, nur schwer wasserlöslich. Bei saurem Milieu kommt es hingegen zu einer Verschiebung des Dissoziationsgleichgewichtes ins saure Milieu, was zur Auflösung von Hydroxylapatit, und damit des Schmelzes führt [55]. Die wiederholte Umgebung säurehaltiger Substanzen an den Zähnen sowie mechanische Einwirkungen, fördern besonders den erosiven Zahnverschleiß [55, 67]. Dentale Erosionen können unterschiedliche klinische Manifestationen annehmen wie die Verglasung der Schmelzoberfläche oder Konkavitäten im zervikalen Bereich [68]. Der Verschleiß kann auf allen Zahnoberflächen stattfinden, tritt jedoch am meisten an den faszialen Oberkiefer- und Unterkieferzähnen sowie an den palatinalen Bereichen der Oberkieferfrontzähne auf. Es gibt Anzeichen dafür, dass die Prävalenz von Erosionen ansteigt [69-73].

Abfraktion ist ein kontrovers diskutierter Mechanismus in Bezug auf dentalen Verschleiß [55, 59, 74]. Der Definition nach entstehen während des Kauvorgangs Zug- und Druckspannungen, welche sich am Zahnhals senkrecht zur Zahnoberfläche ausbreiten. Typische Folgen sind Mikrorisse und -abplatzungen des Schmelzes bis hin zu charakteristischen keilförmigen Defekten [55, 59].

1.3.1.1 Verschleiß beim Zähneputzen

Der Vorgang des Zähneputzens wird schon lange mit oralem Verschleiß in Verbindung gebracht. Eine falsche Anwendung von Zahnbürste und Zahnpasta wird als Hauptgrund für den Verschleiß der Zahnhartsubstanz sowie für gingivale Rezessionen gesehen [75-77]. Es wurde schon früh angenommen, dass für Schäden des Hartgewebes vor allem die verwendete Zahnpasta und für Schäden des Weichgewebes besonders Läsionen durch die Zahnbürste verantwortlich sind [77]. Es wurde festgestellt, dass Abrasionsläsionen an einem oder mehreren Zähnen auftreten können. Die meisten Abrasionserscheinungen im Zusammenhang mit dem Zähneputzen, treten allerdings im Bereich der bukkalen Zahnhäse an Schneidezähnen, Eckzähnen oder Prämolaren auf. Zähne in bukkaler Fehlstellung scheinen eine besondere Prädisposition für diese Art des Verschleißes zu haben [51, 57]. In einer Untersuchung von 533 Probanden wiesen 45% keilförmige Zahnhalsdefekte sowie 51% gingivale Rezessionen auf. Die Hart- sowie Weichgewebsläsionen waren häufig an denselben Bereichen lokalisiert [78].

Da im Zusammenhang mit dem Zähneputzen mehrere Variablen existieren, bleibt es schwierig die Hauptursachen für das Auftreten von zervikalen Läsionen zu bestimmen. Einer der Faktoren für das Auftreten vermehrter Zahnhalsdefekte stellt mit hoher Wahrscheinlichkeit die Häufigkeit des Zähneputzens dar. Personen, die öfter als zweimal am Tag oder länger ihre Zähne putzen, weisen eine höhere Zahl von keilförmigen Defekten im zervikalen Bereich auf [2, 57, 75, 78-81]. Aber auch die verwendete Putztechnik spielt sicherlich eine entscheidende Rolle. So treten auch bei älteren Personen, die eine sehr gute Mundhygiene aufweisen zunehmend abrasive zervikale Läsionen auf [82]. Auch die individuelle angewandte Zahnputztechnik des Individuums scheint einen entscheidenden Anteil an der Entwicklung zervikaler Läsionen zu besitzen [2]. Die aufgewendete Zahnputzkraft steht in Korrelation mit der Entwicklung nicht-kariöser zervikaler Defekte und Zahnfleischreizung [76, 81, 83, 84]. Auch die Art der Zahnbürste mit entsprechender Borstenhärte, sowie Zahnputzgewohnheiten und der vorherrschende Mundhygienestatus werden mit dem Auftreten von oralem Verschleiß in Verbindung gebracht [76, 78, 81, 84-87].

Das Zähneputzen mit Zahnpasta verursacht Abrasionen an freiliegendem Zement und freiliegendem Dentin, wohingegen am Zahnschmelz nahezu kein Verschleiß auftritt [57, 87]. Die Zahnpasta selbst benötigt einen gewissen Grad an Abrasivität, um mit den enthaltenen Putzkörpern extrinsische Verfärbungen der Zähne zuverlässig entfernen zu können. Sie sollte aber gleichzeitig nicht das Hartgewebe schädigen [57].

Besonders auf erodiertem Zahnhartgewebe spielt das Maß der Abrasivität sowie die Verdünnungsrate der verwendeten Zahnpasta eine entscheidende Rolle für die Abrasion [81, 85, 88-90]. Die hohe Bedeutung der abrasiven Wirkung der Zahnpasta auf die Zahnhartsubstanz wird in der Literatur schon lange anerkannt [87, 91-93]. Daher kann nicht die Verwendung von hochabrasiven Zahnpasten beim Zähneputzen empfohlen werden [81].

Es wird davon ausgegangen, dass ein Leben lang ein geringes Maß an oraler physiologischer Abnutzung stattfindet [57, 81]. Der orale Verschleiß steigt mit dem Alter einer Person und dem Verzehr von sauren Nahrungsmitteln [80]. Die Korrelation zwischen Abrasion und Erosion kann den Effekt verstärken [81]. Es wird vermutet, dass die Zahnbürste allein einen geringen Einfluss auf den Hartgewebsabrieb hat, sie jedoch eine Bedeutung für die Modifikation der Zahnpastawirkung trägt [81, 91].

1.3.2 Borstenverschleiß – Empfehlung zur Zahnbürstenauswechslung

Zahnbürsten sollten regelmäßig ersetzt werden, da sie zu den Verbrauchsmaterialien gezählt werden. Sie haben eine begrenzte Lebenszeit und unterliegen einem gewissen mechanischen Verschleiß [94-96]. Es existieren jedoch wenige Belege, zu welchem Zeitpunkt die Zahnbürste genau ausgewechselt werden sollte. Trotzdem werden die Anwender immer wieder darauf hingewiesen regelmäßig für Ersatz zu sorgen, bevor beispielsweise die Borsten aufspreizen und das orale Gewebe schädigen.

Während sich die Empfehlungen zwischen 1962 und 1994 zum Ersetzen einer Zahnbürste stark von wenigen Wochen bis zu fünf Monaten unterschieden [94, 95], geben Zahnbürstenhersteller inzwischen genaue Hinweise auf Zahnbürstenverpackungen, ab welchem Zeitraum spätestens eine Auswechslung erfolgen soll. Dies variiert zwischen zwei oder drei Monaten Benutzungsdauer [97-99].

Auch die American Dental Association (ADA) gibt die Empfehlung Zahnbürsten nach drei bis vier Monaten oder gegebenenfalls sogar zeitiger zu wechseln, da Zahnbürsten immer mehr in ihrer Reinigungseffektivität abnehmen, je höher der Grad der Borstenabnutzung ist [94, 100, 101].

Kreifeldt et al. untersuchten 1980 die Reinigungswirkung von verschiedenen Zahnbürsten, um zu bestimmen, ob abgenutzte Bürsten ihre Plaqueentfernungskapazität verlieren. Sie kamen zu dem Erkenntnis, dass mit zunehmender Abnutzung der Bürste auch die Reinigungswirkung nachließ. Insgesamt wird eine Borstenauswechslung empfohlen, sobald Anhaltspunkte der Abnutzung bemerkt werden unabhängig davon wie alt die Zahnbürste ist [102]. Dieses Ergebnis bestätigt auch eine Studie an 40 Zahnmedizinstudenten. Die Probanden, die über 10 Wochen lang immer ein und dieselbe Zahnbürste benutzten, erreichten im Gegensatz zu Probanden die alle 2 Wochen ihre Zahnbürste durch eine neue ersetzten, deutlich höhere Plaquewerte [101].

Rawls et al. entwickelten einen quantitativen Index sowie ein subjektives Maß, um den Zahnbürstenverschleiß zu analysieren. Sie vertraten die Annahme, dass mit zunehmender Abnutzung der Zahnbürste ebenfalls die Reinigungsleistung abnehme [103]. Neuere Untersuchungen konnten diese Ergebnisse weiter stützen [104-109]. Dem entgegengesetzt existieren jedoch auch mehrere Studien, die nahelegen, dass Zahnbürsten, die mehrere Wochen lang benutzt worden sind, immer noch die gleiche Plaqueentfernungseistung erreichen wie neue Bürsten [110-116].

Es gibt Belege dafür, dass auf Zahnbürsten Bakterien anhaften und dort überleben können [117-122]. Faktoren wie der Standort der Zahnbürste oder ihre Lagerungsbedingungen scheinen eine Rolle zu spielen [117]. Die ADA äußert sich jedoch nicht über Auswirkungen der mikrobiellen Besiedlung auf mögliche gesundheitsschädliche Effekte [100]. Die Zeitspanne zur Auswechslung wird hier also ungeachtet der Kontamination der Zahnbürste betrachtet [123]. Andere Studien berichten davon, dass Zahnbürsten vor allem bei Risikopatienten eine Gefahr der Rekontamination oder auch einer Infektion darstellen können [117, 120].

Da bei den Empfehlungen zum Auswechseln einer Zahnbürste seitens der Dentalindustrie und der Zahnärzteschaft gegenseitig aufeinander verwiesen wird, liegt es nahe, dass wissenschaftliche Belege hierzu fehlen [96]. Eine standardisierte Empfehlung gestaltet sich als schwierig [101]. Es wird vorgeschlagen Zahnbürsten nicht wie üblich nach dem Zahnbürstenalter zu beurteilen, da der Verschleiß der Zahnbürsten vom Individuum abhängt [101, 103, 105, 124, 125]. Es wird angenommen, dass vor allem dem verwendeten Anpressdruck und dem Individuum beim Putzen eine entscheidende Rolle zukommt. Weitere Aspekte wie die Zahnputztechnik, die Putzdauer und -häufigkeit, die verwendete Zahnpastamenge, die Wassertemperatur beim Anfeuchten der Bürste oder auch die Morphologie der Zähne tragen zur Abnutzung einer Zahnbürste bei [124-127].

Vorteilhafter für die Bewertung des Abnutzungsgrades einer Zahnbürste scheint die Borstenausdehnung. Als Grenzwert werden abspreizende Borsten über die Basis des Bürstenkopfes hinaus empfohlen, damit eine Zahnbürste als abgenutzt bewertet werden kann und ausgewechselt wird [128, 129]. Unter Zahnärzten zeigte eine Umfrage, dass die Mehrzahl gespreizte Borsten als Hauptkriterium für einen Zahnbürstenwechsel ansieht [96, 112]. Es sollte dem Patienten von seinem Zahnarzt eine kurze und treffende Erklärung über das Aussehen einer abgenutzten Zahnbürste mitgeteilt werden, damit diesem die Entscheidung über den Zeitpunkt der Zahnbürstenauswechslung leichter fällt.

Van Leeuwen et al. nutzten eine subjektive Skala zur Einschätzung der Abnutzung der Zahnbürste anhand des Abspreizens der Borsten vom Bürstenkopf, die mit Fotos bewertet wurden [128] (Abbildung 3). Es ist im Gegensatz zu Verfahren, bei denen die Veränderung der Zahnbürstenfläche [101] oder den Biegewinkel der äußeren Filamente [124] beurteilt wird, eine einfache und schnelle Methode für die Bewertung des Abnutzungsgrades [128].

Wear scores	Description
0 – No wear	No visible signs of wear, inner and outer tufts are intact
1 – Light wear	Outer tufts begin to splay, inner tufts are still intact
2 – Medium wear	Outer tufts are splayed beyond the base of the toothbrush, inner tufts begin to splay
3 – Heavy wear	Outer and inner tufts are splayed
4 – Extreme wear	Outer and inner tufts are splayed whereby no distinction can be made

Abbildung 3 Conforti-Index modifiziert nach Van Leeuwen zur Bewertung der Zahnbürstenabnutzung nach Kategorien [128]

1.3.3 In-vitro Versuche zur Zahnputzsimulation

Mit der wachsenden Anzahl von Dentalmaterialien wuchs das Interesse eine Verschleißmaschine zu entwickeln, welche das klinische Leistungspotential der Materialien voraussagen kann. In-vitro Versuche sind jedoch nicht in der Lage klinische Verschleißmechanismen von Füllungsmaterialien realistisch abzubilden. Somit ist die genaue klinische Prognose schwer möglich [48, 130-132].

Experimentelle Verfahren eignen sich besonders, um die grundlegenden Arten von Verschleiß unter standardisierten Bedingungen zu untersuchen [133]. Sie sind oft kostengünstiger und benötigen häufig einen deutlich kürzeren Untersuchungszeitraum als in-vivo-Versuche. Des Weiteren kann es sich als kompliziert erweisen den Verschleiß in-vivo adäquat zu quantifizieren, da auch unter den Individuen eine große biologische Variation herrscht [62, 134, 135]. Es existieren verschiedene Grundgedanken für experimentelle Methoden. Einerseits geht es um die Vereinfachung der Versuchsanordnung zur Untersuchung einzelner Variablen, andererseits ist die Verfeinerung der Versuchsmethode möglich, um die orale Umgebung genauer simulieren zu können [130, 131, 136].

Im Laufe der Zeit wurden Verschleißprüfgeräte mit unterschiedlichster Komplexität konstruiert: Zwei-Körper- und Drei-Körperverschleißgeräte. Der Kausimulator, die ACTA-Maschine, sowie der Zahnputzsimulator gehören zu Geräten des Drei-Körper-Verschleißes [137]. Auf der Grundlage von klinischen Untersuchungen zu Zahnputzgewohnheiten, konnten zahlreiche Zahnputzsimitatoren entwickelt werden [93, 129, 130, 138-144]. Der Versuchsaufbau eines Zahnputzsimitators besteht in der Regel aus mehreren Elementen. Das zu testende Material, wie beispielsweise das Dentin, das den Grundkörper darstellt. Der dazugehörige Antagonist ist die Zahnbürste mit allen möglichen Bürstenkonfigurationen und -materialien. Einen weiteren Grundbestandteil stellt das Zwischenmedium in Form einer Zahnpasta dar. Viele weitere standardisierte Einstellungsvariablen wie beispielsweise Bewegungsmuster, Last und Zyklenzahl der Zahnbürste spielen außerdem eine wichtige Rolle in der Standardisierung der Versuchsparameter [62, 137].

Bisher haben schon zahlreiche in-vitro-Versuche im Zusammenhang mit Verschleiß und Oberflächenveränderungen von oralem Gewebe [85, 138, 145-153] oder Dentalmaterialien [92, 154-159] durch Zahnputzsimulation stattgefunden.

1.4 Methoden zur Untersuchung und Bewertung von Zahnbürstenborstenenden

Die Endabrundung von Zahnbürstenborsten ist ein wichtiges Kriterium für eine Zahnbürste, da hierdurch die gingivale Traumatisierung reduziert werden kann. Daher gilt es diese Eigenschaft adäquat und regelmäßig an aktuellen, auf dem Dentalmarkt erhältlichen Zahnbürstenmodellen zu untersuchen [160, 161]. In der Literatur werden unterschiedliche Praktiken zur Beurteilung der Borstenenden genannt. Die nach wie vor gebräuchlichste Methode stellt die subjektive Auswertung der über ein Mikroskop dargestellten Borsten dar. Die Untersuchung durch Vergrößerung stellt ein rein visuelles Auswertungsverfahren dar, bei dem 3D-Borsten in einem 2D-Bild dargestellt werden [161].

In der Vergangenheit haben zahlreiche Untersuchungen mit Lichtmikroskopen bzw. Stereomikroskopen [162-168] sowie Rasterelektronenmikroskopen [125, 160, 161, 165, 169-179] stattgefunden. Ein weiteres Verfahren zur Beurteilung der Borstenendabrundung stellt die Formfaktoranalyse dar. Hierbei werden REM-Aufnahmen angefertigt, die nach Digitalisierung in einer Software zur Bildanalyse ausgewertet werden können [180, 181]. Dieses Auswertungsverfahren ist das einzige bekannte quantitative Verfahren, dass jedoch deutlich arbeitsaufwendiger und zeitintensiver ist [161].

Zur Bewertung der untersuchten Borstenenden wurde 1983 erstmals der Versuch unternommen die Abrundung mithilfe einer transparenten Doppelmaske zu beurteilen [2]. Mithilfe eines Projektionsmikroskop war es möglich die Kontur der einzelnen Borstenenden mit der Maske zu überlagern. Die Maske wurde dabei anhand der gleichen Vergrößerung des Mikroskop-Bildes gezeichnet und bestand aus zwei Einzelkonturen, deren Zwischenbereich das Intervall für eine akzeptable Borstenendrundung darstellte (Abbildung 4).

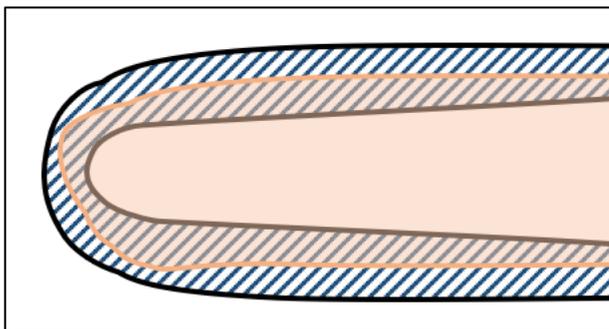


Abbildung 4 Schemazeichnung zur Beurteilung der Borstenendabrundung nach Chong & Beech: Doppelmaske bestehend aus zwei Einzelkonturen (schwarz) mit Zwischenbereich als Intervall für eine akzeptable Borstenendrundung (blau schraffiert) einer Borste (rosa) [2]

Zur Einschätzung der Morphologie und Struktur der Borstenendabrundung wurden verschiedenste Klassifikationen aufgestellt [160, 162, 170, 178]. Bei Adriaens et al. wurden die Borstenenden einzelner Borstenbüschel anhand von sieben möglichen Formen eingeteilt, wovon Typ A und B die optimale halbsphärische Borstenspitze, beziehungsweise eine flache Borstenspitze jedoch mit abgerundeten Kanten darstellt, die mit einem fließenden Übergang zum Borstenschaft verbunden ist. Alle anderen Konturen C - G werden als inakzeptable Borstenenden eingeteilt. Außerdem erfolgt die zusätzliche Einschätzung der Oberflächenbeschaffenheit des Borstenendes [178].

Auch in der Klassifizierung von Silverstone und Featherstone gelten drei verschiedene Konturen als akzeptable Borstenendrundung, die sich am optimalen hemisphärischen Borstenende orientieren, wohingegen sieben weitere Umrissformen als inakzeptabel gelten [160] (Abbildung 5).

Diese Klassifikation wurde ein paar Jahre später von Reiter und Wetzel modifiziert. Sie machten eine weitere Unterscheidung der nicht-akzeptablen Borstenenden je nachdem, wie diese in der Produktion bearbeitet wurden. Sie benannten dafür sieben verschiedene Typen, wie beispielsweise das zerklüftete oder schräg abgeschnittene Borstenende [170]. Die letzten beiden Klassifikationssysteme werden auch in den letzten Jahren als geltende Kriterien zur Beurteilung der Borstenendabrundung genutzt [165, 174, 176, 179].

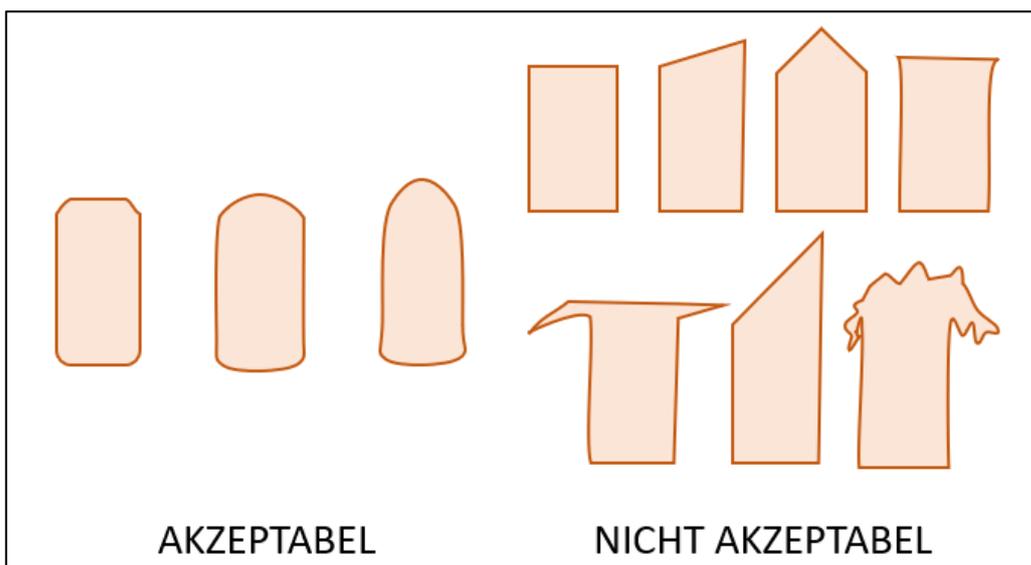


Abbildung 5 Klassifikation akzeptabel und nicht akzeptabel abgerundeter Borstenenden nach Reiter & Wetzel in Anlehnung an die Klassifikation von Silverstone & Featherstone [160, 170]

1.5 Methoden zur Oberflächenanalyse

Der konventionelle Forschungsansatz für orale Dentalmaterialien bestand ursprünglich darin, die Qualität anhand von Indizes zu beurteilen. Da die Resultate der Untersuchungen jedoch häufig unzureichend waren, wurden mehrere Versuche unternommen die Materialien auch quantitativ bewerten zu können [135, 182, 183].

Krejci et al. fassen die zwischen 1977 und 1993 gängigen Verschleißmessverfahren zusammen und unterteilen sie in optische [184, 185], volumetrische [186, 187], rasterelektronenmikroskopische [188, 189] sowie mechanische computer-unterstützte [190-194] und rein mechanische [195, 196] Messverfahren zur Quantifizierung des Verschleißes [197].

Die Auswertung von dreidimensionalen Bildern aus Scan-Verfahren wird als zufriedenstellende Methode zur Messung des Verschleißes dentaler Materialien angesehen [198]. Das 3D-Scannen ist ein quantitatives Messverfahren, das von der untersuchten Oberfläche sequenzielle Bilder erstellen kann und vergleichende Untersuchungen möglich macht [198, 199].

Die Profilometrie ist eine der am meisten genutzten Untersuchungsmethoden zur Beurteilung von Veränderungen der Oberfläche der Zahnhartsubstanz oder von Füllungsmaterialien [159, 200-216]. Bei der Kontaktprofilometrie kann mithilfe eines Messtasters mit einer scharfen Diamantspitze, dessen Radius zwischen 1,5 – 2,5 μm beträgt [156, 200, 217], das Profil, die Kontur sowie die Rauheit der Oberfläche gemessen werden. Gleichzeitig erfolgt eine Aufzeichnung in einem Pfad-Höhen-Diagramm [214]. Taktile Profilometer haben den Vorteil genaue Ergebnisse bei verhältnismäßig geringem Kostenaufwand zu liefern. Außerdem bleiben sie bei Veränderungen der Transparenz oder Farbe der Oberfläche unbeeinflusst. Dennoch arbeiten Stylus-Profilometer recht langsam und setzen starre Oberflächen voraus [198]. Die Diamantspitze kann außerdem keine konkaven Radien messen, weshalb Details der Oberfläche verloren gehen könnten [200]. Ein weiteres potenzielles Problem ist die Verletzung der Probenoberfläche durch die Diamantspitze des Tastarms. Die Spitze übt eine Kraft auf die Oberfläche aus und erzeugt somit eine gewisse Druckspannung. Diese wird bedingt durch die aufgewendete Kraft und die Größe der Kontaktfläche [200, 214].

Die kontaktlose Profilometrie wie Laserprofilometrie oder konfokale Laser-Scanning-Mikroskopie (CLSM), ist ein schnelles optisches Messverfahren, welches die Probleme der taktilen Profilometrie, aufgrund der Berührungsfreiheit zur untersuchten Oberfläche, bewältigen kann [200, 214]. Der herkömmliche Messtaster ist hier nicht mechanisch, sondern besteht aus einer Lichtquelle oder einem Mikroskop, welches auf die Oberfläche ausgerichtet ist. Die Messung erfolgt dann aufgrund der Ablenkung eines Laserstrahls und der Anwendung des konfokalen Prinzips. Geringfügig nachteilig erscheint an der kontaktlosen Profilometrie die Tatsache, dass die Notwendigkeit einer nicht transparenten und einer diffus reflektierenden Oberfläche besteht [198, 200]. Es wurde jedoch herausgefunden, dass die erzielten Ergebnisse verschiedener optischer Verfahren gut übereinstimmen und keine signifikanten Unterschiede existieren, weshalb beide Verfahren eingesetzt werden können [218].

1.6 Zahnbürsten

1.6.1 Funktion und Entwicklung der Zahnbürsten

Die Zahnbürste gilt seit langer Zeit als eines der wichtigsten, einfachsten und gleichzeitig effektivsten Hilfsmittel bei der häuslichen Mundhygiene zur Aufrechterhaltung der Zahngesundheit [2-8, 219, 220]. Sie spielt eine immense Bedeutung in der Prävention von Karies und Parodontalerkrankungen [178, 221, 222]. Viele Menschen verbinden mit dem Zähneputzen ein sauberes frisches Mundgefühl und eine verbesserte Ästhetik [10, 221, 223, 224].

Die Zahnbürste hat das Ziel die lingualen, bukkalen und okklusalen Zahnoberflächen mechanisch zu reinigen [178, 225]. Damit kann die supragingivale bakterielle Plaque kontrolliert werden [2, 3]. Für die Interdentalraumreinigung ist die Zahnbürste allein jedoch oft unzureichend, daher wird es nötig zusätzlich andere mechanische Hilfsmittel wie Zahnzwischenraumbürsten oder auch Zahnseide zu nutzen [8, 29, 44, 45, 178, 226].

Die Geschichte der Zahnbürste beginnt schon bei den frühzeitlichen Menschen. Sie kauten kleine Äste von Pflanzen [1, 227]. Der sogenannte Miswak oder Siwak, gewonnen aus dem Baum Arak, wurde und wird auch heute noch in einigen nahöstlichen, asiatischen und afrikanischen Gemeinschaften verwendet (Abbildung 6) [1, 227-230]. Diese Zweige gewährleisteten durch ihr Auffasern und Weichwerden beim Kauen an den Zweigenden die Reinigung der Zahn- und Weichgewebsoberflächen. Sie sorgen außerdem für einen frischen Atem durch ihre besonderen aromatischen Eigenschaften [1]. Quellen berichten, dass schon ca. 3000 v. Chr. Kaustöcke von den Babyloniern sowie den Ägyptern genutzt wurden [227, 229].



(a)

(b)

Abbildung 6 (a) Miswak [231], (b) Baum Arak

Die ersten Datierungen, die den heutigen Zahnbürstenmodellen ähneln, reichen bis nach China [1, 230, 232]. Diese Zahnbürsten bestanden aus Borsten, die aus dem Nacken von Schweinen gezupft wurden, um anschließend in Holz oder Knochen von Ochsen eingearbeitet zu werden [227, 230]. Orientalische Händler verbreiteten dann diese Art der Zahnbürste bei den Europäern, nach deren Auffassung die Borsten allerdings viel zu hart waren.

Es wurden bevorzugt Pferdehaarborsten genutzt bis sich Dr. Pierre Fauchard 1723 erstmals kritisch über die Ineffektivität solcher Pferdehaarbürsten in seinem Buch äußerte und das unregelmäßige Putzen bei großen Teilen der Bevölkerung beanstandete [227]. Als im 19. Jahrhundert Louis Pasteur seine Keimtheorie postulierte, stellte dann die Zahnärzteschaft einen Zusammenhang mit den Naturborsten fest. Außerdem wurde vermutet, dass scharfe Borstenenden Grundlage für Mundinfektionen darstellen können [227].

Im Jahr 1938 wurde vom US-Unternehmen DuPont erstmals eine Zahnbürste mit künstlich hergestellten Filamenten, den sogenannten Exton-Borsten vorgestellt. Diese Zahnbürste trug den Namen „Dr. West’s Miracle Tuft Toothbrush“ und ihre Borsten wurden als Nylon-Borsten benannt. Diese Erfindung bedeutete eine Revolution in der Dentalindustrie [227]. Es wird vermutet, dass 1780 in England vom Kaufmann William Addis, während er im Gefängnis saß, die erste moderne, serienmäßig hergestellte Zahnbürste erfunden wurde [1, 230, 233, 234].

Er gründete nach seiner Entdeckung das Unternehmen „Wisdom Toothbrushes“, welches heute noch aktiv ist [234, 235]. Bis Mitte des 20. Jahrhunderts wurden Zahnbürsten aus Pferde- oder Schweineborsten in Massenproduktion in China oder Russland hergestellt und nach England exportiert. Doch im Zuge des zweiten Weltkrieges wurde die Umstellung auf Nylonborsten gefördert, da Naturborsten Mangelware waren [1, 87, 221, 230].

Das Nylonmaterial war im Gegensatz zu den Naturborsten widerstandsfähiger gegen Verformung und feuchtigkeitsundurchlässig, wodurch die Borsten trocknen konnten, und Bakterienwachstum besser verhinderten. Jedoch waren die ersten Nylonfilamente mit dem gleichen Durchmesser und der gleichen Länge auch steifer, sodass das Weichgewebe vermehrt verletzt wurde und Zahnärzte anfangs sogar Nylonzahnbürsten ablehnten [1, 87, 221, 227]. In den frühen 1950er Jahren wurden die Borsten dann optimiert [227].

Um 1960 wurde von der Squibb Company die erste elektrische Zahnbürste als „Broxodent“ eingeführt [227, 233]. Ein Jahr später wurde eine kabellose elektrische Zahnbürste entwickelt. Die Entwicklung der Zahnbürste ging stetig voran und heute existieren Zahnbürstenmodelle zahlreicher Hersteller in allen Facetten, die die Verbraucher vor eine große Auswahl stellen.

1.6.2 Konstruktionselemente

Hauptbestandteile einer modernen Zahnbürste bilden der Bürstenkopf und der Griff [1, 2, 10, 236]. Der Bürstenkopf (Abbildung 7) stellt den Abschnitt der Zahnbürste dar, an dem die Filamente befestigt werden [2, 10, 225]. Als Filamente werden wiederum die einzelnen Borsten bezeichnet, welche in zusammengefassten Gruppen, den Büscheln, am Bürstenkopf befestigt sind [2, 10, 221, 225]. Die Büschel können im Bürstenkopf mithilfe von kleinen Plättchen aus Metall eingeklemmt werden oder die Filamente werden direkt als Büschel in Kunststoff eingeschweißt [1, 2, 10].

Ein wichtiges Merkmal für den Bürstenkopf ist seine Größe. Es muss möglich sein, alle zu putzende Areale im Mund inklusive des letzten Molaren und der Lingualflächen der Zähne, zu erreichen [2, 87, 94]. Daher spielen für die Länge, Breite und den Schnitt der Borsten anatomische, oralhygienische und mechanisch-physikalische Überlegungen eine Rolle [94]. Gerade für Kinder eignet sich ein kleiner Bürstenkopf. Für Erwachsene kann ein kleiner Kopf unter anderem bei beengten Mundverhältnissen auch von Vorteil sein und wird daher empfohlen [94, 221, 237].

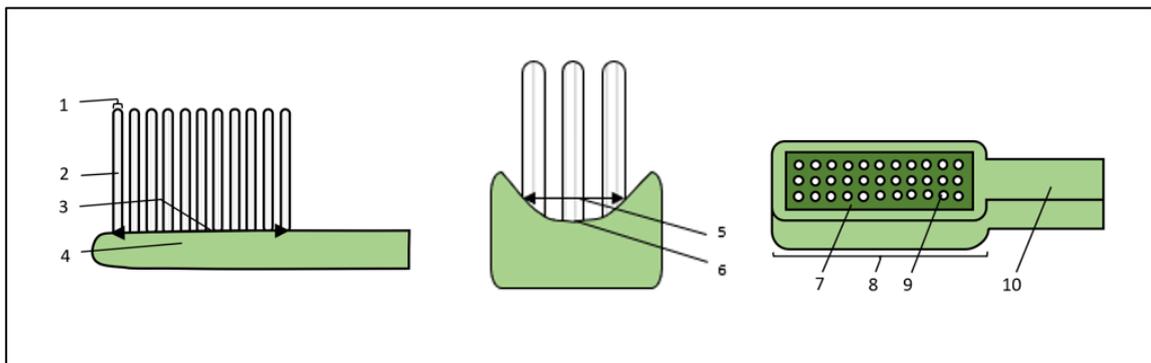


Abbildung 7 Bestandteile einer Handzahnbürste modifiziert nach DIN 22254: 1 Büschel, 2 Filamente, 3 Besteckungsebene, 4 Bürstenkopf, 5 Besteckungsebene, 6 Besteckungsoberfläche, 7 Besteckungsfläche, 8 Bürstenkopf, 9 vorgefertigte Bohrung zur Büschelaufnahme, 10 Bürstenhals [225]

Der Zahnbürstengriff ist ein einteiliges Formteil bestehend aus Polyamid, welches in den Zahnbürstenhals übergeht [2]. So verbindet der Hals den Bürstenkopf mit dem Griff [225]. Schon 1946 wurden für ein gutes Design eines Zahnbürstengriffes Empfehlungen gegeben, die größtenteils auch nach wie vor von Bedeutung sind. Das verwendete Material hat den Anspruch recht steif und starr zu sein und eine möglichst glatte, gut verarbeitete Oberfläche zu haben [221, 236].

Während die Zahnbürste im Palmargriff gehalten wird, soll der Griff bequem in der Hand des Putzenden liegen und relativ gerade in seiner Form sein [87, 94, 236]. Auch die Länge und Breite der Zahnbürste sollte den individuellen Voraussetzungen angepasst werden. Je nach dem Alter, den anatomischen Verhältnissen und der Geschicklichkeit des Einzelnen sollte eine angemessene Form gefunden werden [2, 94].

So scheint es Kindern oder auch körperlich eingeschränkten Personen leichter zu fallen Zahnbürsten mit dickerem Griffdurchmesser zu nutzen, um trotz limitierter Motorik eine möglichst genaue Führung des Bürstenkopfes zu erreichen [94]. Für Zahnbürsten existieren weiterhin verschiedene Schaftausführungen [94, 236]. Zahnbürstenhänse können gerade, gewinkelt, versetzt oder auch versetzt und gewinkelt sein [237] (Abbildung 8).

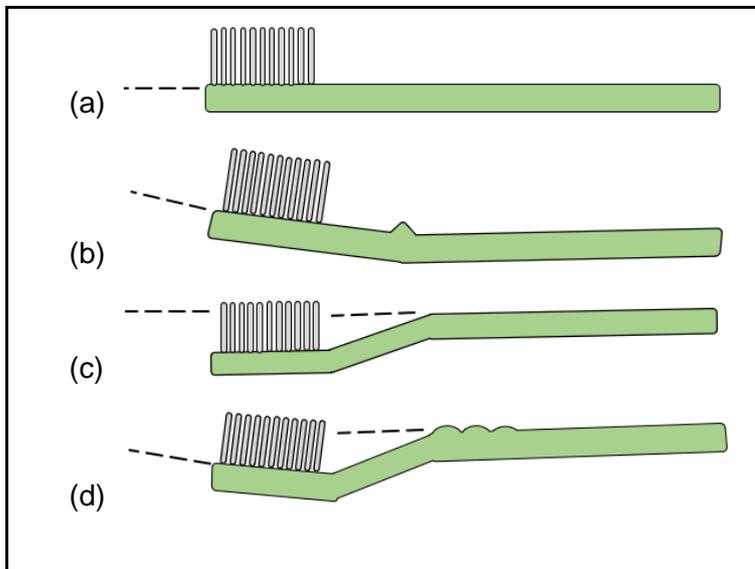


Abbildung 8 Vier verschiedene Griffotypen: (a) gerade, (b) gewinkelt, (c) versetzt, (d) gewinkelt und versetzt modifiziert nach Mintel & Crawford [237]

Obwohl die Veränderung der Lage des Griffes in Bezug auf den Bürstenkopf oft dazu führt, dass die Handhabung für die meisten Benutzer erschwert ist, wird davon ausgegangen, dass ein Winkel von bis zu 25° vernachlässigt werden kann und nahezu keine Auswirkungen hat [236]. Die Mehrheit benutzt ihre Zahnbürste wie sie gekauft wird, jedoch kann ein variierender Winkel des Bürstenkopfes zum Griff von Vorteil sein. Manche Zahnbürsten aus Kunststoff lassen sich durch Erwärmung verbiegen und können so im Winkel optimiert werden [2].

Grundsätzlich gelten als besonders ergonomisch der versetzte Griff sowie der versetzt und gleichzeitig gewinkelte Griff (Abbildung 8c, d) beschrieben, da beim Putzen der Griff und die Borstenspitzen nahezu entlang der gleichen Achse liegen [95, 237]. Es scheint generell darauf anzukommen, dass der Putzende einen einfachen und korrekten Zugang zu allen Abschnitten des Zahnbogens erreicht [2, 94]. Das Griffdesign trägt hier nicht die entscheidende Rolle für das effektive Putzen. Viel mehr Bedeutung wird dem Komfort und der Compliance des Benutzers gegeben [237].

In der Vergangenheit wurden immer wieder Vorschläge zum Aussehen von Handzahnbürsten gegeben (Tabelle 1). Viele empfohlene Merkmale für eine ideale Zahnbürste sind dabei über viele Jahre gleich oder ähnlich geblieben.

Tabelle 1 Empfehlungen für Zahnbürsten von 1948 bis 1983 [2, 87, 95, 221]

Quelle	Filamente	Borstenenden	Bürstenkopf	Griff	Büschelanzahl und -anordnung
The optimum characteristics of tooth-brushes for personal oral hygiene [87]	Nylon, Filamentlänge 10 mm, ca. 80 Filamente pro Büschel, Filamentdurchmesser 0,18 mm	Abgerundet	Planes Borstenfeld, Borstenfeldlänge 10,3 mm	einfach, gerade, Gesamtlänge 15,2 cm	6 Büschel pro Reihe, 3 Büschelreihen in regelmäßigem Abstand
The use of the toothbrush in the treatment of periodontitis [221]	Nylon, Filamentlänge 13 mm, Filamentdurchmesser 0,3 mm	Form unwichtig: abgeschnitten oder abgerundet	Planes Borstenfeld, klein, Borstenfeldlänge 25 mm	Steif, gerade, haltbar, Gesamtlänge 15,2 cm	6 Büschel pro Reihe, 2 Büschelreihen, Abstand von je 3 mm
Traktat über die Zahnbürste [95]	Kunstfaser (Nylon, Polyurethan, Rilsan, Perlon), Filamentlänge ca. 11 mm, Härtegrade: hart & mittel	Abgerundet	Planes Borstenfeld	Kontrawinkelig von Vorteil	6-7 Büschel Länge, 2-3 Büschel Breite
Characteristics of tooth-brushes [2]	Nylon 6.6/ 6.10/ 6.12 oder gleich-effektive andere synthetische Monofilamente, Filamentlänge 11 -13 mm, Filamentdurchmesser 0,29 – 0,32 mm (hart) oder 0,24 – 0,29 mm (medium)	Abgerundet	Borstenfeld flach oder gezahnt, klein, Überhang an der Kopfseite < 2 mm und am Kopfende < 3 mm, Bürstenkopfbreite 18 – 31 mm, Bürstenkopflänge 7 – 12 mm	Bequem, eventuell gewinkelt, Gesamtlänge 15 cm (Erwachsener)	Büschelanzahl mindestens 18

Mit der Zeit kamen jedoch immer neue Zahnbürstenprofile auf den Dentalmarkt. Abgesehen vom schon damals empfohlenen, planen Borstenfeld [87, 95, 221], existieren auch mehrstufige Varianten oder konturierte wie konvexe oder konkave Borstenfeldoberflächen (Abbildung 9b - e) [1]. Die Anordnung der Borstenbüschel, auf Englisch auch „tufts“ genannt, kann entweder weit (space-tufted) oder eng, vielbüschelig (multitufted) sein. Die Borstenbüschel können zueinander parallel stehen (Abbildung 9a) oder auch gegeneinander geneigt, in der V-Stellung, sein (Abbildung 9f) [238].

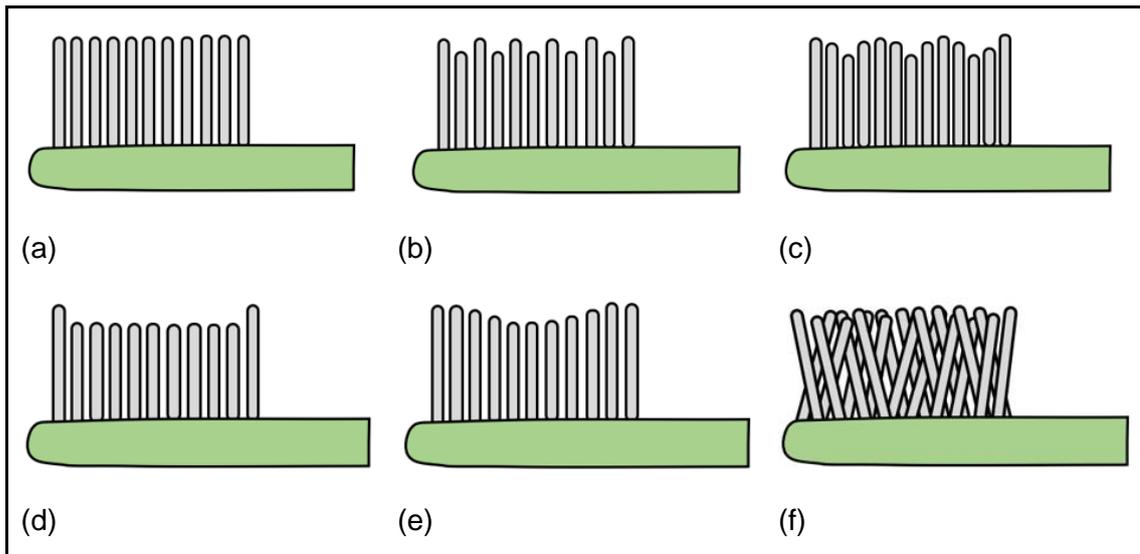


Abbildung 9 Auswahl von Zahnbürstenprofilen von der Seite: (a) plan mit parallel stehenden Borsten, (b) Hoch-Tief, (c) gezackt/ gewellt, (d) mit verlängerten Außenborsten, (e) konturiert (hier konkav), (f) schräg stehende Borsten

1.6.3 Borstenmaterialien

Die ersten Zahnbürstenborsten waren Naturprodukte [227, 230]. Es wurde jedoch im Laufe der Entwicklung von Zahnbürsten festgestellt, dass Naturborsten wie beispielsweise Pferdehaare über zahlreiche Nachteile verfügen. Jede Naturborste besitzt einen Markkanal (Abbildung 10b), der sich über die volle Länge der Borste ausdehnt [2, 94, 239]. Hierdurch entsteht am Borstenende ein Loch, weswegen aufgrund von Kapillarwirkung Flüssigkeit in den Hohlraum gelangen kann, welches die bakterielle Kontamination fördert. Auch die Tendenz der Naturborsten sich mit der Zeit längs zu spalten, gilt als schadhaft [2].

Naturborsten sind abhängig von der die Borsten umgebenden Feuchtigkeit, von Schrumpfung oder Quellung betroffen. Auch die Textur ist eher schuppig-porös. Großer mechanischer Belastung können Naturborsten nicht standhalten und zerbersten, splintern oder knicken ab [94, 240]. Eines der bedeutendsten Probleme ist die fehlende Standardisierbarkeit in der Fertigung von Zahnbürsten aufgrund der natürlichen Variabilität des Rohstoffs [1, 2, 94]. So konnte auch im 19. Jahrhundert keine zahnmedizinische Empfehlung für die Verwendung von Zahnbürsten mit Naturborsten ausgesprochen werden [2, 94, 219].

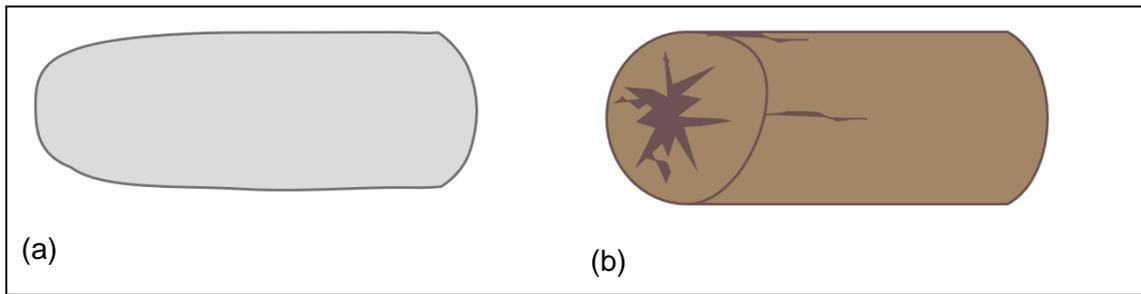


Abbildung 10 Schematische Darstellung eines Borstenendes an (a) einer abgerundeten homogenen Nylonborste, (b) einer Naturborste mit zentralem Markkanal [2]

Mit der Erfindung der Nylonborste, einer synthetisch hergestellten Faser, konnten viele Eigenschaften für Zahnbürstenfilamente optimiert werden. Nylonfilamente sind in ihrer Herstellung hinsichtlich ihrer Qualität, der Konfiguration und der Steifigkeit sehr gut zu standardisieren [1, 87, 94, 221]. Auch bei mechanischer Belastung halten Nylonfilamente deutlich länger der Beanspruchung stand und bleiben elastisch, bevor sie brechen oder auch selten splintern [1, 87, 221, 240].

Das Polyamidmaterial ist sehr homogen und daher oberflächlich auch sehr glatt. Die Oberfläche ist porenfrei und die Borstenenden können verrundet werden (Abbildung 10a) [87, 94]. Folglich sind die Zahnbürstenfilamente besser zu reinigen als Naturborsten [1, 221, 240]. Sie nehmen außerdem nahezu keine Feuchtigkeit auf [87, 94, 239, 240].

Heute bilden Tufting-Materialien aus Polyamiden wie Nylon 6.6, Nylon 6.10 oder Nylon 6.12 den Standard für Zahnbürstenborsten. Andere synthetische Monofilamente können verwendet werden, solange die physikalischen Eigenschaften und die klinische Wirksamkeit äquivalent mit denen von Nylon sind [2, 94, 162].

1.6.4 Untersuchungen verschiedener Bürstenkonfigurationen

In zahlreichen Versuchen wurde die Effektivität der Plaqueentfernung verschiedener Zahnbürstenmodelle an interproximalen Stellen untersucht. Mehrstufige Borstenprofile erzielten in in-vitro Versuchen bessere Ergebnisse im Gegensatz zu planen Borstenfeldern besonders bei der Plaqueentfernung von interproximalen Bereichen [139, 241-244]. Auch einige klinische Studien zeigten leichte Vorteile von mehrstufigen Borstenprofilen mit abgewinkelten Borsten gegenüber flachen Borstenprofilen [245-247]. Studien der Arbeitsgruppe Claydon et al. stellten Unterschiede bei der Plaqueentfernung zwischen den Probanden fest, die sich eventuell auch auf schwierige anatomische Situationen zurückführen lassen können, wohingegen keine der getesteten Zahnbürsten den anderen überlegen war [248-250].

Die Bürsten-Konfiguration wurde nicht nur in Bezug auf die Reinigungswirkung, sondern auch auf die Entwicklung nicht-kariöser zervikaler Läsionen untersucht. 16 Zähne mit einer Belastung von je 1N, 2N und 3N wurden mit Zahnbürsten mit verschiedenstem Besatz geputzt. Die Ergebnisse zeigten den wenigsten Abrieb bei Zahnbürsten mit gefiedertem Borstendesign, sowie den höchsten Abrieb bei Zahnbürsten mit flachem Profil [251].

Imfeld et al. bewerteten in-vitro 22 gewöhnliche, auf dem Schweizer Markt frei verkäufliche Handzahnbürsten. Es wurde der Schwerpunkt auf das Zahnflächenkontaktvermögen der Bürstenköpfe sowie die Borstenendmorphologie gelegt. Mit einer speziellen Bürstmaschine wurde das Zahnflächenkontaktvermögen gemessen, was der Erfassung des Plaqueentfernungsvermögens der Zahnbürsten entspricht. Unter allen untersuchten Modellen war keine Zahnbürste dabei, welche die anderen dominieren konnte. Daher sollten nicht grundsätzlich plane Borstenprofile abgelehnt werden [252].

Welche Art von Bürsten-Konfiguration klinisch am effektivsten in der Entfernung von Plaque ist, lässt sich bis heute nicht sicher sagen [2, 10, 223]. Die klinische Überlegenheit einer Zahnbürste zu beweisen, stellt sich kompliziert dar. Faktoren wie die Anzahl und Form der Restbezaehlung, Zahnputztechniken und -zeiten sowie der Anpressdruck sind individuell verschieden. Sie beeinflussen die Reinigungswirkung beim Putzen. Außerdem fehlen standardisierte Zahnputzverfahren und quantitative Methoden, um Studien miteinander vergleichen zu können [1]. Es wird vermutet, dass das verwendete Zahnbürstendesign nur geringe Auswirkungen auf die Reinigungskapazität hat und viel entscheidender die Fähigkeiten des Benutzers sind [249, 253].

1.6.5 Putzdauer, Putzhäufigkeit und Putztechnik

1979 wurden 11 bis 13-jährige Kinder beobachtet, von denen 62% nicht länger als eine Minute putzten [6]. Eine Untersuchung an 18 bis 22-Jährigen einige Jahre später zeigte bei 97% die gleichen Ergebnisse. Die mittlere Putzzeit war hier lediglich 33 s [254]. Saxer et al. untersuchten in drei Studien den Unterschied zwischen geschätzter und tatsächlicher Zahnputzzeit und stellten signifikante Unterschiede fest. Die tatsächlichen Putzzeiten lagen bei 68 - 83,5 s wohingegen die Schätzungen zur Putzzeit bei 134,1 - 148,8 s lagen [7]. Die meisten Menschen überschätzen sich und gehen davon aus, dass sie ihre Zähne länger putzen als das in der Realität der Fall ist [7, 255, 256].

Zur Frage der Zahnputzdauer wurde schon 1950 angenommen, dass 1 – 3 Minuten Zähneputzen morgens und abends optimal sind [221]. In der Leitlinie zum mechanischen Biofilmmangement herrscht heute ein starker Konsens darüber, dass mindestens zwei Minuten eingehalten werden sollten. Es wird jedoch auch darauf hingewiesen, dass nicht die Putzdauer im Mittelpunkt liegen sollte [44]. Da von Person zu Person die Grundvoraussetzungen und Bedürfnisse verschieden sind, sollte die Putzzeit individuell variieren [44, 221]. Die adäquate Plaqueentfernung sollte gewissenhaft und gründlich vorgenommen werden und ist somit zeitintensiv. Studien machen deutlich, dass die angestrebten zwei Minuten oft nicht ausreichen [4, 257, 258].

Die ausführliche Reinigung einer Zahnfläche dauert zwischen 5 - 7 s. Demnach muss ein durchschnittliches Gebiss länger als sieben Minuten gereinigt werden [258]. Studien haben gezeigt, dass eine längere Putzzeit die Plaquereduktion steigern kann [4, 259-263]. In einer Studie wurde bei einer Putzzeit von 120 s 26% mehr Plaque entfernt als bei einer Putzzeit von 45 s. Es wird gleichzeitig angenommen, dass bei längerer Putzdauer ab einem gewissen Zeitpunkt ein Maximalwert der Plaquereduktion erreicht wird, der trotz fortlaufender Putzzeit verhältnismäßig kaum noch weiter steigen wird [263].

Es wird generell empfohlen zwei Mal täglich die Zähne mit fluoridhaltiger Zahnpasta zu putzen, um sowohl einen Reinigungseffekt als auch die Verteilung der Fluoride zur kariespräventiven Wirkung zu erzielen [29, 44, 223]. Studien unter Zahnärzten haben gezeigt, dass die Mehrzahl diesen Empfehlungen nachgeht [123, 264]. Es gibt aktuell keine Beweise, dass sehr oft wiederholtes Putzen die Plaquereinigung weiter verbessert [265]. In einer Studie hat höher frequentiertes Putzen der Zähne nachteilige Effekte ergeben. Es wird davon ausgegangen, dass mehr als dreimaliges Putzen mit gingivalen Rezessionen bei falscher Putztechnik assoziiert werden kann [266].

In einer Erhebung in Deutschland 2010 gaben über 90% der Befragten vor ihre Zähne zwei Mal pro Tag für zwei Minuten zu putzen [10]. Eine weitere bevölkerungsrepräsentative Stichprobe mit 1025 Probanden zwischen 14 – 69 Jahren legt nahe, dass 65% zweimalig am Tag ihre Zähne reinigen und dass 44% und 32% aller Befragten der Meinung waren ihre Zähne für 2 - 3 Minuten zu putzen [267]. Es wird grundsätzlich angenommen, dass sich das Bewusstsein für Mundhygiene in den letzten Jahrzehnten verbessert hat [10, 223, 268, 269] und dass die Mehrheit in den Industrienationen ein bis zwei Mal täglich ihre Zähne mit fluoridhaltiger Zahnpasta reinigen [223, 270, 271].

Doch die tatsächlichen oralen Befunde spiegeln häufig nicht das äquivalente Bild der Befragungen wider oder die individuelle Mundhygiene scheint nicht zu genügen [10, 223, 269, 272]. Wichtiger als die Putzhäufigkeit, scheint die Gründlichkeit eines jeden Putzvorganges [25]. Eine gründliche Zahnputzsystematik in regelmäßigen Abständen scheint ein Schlüsselfaktor, um die Plaque verlässlich entfernen zu können [5, 25, 44, 221]. Der Anwender sollte an einer Stelle des Mundes mit der Reinigung beginnen und sorgfältig alle Bereiche wie alle Zahnflächen der Zähne, das Zahnfleisch und die Zunge erreichen. Ein besonderer Fokus sollte auf die Reinigung des Gingivarandes gelegt werden, was besonders im Hinblick um Gingivitis zu vermeiden sehr wichtig ist [44].

Die am häufigsten verwendete Putztechnik, stellt das „Horizontale Schrubben“ dar [252, 273]. Diese einfache Art der Bürsttechnik wurde schon 1950 nur für die Reinigung der Okklusalfächen empfohlen [221]. Es existieren viele Putztechniken [25, 94, 221, 273] und keine der Putztechniken ist einer anderen eindeutig überlegen, doch die meisten der Techniken erreichen zufriedenstellende Ergebnisse [36, 273, 274], sodass bei genügend Sorgfalt und Putzdauer ein zufriedenstellendes Ergebnis erzielt werden kann [36]. Die approximalen Bereiche werden nur teilweise und insgesamt viel weniger als bukkale und linguale Oberflächen gereinigt [1, 25, 273, 275, 276]. Daher sollten Zahnzwischenräume unabhängig von der verwendeten Putzmethode anschließend mit interdentalen Hilfsmitteln gereinigt werden [226].

Zahnärzte sollten grundsätzlich ihren Patienten abhängig von der Anatomie, den manuellen Fähigkeiten sowie bei vorliegenden Erkrankungen individualisierte Instruktionen geben [25, 274] und individuelle Anwendungen mit den Putzenden durchführen [25, 44]. Sollte eine unterwiesene Putztechnik nicht zum Erfolg führen, gilt es diese nach den Bedürfnissen des Patienten anzupassen [221, 273].

1.6.6 Handzahnbürste versus elektrische Zahnbürste

Heute werden hauptsächlich rotierend-oszillierende Zahnbürsten oder oszillierende Zahnbürsten mit vibrierenden oder rotierenden Schallbewegungen genutzt [239]. In den letzten Jahren ist die Verwendung von elektrischen Zahnbürsten in den Industrienationen stark angestiegen [1]. In einer bevölkerungsrepräsentativen Erhebung von 2014 unter 1025 Probanden gaben 38% an eine elektrische Zahnbürste und 53% eine Handzahnbürste zur Mundhygiene zu nutzen [267]. In der 5. Deutschen Mundgesundheitsstudie (DMS V) wird deutlich, dass in den Jahren 1997 bis 2014 die Verwendung von elektrischen Zahnbürsten deutlich zugenommen hat [38].

Ob elektrische Zahnbürsten, den Handzahnbürsten in klinischer Hinsicht überlegen sind, wurde immer wieder untersucht. In der Leitlinie zum „Häuslichen mechanischen Biofilmmangement in der Prävention und Therapie der Gingivitis“ können elektrische Zahnbürsten grundsätzlich zur Mundhygiene empfohlen werden [44]. Eine Metaanalyse von 2016 ergab bei wiederaufladbaren, rotierend-oszillierenden Zahnbürsten im Gegensatz zu batteriebetriebenen Zahnbürsten im Durchschnitt eine Reduktion der Plaque um 46% [44, 260]. Im Vergleich dazu erzielten Handzahnbürsten in einer Metaanalyse von 2012 nur eine Reduzierung des Biofilms um 42% [259].

Zahlreiche Studien zu elektrischen Zahnbürsten im Vergleich mit Handzahnbürsten ergeben eine kurz- und langfristige Überlegenheit in der Reduzierung von Plaque und Zahnfleischartzündungen [46, 277-282]. Auch unter den elektrischen Zahnbürsten erzielen rotierend-oszillierende Bürsten den größten Erfolg [29, 277, 279, 283, 284]. Andere Untersuchungen zeigen bei normaler Geschicklichkeit des Anwenders keine so grundsätzliche Überlegenheit von elektrischen gegenüber manuellen Zahnbürsten auf [94, 285-287].

Für elektrische Zahnbürsten wurde eine verbesserte Reinigung für bestimmte Anwendergruppen beschrieben. So kann eine elektrische Zahnbürste bei Kindern, Patienten mit orthopädischer Apparatur, älteren pflegebedürftigen Menschen sowie behinderten Menschen bessere Ergebnisse erzielen [94, 288-291]. Grundsätzlich scheint der Kauf einer elektrischen Zahnbürste die Compliance zu erhöhen und kann somit positiv zu einem größeren Bewusstsein der Mundgesundheit führen [101, 281].

1.6.7 Anforderungen an Zahnbürsten

Auf die Borsten einer Zahnbürste sollte besonderes Augenmerk gelegt werden, da sie durch den direkten Kontakt zu der Hart- und Weichgewebsoberfläche nicht nur die Funktion der Reinigungswirkung übernehmen, sondern auch Sicherheit im Gebrauch für die oralen Gewebe geben soll [168, 176, 221, 257, 276, 292, 293]. In der „DIN EN ISO 20126“ können Anforderungen und Prüfverfahren für die physikalischen Eigenschaften von Handzahnbürsten vorgegeben werden.

Dies beinhaltet Kriterien für: das Bestehen und Nichtbestehen einer Handzahnbürste, die äußere Beschaffenheit, die Büschelzugkraft, die Schlagzähigkeit des Griffes, die Materialermüdung, auch nach chemischer Belastung, sowie die Endabrundung der Borsten [294].

Im Gegensatz zur veralteten, mittlerweile ungültigen „DIN 13917“, die deutlich ausführlichere Beschreibungen der Handzahnbürste beinhaltete, werden heute nur noch Aussagen über die Gebrauchssicherheit der Zahnbürste getroffen. Die Büschelzugprüfung, bei der Werte von mindestens 15 N erreicht werden sollen, garantiert, dass sich bei der Benutzung keine Borstenbüschel lösen können und versehentlich verschluckt werden. Auch die Endabrundung der Filamente, die mindestens einen Anteil von 50% ausmachen sollte, stellt ein gewisses Maß an Sicherheit für die oralen Gewebe dar [294].

1.6.7.1 Borstenendabrundung

Schon 1948 stellte Bass in seinen Versuchen fest, dass abgeschnittene scharfkantige Borstenenden zu Schäden am Gingivarand entlang der Schmelz-Zement-Grenze führen können. Der entstehende Zahnfleischrückgang kann weiterhin zum Freilegen des weichen Wurzelzements führen und zu dessen Verschleiß sowie dem des darunterliegenden Dentins [87]. Die Qualität der Borstenendabrundung spielt daher eine bedeutende Rolle im Hinblick auf Schäden beim Zähneputzen. Die Borstenendabrundung wird als genereller Standard für Zahnbürsten gefordert [85, 87, 95, 168, 173, 252, 295].

In einem Doppelblindversuch von Breitenmoser et al. konnte für Zahnbürsten mit endabgerundeten Borsten eine geringere Abrasion festgestellt werden, als bei nicht abgerundeten Borsten [295]. Generell gilt, dass Zahnbürsten mit endabgerundeten Borsten im Gegensatz zu abgeschnittenen scharfkantigen Borsten weniger Abrasionen an Hart- und Weichgewebe hervorrufen [3, 85, 160, 163, 168, 178, 181, 240, 296]. Mehrere Untersuchungen haben festgestellt, dass der Anteil nicht akzeptabel endabgerundeter Borsten in den vergangenen Jahren teilweise groß war und somit anders, als von den Herstellern deklariert wurde [2, 160, 163, 166, 172, 178, 297]. Dennoch sollten mittlerweile die technischen Voraussetzungen zur Abrundung der Borstenenden bei den Herstellern gegeben sein [162, 174].

Neuere Studien zeigen, dass durchaus zufriedenstellende Ergebnisse bezüglich der Borstenendabrundung erzielt werden können, jedoch existieren nach wie vor große Unterschiede zwischen den verschiedenen Zahnbürsten [167, 173, 174]. Des Weiteren können sich scharfkantige Borstenenden bei längerem Gebrauch abrunden [125, 161]. Es sollte jedoch nicht die Aufgabe des Patienten sein die Borstenenden im Mund am eigenen Weich- und Hartgewebe abzunutzen, bis eine Abrundung entsteht. Irreversible orale Schäden und eine zunehmende Bakterienbesiedlung könnten die Folge sein [95, 125, 178, 221].

Da eine hemisphärische Endabrundung als ideales Borstenende für eine Zahnbürste gilt und den besten Schutz vor oralen Läsionen beim Zähneputzen bietet [160, 170, 178], sollte dieser Anforderung bei neu entwickelten Zahnbürstenmodellen mithilfe der „DIN EN ISO 20126 - Zahnheilkunde – Handzahnbürsten – Allgemeine Anforderungen und Prüfverfahren“ getestet werden [294].

1.6.7.2 Bürstensteifheit

Für die Dentalindustrie, Verbraucher sowie die Zahnärzteschaft stellt die Steifheit oder auch Härte der Zahnbürste ein wichtiges Kriterium für die Herstellung, Verwendung und Weiterempfehlung dar [1, 2, 225]. Trotz erfolgter Studien über die Bürstensteifheit [298, 299] existierte bis 1979 keine anerkannte allgemeine Definition und Messmethode zur Bürstensteifheit. Nygaard-Ostby et al. definierten die Steifigkeit von Zahnbürsten als eine Reaktionskraft pro Quadrateinheit, welche auf der Ablenkung bis auf zwei Drittel der Ausgangslänge der Borsten beruht. [300]. Im Laufe der Jahre wurden immer wieder Versuche unternommen die Steifheit einer Zahnbürste zu bestimmen. Rawls et. al entwickelten ein mathematisches Modell erster Ordnung mit dem einige Zahnbürstenparameter vereinheitlicht wurden und deren Effekte untersuchbar waren. Das Modell brachte die Eigenschaften der Borste, sowie die Konstruktion des Bürstenkopfes mit der Gesamtsteifigkeit der Bürste in einen ersten Zusammenhang [301].

Im Jahr 2001 machten Yankell et. al Messungen zum Härtegrad von Borsten aus rautenförmigen Filamenten auf der Grundlage der „ISO 8627 Zahnheilkunde – Härte der Zahnbürste“, die heute zurückgezogen und nicht mehr gültig ist [302, 303]. An deren Stelle tritt nun die „DIN EN ISO 22254: 2005 - 11 Zahnbürsten - Handzahnbürsten - Biegefestigkeit der Besteckungsfläche“, mit der die Biegefestigkeit der Besteckungsfläche von Handzahnbürsten mit konventionellem, geradem Profil ermittelbar ist. Im Anhang wird ein Verfahren zur Bestimmung der Härte der Besteckungsfläche einer Handzahnbürste beschrieben. Die Norm beinhaltet weder Härtebestimmung der Zahnbürste noch Härteeinteilung. Grund dafür ist eine hohe Variation der Ergebnisse bei der Vermessung der Besteckungsfläche. Außerdem ist die Härtebestimmung vom verwendeten Messverfahren und der Form der Büschellocher ebenso abhängig und lässt sich daher nicht ohne weiteres bestimmen [225].

Die Bürstensteifheit wird heute definiert als der Widerstand der Borsten gegen einen Druck [1]. Die wesentlichen Parameter, welche die Steifheit einer Zahnbürste beeinflussen, sind (1) das verwendete Borstenmaterial, d.h. das Elastizitätsmodul, (2) die Anzahl der Borsten und der Büschel, (3) die Anzahl der Borsten in einem Büschelloch bepackt pro Flächeneinheit, sowie (4) die Abmessungen der einzelnen Monofilamente [1, 2, 301]. Zu den Abmessungen einer einzelnen Nylonborste gehören der Durchmesser und die Länge [87, 95, 221]. Zahlreiche Faktoren wie die Wasseraufnahme, Temperatur, Position und Form der Borsten oder Häufigkeit der Zahnbürstenbenutzung spielen eine Rolle bei der Beeinflussung der Bürstensteifheit [1, 298, 300]. Die Einteilung der Bürstensteifheit erfolgt in der Regel in hart, mittel, weich und extra weich. Dennoch ist diese Kennzeichnung nicht standardisiert [94, 225]. So deklarieren die Hersteller die Härtegrade der Zahnbürsten aufgrund ihrer individuellen Prüfverfahren. Es ist daher möglich, dass eine „weiche“ Zahnbürste in ihrer Steifheit härter als eine „mittlere“ Zahnbürste eines anderen Herstellers erscheint [1, 2].

Es existieren viele einzelne Parameter bei Zahnbürsten, die eine Bedeutung für den Gebrauch beim Zähneputzen haben. Daher sollten gewisse Anforderungen an Zahnbürsten regelmäßig genauer untersucht werden.

2. Zielsetzung

Ein etablierter Rohstoff in der Herstellung von Zahnbürstenborsten ist Erdöl und/oder -gas. Alternativ dazu wurden Zahnbürsten mit Borsten aus Rizinusöl entwickelt. Im Hinblick auf diese Entwicklung und der bedeutenden Rolle von Zahnbürsten in der Prävention von oralen Erkrankungen, sollten auch diese neuartigen Zahnbürsten untersucht werden, ob deren Borsten gegenwärtigen Standards gerecht werden.

Daher sollen in dieser Studie in einem In-vitro-Versuchsaufbau fünf Handzahnbürsten mit Borsten auf der Basis von Rizinusöl sowie eine herkömmliche Handzahnbürste mit Borsten aus Polyamid, die als Referenzzahnbürste (ADA Control, Oral B) dient, miteinander verglichen werden. Nach und während einer Zahnputzsimulation, die insgesamt sechs Monaten Nutzungsdauer entspricht, wird die Abnutzung der Zahnbürstenborsten ausgewertet und beurteilt.

Folgende Fragestellungen stehen im Fokus dieser Arbeit:

- 1) Wie sind die Borsten der Handzahnbürsten bezüglich ihrer Endabrundung und Oberflächen beschaffen und verändern sich diese im Laufe der Nutzung? Welche makroskopischen und microcomputertomographischen Verschleißerscheinungen zeigen die Borsten währenddessen?
- 2) Lässt sich bezüglich der genannten Eigenschaften eine Empfehlung für die maximale Benutzung der untersuchten Zahnbürsten ableiten?
- 3) Welche chemische Zusammensetzung haben Handzahnbürstenborsten auf der Basis von Rizinusöl und divergiert diese zur klassischen Polyamidzahnbürste (Referenzzahnbürste ADA Control)?
- 4) Unterscheiden sich die mechanischen Eigenschaften der Borsten der verschiedenen Zahnbürstenmodelle aus Rizinusöl hinsichtlich des Elastizitätsmoduls im Gegensatz zur Referenzzahnbürste ADA Control?
- 5) Welche Veränderungen des Dentins sind bei einer simulierten Zahnbürstenbenutzung von sechs Monaten im Hinblick auf die Abrasion und die Oberflächenrauheit sichtbar?

3. Material und Methoden

3.1 Gruppeneinteilung

Es werden insgesamt fünf Handzahnbürstenmodelle mit Borsten auf der Basis von Rizinusöl untersucht: Alterra Bambus Zahnbürste, Alverde Zahnbürste, Dr. Best Green Clean, Hydrophil Bambus Zahnbürste und Prokudent Recycling Zahnbürste. Als Referenzgruppe dient die Standardzahnbürste der American Dental Association „ADA Control“. Alle Zahnbürsten entsprechen laut Herstellerangaben dem Härtegrad „mittel“ (Abbildung 11).

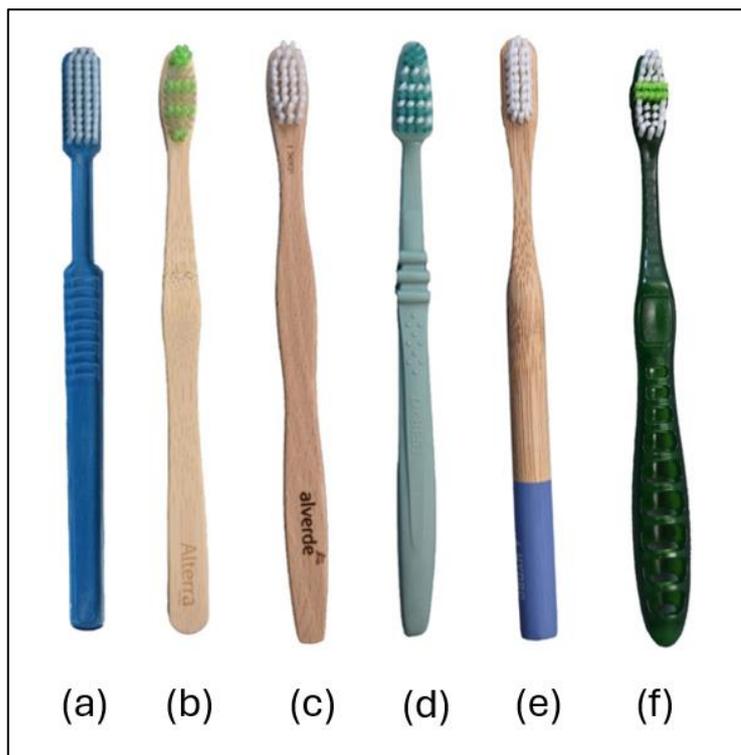


Abbildung 11 Handzahnbürstenmodelle (von links nach rechts): (a) ADA Control Referenzzahnbürste, (b) Alterra Bambus Zahnbürste, (c) Alverde Zahnbürste, (d) Dr. Best Green Clean, (e) Hydrophil Bambus Zahnbürste, (f) Prokudent Recycling Zahnbürste

Die Zahnbürstenborsten sollen vor (Ausgangszustand) und nach Putzsimulation zur Beurteilung der Abnutzung untersucht werden. Die Dokumentation erfolgt mit makroskopischen Aufnahmen der Borstenköpfe in unterschiedlichen Perspektiven sowie mit mikroskopischen Aufnahmen von einzelnen Borsten. Die untersuchten Zahnbürstenmodelle werden mithilfe einer Schieblehre bezüglich der Gesamtlänge, der Bürstenkopflänge und -breite sowie des Borstendurchmessers und der -länge vermessen. Anschließend wird die Anzahl der Borstenbüschel sowie die Filamentanzahl pro Büschel gezählt und notiert.

Folgend werden die einzelnen Zahnbürstenmodelle in ihren Abmessungen und ihrem Aussehen näher beschrieben.

3.1.1 ADA Control Referenzzahnbürste

Die Zahnbürste „ADA Control“ (Oral B, Procter & Gamble, Schwalbach, Deutschland) dient in der Untersuchung als Referenzzahnbürste zu den fünf Handzahnbürsten mit Borsten aus Rizinusöl. Die Vergleichszahnbürste „ADA Control“ besteht nur aus Polyamid.

Die „ADA Control“ hat eine Gesamtlänge von 18 cm. Der Bürstenkopf ist rechteckig, wobei die Ecken abgerundet sind. Die Maße der Bürstenköpfe betragen $L = 29,5 \text{ mm}$ x $B = 11,75 \text{ mm}$. Mit 47 Borstenbüscheln auf der Besteckungsfläche besitzt diese Zahnbürste die meisten Borstenbüschel im Vergleich zu den fünf anderen Vertretern. In einem Borstenbüschel befinden sich 42 transparente Filamente, welche 11 mm lang sind und einen Durchmesser von 0,2 mm besitzen. Das Borstenprofil ist plan gestaltet und die Borstenbüschel sind gerade angeordnet (Abbildung 12).

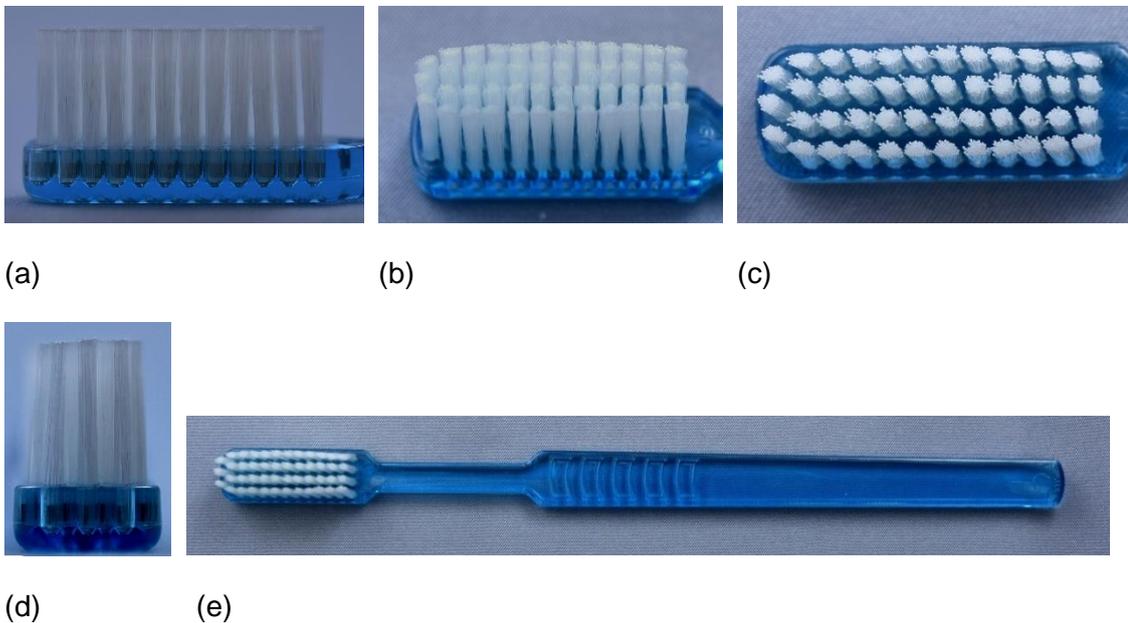


Abbildung 12 ADA Control Zahnbürste (Oral B, Procter & Gamble, Schwalbach, Deutschland): Ansichten (a) von lateral, (b) im 45° Winkel, (c) von oben, (d) von frontal, (e) Gesamtansicht von oben

3.1.2 Alterra Bambus Zahnbürste

Die „Alterra Bambus Zahnbürste“ (Dirk Rossmann GmbH, Burgwedel, Deutschland) wird auf dem Markt in zwei Härtegraden - weich und mittel - angeboten, wobei zweiterer in der vorliegenden Arbeit untersucht werden soll. Die Borsten der Handzahnbürste basieren auf Rizinusöl und der Griff besteht laut Hersteller aus 100% biologisch abbaubarem Bambus [304].

Die Handzahnbürste besitzt eine Gesamtlänge von 19,1 cm und hat einen ovalen Bürstenkopf mit den Maßen $L = 30,5 \text{ mm} \times B = 12,5 \text{ mm}$. Die Besteckungsfläche besteht aus 38 Büscheln, welche entweder grün oder weiß gefärbt sind. Ein Borstenbüschel ist aus 36 Filamenten zusammengesetzt. Unabhängig von der Farbe des Filaments liegt der Borstendurchmesser bei 0,2 mm. Das Borstenfeld besitzt ein Hoch-tief-Profil mit grünen Interdentalborsten, die 11 mm lang sind, wohingegen die weißen Borsten lediglich 9 mm lang sind. Die Borstenstellung ist gerade angeordnet (Abbildung 13).

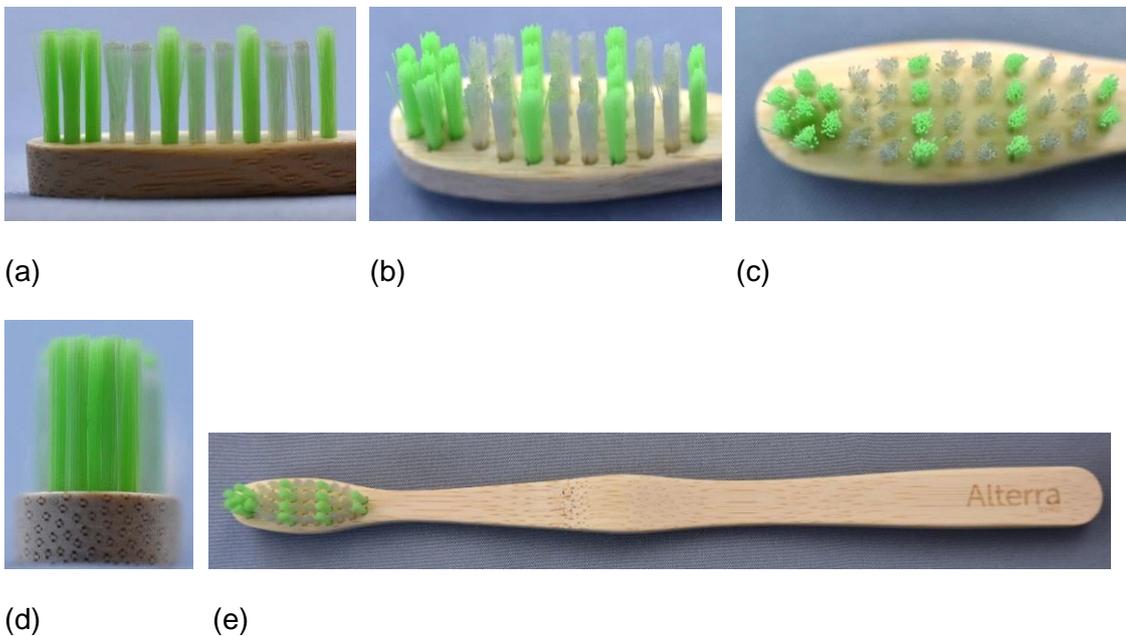


Abbildung 13 Alterra Bambus Zahnbürste (Dirk Rossmann GmbH, Burgwedel, Deutschland): Ansichten (a) von lateral, (b) im 45° Winkel, (c) von oben, (d) von frontal, (e) Gesamtansicht von oben

3.1.3 Alverde Zahnbürste

Die „Alverde Zahnbürste“ (dm-drogerie markt GmbH + Co. KG, Karlsruhe, Deutschland), die im Härtegrad mittel angeboten wird, besitzt Borsten auf der Basis von Rizinusöl, der Borstengriff ist aus FSC-zertifiziertem Buchenholz hergestellt [98].

Dieses Modell ist 19 cm lang. Der Borstenkopf weist eine Breite von 13,5 mm und eine Länge von 26,5 mm auf. Die Besteckungsfläche hat 31 Borstenbüscheln. Jedes Büschel ist aus 38 Filamenten zusammengesetzt. Diese Zahnbürste besitzt ein Hoch-Tief-Profil. Die kurzen Borsten sind 9,5 mm, die längeren Borsten sind 11 mm lang. Der Durchmesser aller Borsten beträgt generell 0,19 mm. Die Stellung der Büschel ist gerade angeordnet (Abbildung 14).

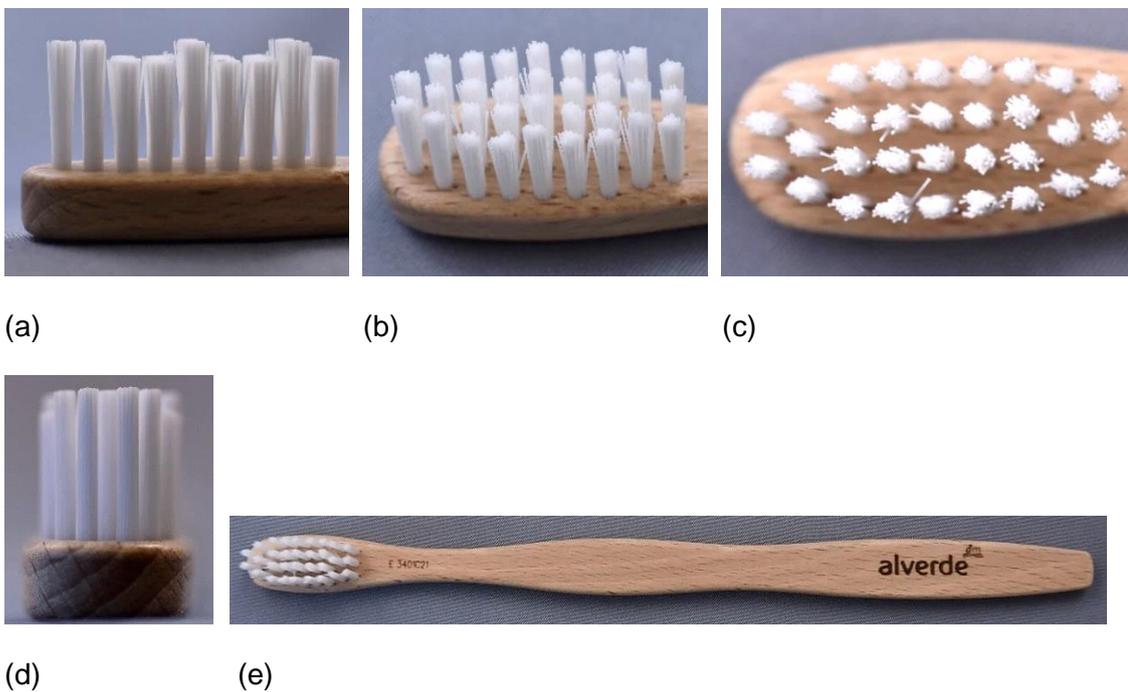


Abbildung 14 Alverde Zahnbürste (dm-drogerie markt GmbH + Co. KG, Karlsruhe, Deutschland): Ansichten (a) von lateral, (b) im 45° Winkel, (c) von oben, (d) von frontal, (e) Gesamtansicht von oben

3.1.4 Dr. Best Green Clean Zahnbürste

Die "Dr. Best Green Clean Zahnbürste" (GlaxoSmithKline Consumer Healthcare GmbH & Co. KG, München, Germany) wird mit weichem oder mittlerem Härtegrad angeboten, wovon die Zahnbürste mit mittlerem Härtegrad in der Studie untersucht werden soll. Die Borsten dieser Handzahnbürste basieren wieder auf der Basis von Rizinusöl. Der Griff ist laut Herstellerangaben auf Holz- und Zellulosebasis aus nachhaltiger europäischer Forstwirtschaft [97].

Die Zahnbürste ist 19,2 cm lang und hat einen gebogenen Bürstenhals und -griff. Sie hat einen leicht dreieckig geformten Bürstenkopf, der 29 mm lang und maximal 13 mm breit ist. Die 37 Borstenbüschel sind in einem Hoch-Tief-Profil angeordnet, wobei die grünen Borsten 11 mm und die weißen Borsten 9,5 mm lang sind. Die Büschel sind gerade angeordnet, wobei jedes Borstenbüschel aus 42 Filamenten besteht, wovon jedes einen Durchmesser von 0,2 mm besitzt (Abbildung 15).

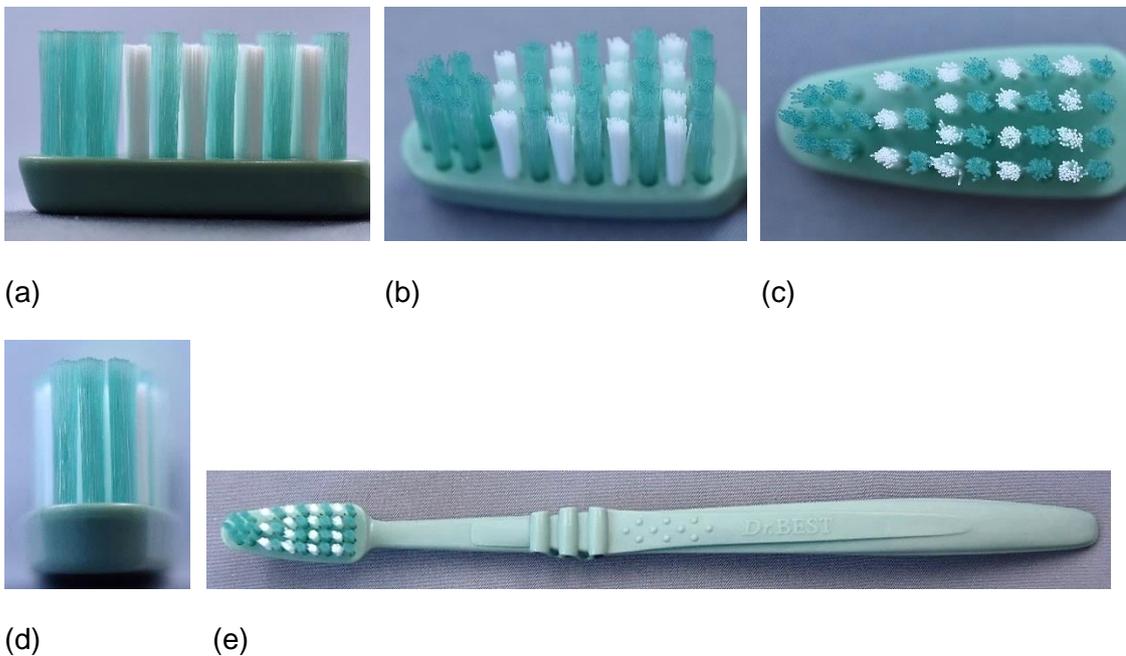


Abbildung 15 Dr. Best Green Clean Zahnbürste (GlaxoSmithKline Consumer Healthcare GmbH & Co. KG, München, Germany): Ansichten (a) von lateral, (b) im 45° Winkel, (c) von oben, (d) von frontal, (e) Gesamtansicht von oben

3.1.5 Hydrophil Bambus Zahnbürste

Die „Hydrophil Bambus Zahnbürste“ (wasserneutral GmbH, Hamburg, Deutschland) ist im Handel in den Härtegraden „ultra soft, weich und mittel“ erhältlich. Der Fokus liegt für die vorliegende Untersuchung auf der Zahnbürste mit dem Härtegrad „mittel“. Die Borsten dieses Modells sind auf der Basis von Rizinusöl und der Griff besteht laut Herstellerangaben aus Moso-Bambus [305].

Diese Handzahnbürste ist 18,9 cm lang. Ihr Bürstenkopf ist 27 mm x 11,5 mm groß. Die 34 weißen Borstenbüschel besitzen je 42 Filamente. Jedes einzelne Filament ist 11 mm lang und hat den Durchmesser von 0,18 mm. Die Borsten sind gerade angeordnet und das Borstenprofil ist plan (Abbildung 16).

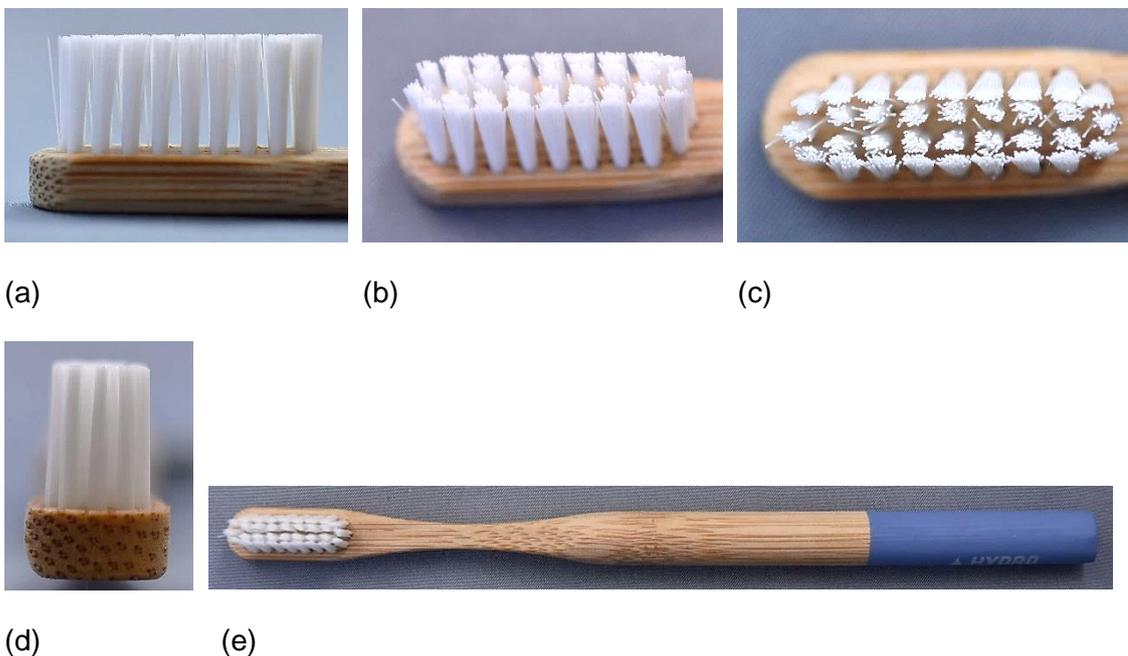


Abbildung 16 Hydrophil Bambus Zahnbürste (wasserneutral GmbH, Hamburg, Deutschland): Ansichten (a) von lateral, (b) im 45° Winkel, (c) von oben, (d) von frontal, (e) Gesamtansicht von oben

3.1.6 Prokudent Recycling Zahnbürste

Die „Prokudent Recycling Zahnbürste“ (Dirk Rossmann GmbH, Burgwedel, Deutschland) wird mit dem Härtegrad mittel angeboten. Die Borsten basieren aus Rizinusöl und der Borstengriff besteht laut herstellereangaben aus 100% recyceltem Kunststoff und ist hohl [99].

Die Zahnbürste ist 19,4 cm lang. Der Bürstenkopf ist 29 mm lang und oval geformt, wobei er mittig über leichte Ausbuchtungen nach links und rechts verfügt, weswegen er maximal 13 mm breit ist. Durch den gebogenen Bürstenhals soll diese Bürste besonders ergonomisch sein [99]. Die 37 grünen und weißen Borstenbüschel sind im Multilevel-Borsten-Schnitt teilweise auch mit schräg stehenden Borsten aufgestellt. Ein Borstenbüschel verfügt über 54 Filamente, die 9 mm oder 11 mm lang sein können. Der Durchmesser der einzelnen Borste ist im Vergleich zu allen anderen Zahnbürstenmodellen hier der geringste von 0,17 mm (Abbildung 17).

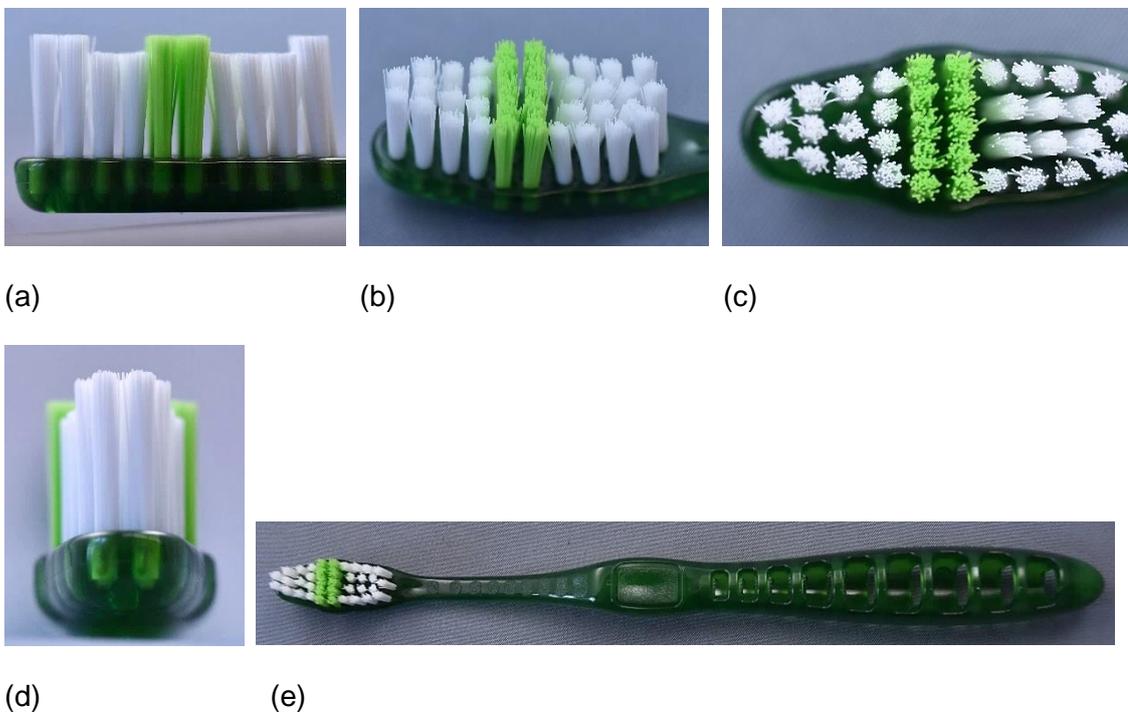


Abbildung 17 Prokudent Recycling Zahnbürste (Dirk Rossmann GmbH, Burgwedel, Deutschland): Ansichten (a) von lateral, (b) im 45° Winkel, (c) von oben, (d) von frontal, (e) Gesamtansicht von oben

3.2 Probenherstellung

In der Vorbereitung wurden 48 Dentin-Probenkörper (6 Gruppen mit $n = 8$) hergestellt. Diese wurden aus extrahierten bovinen Zähnen, in Form dünner Dentin-Stäbchen von 2 mm x 3 mm x 15 mm, gewonnen [306].

Die zur Herstellung der Proben verwendeten Zähne waren bovinen Ursprungs. Es handelte sich um maxilläre Rinderfrontzähne aus einem Schlachtbetrieb (Abbildung 18). Sofort nach ihrer Extraktion erfolgte eine grobe Reinigung und Präparation mit Entfernung der Wurzel, der Pulpa und umliegender Hartgewebe. Anschließend wurden die bovinen Frontzahnkronen bis zur Weiterverarbeitung in Wasser gelagert, welches mit 2 Gew.% Natriumazid, einem Biozid zur Verhinderung von Mikroorganismenwachstum, versetzt war. Bei der Auswahl des Zahnmaterials waren besonders lange und breite Zahnkronen von Vorteil, da diese eine hohe Ausbeute Dentin versprechen.



Abbildung 18 Maxillärer Rinderfrontzahn ca. 20 mm x 20 mm

In einem Überblicksartikel von Yassen et al. von 2011 wurden bovine Zähne als Äquivalent zu humanen Zähnen für die Verwendung in zahnmedizinischen Versuchen verglichen [307].

Bei drei in vitro Vergleichen bezüglich bovinem Dentin ergaben sich hinsichtlich der Dentinabrasion beziehungsweise der Oberflächenrauigkeit keine signifikanten Unterschiede zu humanem Dentin [308-310]. Auf Grundlage dieser Ergebnisse eignete sich das Rinderzahnmaterial für die geplanten Untersuchungen.

Mithilfe des IsoMet™ Low Speed Saw Niedertourentrenners (Buehler, Illinois, USA), einer Niedriggeschwindigkeits-Diamantsäge, erfolgte das Zerteilen der Rinderfrontzahnkronen bei standardisierter Gewichtsbelastung von 225 g mit einer Geschwindigkeit von 240 U/min auf Stufe 8 (Abbildung 19).



Abbildung 19 IsoMet™ Low Speed Saw Niedertourentrenners (Buehler, Illinois, USA)

Hierfür wurde die Zahnkrone durch das thermoplastische Abformmaterial Kerr Impression Compound (Kerr GmbH, Herzogenrath, Deutschland) auf einem Isomet-Plättchen befestigt, welches anschließend in die Säge eingespannt wurde (Abbildung 20).

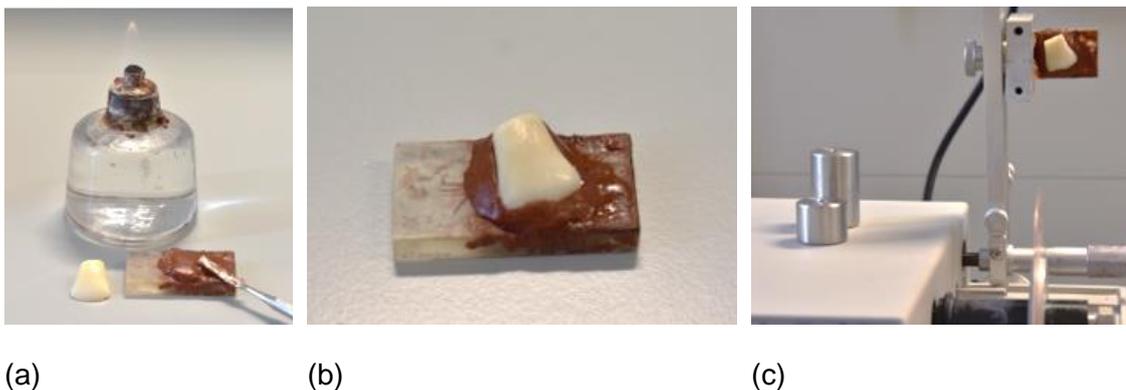
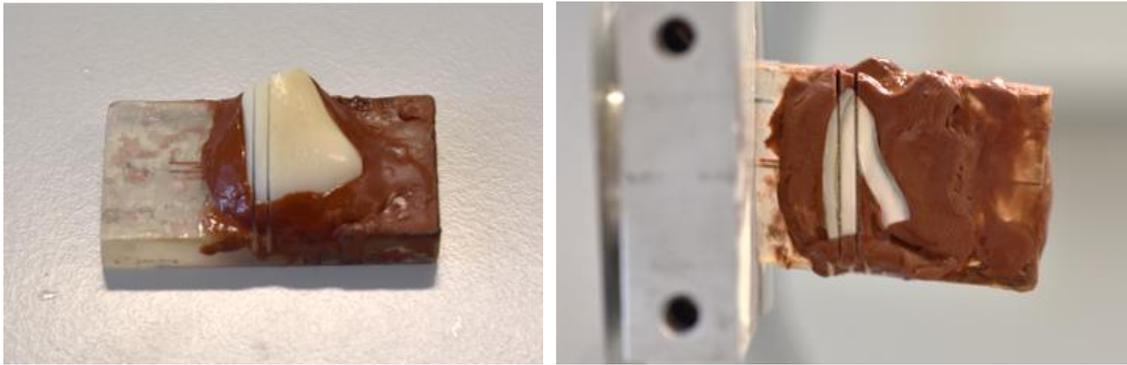


Abbildung 20 (a) Vorbereitung der Flamme, (b) Befestigung des Rinderzahnes auf dem Isometplättchen, (c) Einspannen in die Säge

Danach konnte in inziso-apikaler Richtung die laterale Schmelzschicht der Zahnkrone abgesägt werden. Im Folgenden wurde in einem Abstand von 2 mm (einstellbar über eine Mikrometerschraube) erneut entlang der Längsachse des Zahnes gesägt, sodass ein Zahnscheibchen entstand (Abbildung 21).



(a)

(b)

Abbildung 21 (a) Sägen eines Dentinstäbchens in inziso-apikaler Richtung, (b) Sägen des Dentinstäbchens entlang der Längsachse in 2 mm Abstand

Nachdem die Zahnscheibe erneut auf dem Isomet-Plättchen befestigt worden ist, wurde in einem Abstand von ca. 3 mm gesägt, sodass Zahnstäbchen entstanden, die lediglich aus Dentin bestehen. Abschließend wurde das obere und untere Ende des Stäbchens gerade abgesägt. So konnte gewährleistet werden, dass sich am Dentinstäbchen keine Schmelzanteile oder Wurzelspitzen befinden. Nach dem erfolgten Zuschnitt entstanden Stäbchen in Form eines Quaders mit den Abmessungen 2 mm x 3 mm x mindestens 15 mm (Abbildung 22). Aus einer Rinderfrontzahnkrone konnten circa 2 - 4 Dentinstäbchen gewonnen werden.



Abbildung 22 Fertig gesägtes Dentinstäbchen mit den Abmessungen 2 mm x 3 mm x mindestens 15 mm

Bei der visuellen Kontrolle wurden die Dentinstäbchen selektiert. Es durften keine kariösen Bereiche, sklerosiertes Dentin, Pulpenkanälchen oder gar das Pulpenkavum angeschnitten sein. Auch Verfärbungen führten zum Ausschluss des jeweiligen Stäbchens. Nur regelmäßige und vollkommen aus Dentin bestehende Stäbchen wurden letztendlich für die weitere Verarbeitung ausgewählt.

Um das Dentin für die Aufnahme in die Zahnbürstmaschine vorzubereiten, wurden die Stäbchen in den Provisorienkunststoff „Luxatemp Automix Plus“ (DMG Chemisch-Pharmazeutische Fabrik GmbH, Hamburg, Deutschland) eingebettet. Hierfür wurde eine Probenform, eine sogenannte Matrize aus Aluminium genutzt, welche drei Proben gleichzeitig herstellen konnte, die jeweils identische Abmessungen von 25,5 mm x 24,5 mm x 6,5 mm aufwiesen.

In der Vorbereitung zur Probenherstellung wurde die Matrizenhohlform mit Vaseline gefettet, so dass sich die Probe nach Aushärtung gut entformen ließ. Anschließend wurden die Dentinstäbchen mittig platziert und die Matrize wurde verschlossen und über Schrauben fixiert. Dann wurde über eine Applikationsspritze „Luxatemp Automix Plus“ kontinuierlich über die Einfülllöcher eingebracht (Abbildung 23). Nach einer Aushärtezeit von 10 min konnten die Proben vorsichtig entformt werden.



(a)

(b)

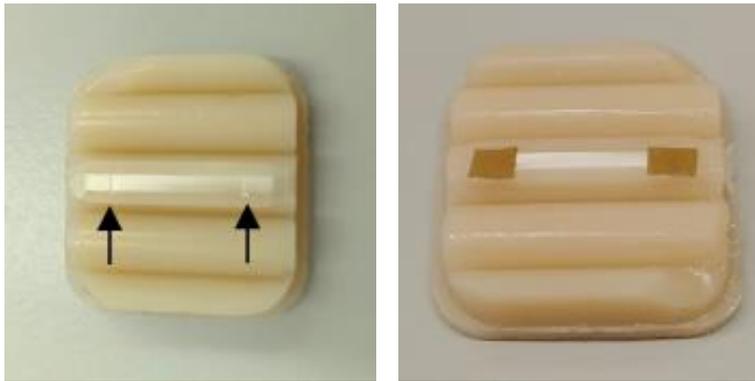
(c)

Abbildung 23 (a) Einzelteile der Aluminiummatrize, (b) Aufgeschraubte Gussform zur Herstellung von drei Proben, (c) Zugeschraubte Matrize und Applikation des Provisorienkunststoffs

Abschließend mussten die Proben oberflächlich mit dem „SS-200 Grinder/Polisher“ (LECO Corporation, Michigan, USA) mit Schleifpapier feinsten Körnung (800) beschliffen werden, um eine koplanare Ebene zwischen Kunststoff und Dentin zu schaffen. Weiterhin wurde hierdurch sichergestellt, dass sich auf dem Zahnmaterial keine Kunststoffüberhänge mehr befinden und das Dentin eine gleichmäßig glatte Oberfläche aufweist.

Eine Probenoberfläche war aus 3 halbrunden Prominzen und 2 halbierten seitlichen halbrunden Prominzen aufgebaut. Das Dentinstäbchen war in den mittigen halbrunden Zylinder eingebettet und bildet die „region of interest“ (ROI), d.h. das zu testende Material der Probe [149]. Die Komplexität des Oberflächenreliefs einer jeden Probe sollte eine geschlossene Zahnreihe im Mund simulieren.

Zur eindeutigen Zuordnung der einzelnen Proben wurde mit einem Handstück auf der Probenrückseite eine Nummer eingraviert. Auf der Probenvorderseite wurden zwei senkrecht gravierte Linien zur Markierung der Referenzbereiche am linken und rechten Ende der Dentinoberfläche eingebracht (Abbildung 24). Die fertigen Proben wurden dann bis zur Zahnputzsimulation bei 37° in Leitungswasser gelagert, um eine Dentinaustrocknung zu vermeiden.



(a)

(b)

Abbildung 24 Vorbereitete Dentinprobe: (a) Gravur der Referenzbereiche (schwarze Pfeile), (b) Abgeklebte Referenzbereiche als Vorbereitung auf die Zahnputzsimulation

Kurz vor Beginn einer Zahnputzsimulation erfolgte das Abkleben der Referenzbereiche mithilfe eines Paketklebebandes. Die abgeklebten Bereiche gewährleisteten, dass über die gesamte Zahnputzsimulation diese Stellen ungeputzt blieben (Abbildung 24 a und b).

3.3 Zahnputzsimulator

Der Zahnputzsimulator „Zahnbürst-Prüfmaschine-linear LR 1“ (SyndiCAD, München, Deutschland) simuliert das Zähneputzen über einen gewissen Zeitraum. Die Maschine ist in der Lage sechs manuelle oder elektrische Zahnbürsten und sechs Proben in einzelnen Probenkammern sowie Abrasivslurrylösung für jede Probe gleichzeitig aufzunehmen (Abbildung 25).



(a)



(b)

Abbildung 25 (a) Zahnputzsimulator „Zahnbürst-Prüfmaschine-linear LR1“ (SyndiCAD, München, Deutschland), (b) Für diese Untersuchung fixierte Zahnbürstenmodelle im Zahnputzsimulator

Während der Putzsimulation blieben die untersuchten Handzahnbürsten starr und lediglich die Proben bewegten sich linear mit konstanter Geschwindigkeit von 70 Zyklen/min.

Schwingungen der Zahnbürsten sollten nahezu nicht auftreten und wären nur eine Konsequenz von Rauigkeiten der Probenkörper oder falscher Justierung. Über einen zentralen Kurbelantrieb bewegten sich die 6 Proben mit einer Amplitude von 45 mm. Der Zahnputzsimulator ist in seinem Aufbau umgekehrt zur klinischen Realität, was jedoch den Vorzug einer optimierten Laufruhe und Langlebigkeit aller angetriebenen Teile und Lager hat [144]. Die Bedienung der Maschine gestaltet sich durch die geringe Schalteranzahl sehr unkompliziert. Das Gerät verfügt über keine Schnittstelle für einen Computer, was für die Einstellung der Parameter nicht nötig ist. Zur Gewährleistung des Arbeitsschutzes, ist die Maschine mit einem „Not-Aus-Schalter“ ausgestattet, um bei Gefahr, wie zum Beispiel einer Probenlockerung, einem Heißlaufen der Maschine oder dem Fahren der Proben gegen ein Hindernis, unverzüglich die Maschine abschalten zu können.

Die einzelnen Proben wurden in ihre Probenhalterungen eingeschoben und mit einer Abdeckung fixiert, sodass sich die Proben während des Versuchs nicht in der Längsachse lockern konnten. Diese Abdeckung bestand aus einem glatten Metallstreifen, der vor und hinter der Probe angebracht war, sodass die Zahnbürste nicht hängen bleiben und über die Probe konstant gleiten konnte (Abbildung 26).

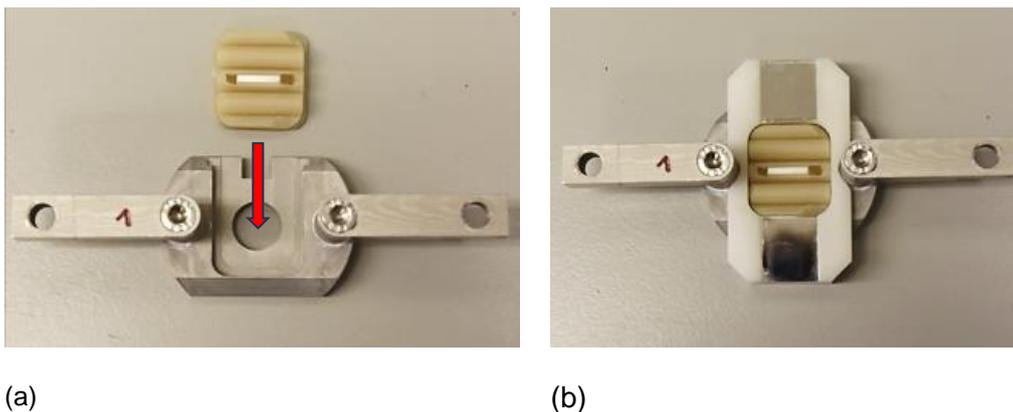


Abbildung 26 (a) Einschieben der Probe in den Probenhalter (roter Pfeil), (b) Fixieren der Probe im Probenhalter mit der Abdeckung

Die Einschaltung des Geräts erfolgte über den „An/Aus-Schalter“ und anschließend wurde über einen weiteren schwarzen Schalter die Referenzfahrt der Probenhalter gestartet (Abbildung 31 a und b). Es wurden die Probenhalter mitsamt Probe in den Zahnputzsimulator eingebracht, welche über Schrauben an beiden Enden fixiert wurde. Damit wurde eine gegenseitige Stabilisierung der Proben erreicht und es wurde eine Lockerung des Versuchsaufbaus verhindert. Auch die Zahnbürsten werden über verschiedene Schrauben in einem Aufnahme-Zylinder fixiert. Da beim Zahnbürstenmodell von Prokudent der Griff voluminöser als die Halterung war, wurde der Zylinder zur Aufnahme der Zahnbürste mit einem kondensationsvernetzten Silikon (Optosil® Comfort® Putty, Kulzer GmbH) ersetzt.

Die Zahnbürstenköpfe sollten dann mittig und parallel zur Probe, insbesondere der „region of interest“ (ROI), platziert werden.

Es sollte die Zahnbürste in allen Achsen justiert werden, dass maximaler und gleichmäßiger Kontakt zwischen der Probenoberfläche und dem Zahnbürstenborstenfeld erreicht werden konnte (Abbildung 27).



(a)

(b)

Abbildung 27 (a) Mittige Ausrichtung der Zahnbürste zur Probe, (b) Parallele Ausrichtung des Zahnbürstenkopfes zur Probe

Hierbei war es auch wichtig die richtige Höhe und Neigung der Zahnbürsten zu justieren. Sobald die Ausrichtung erfolgte, wurde über insgesamt 5 verschiedene Schrauben pro Probenarm die Ausrichtung arretiert (Abbildung 28).

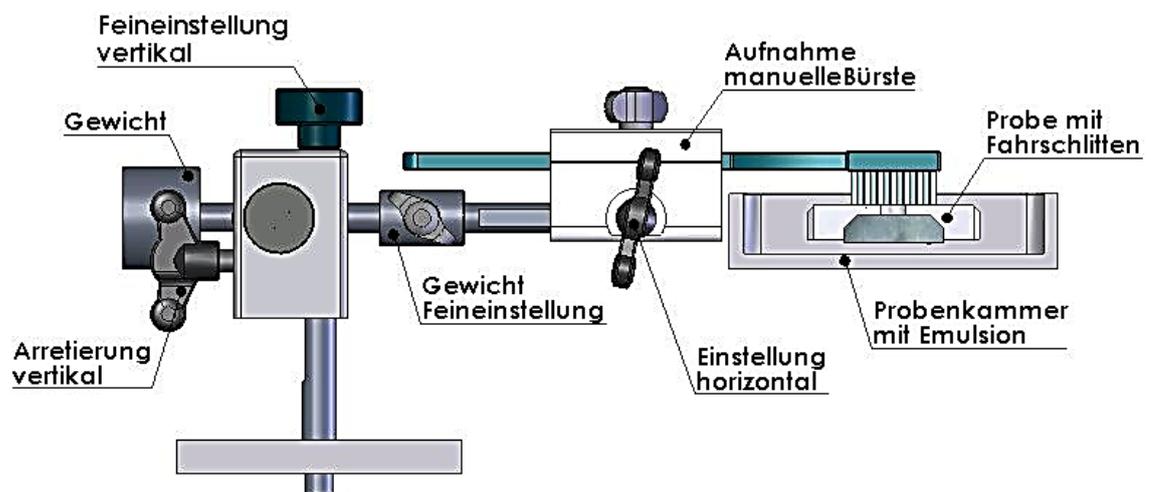


Abbildung 28 Justierungsmöglichkeiten zum Ausrichten der Zahnbürste

Es erfolgte dann die Eichung der Auflagegewichte für jede einzelne Zahnbürste. Für Handzahnbürsten wurde ein Wert von 150 g angenommen [144, 311, 312]. Hierfür wurden die Probenkammern manuell abgesenkt und anstelle der Proben wurde die digitale Feinwaage „PS-500“ (Conrad Electronic AG, Wollerau, Schweiz) aufgesetzt. Durch die Regulierung von Feststellgewichten, konnte das gewünschte vertikale Auflagegewicht exakt eingestellt werden (Abbildung 29).

Anschließend musste die Waage entfernt werden und die Probenkammern sollten wieder angehoben werden. Es erfolgte nun eine visuelle Nachkontrolle zur Überprüfung der Ausrichtung der Zahnbürsten.



Abbildung 29 Einstellung des Auflagegewichtes von 150 g für jede Zahnbürste

Die Emulsion für die einzelnen Probenkammern zur Zahnputzsimulation wurden in gleichen Teilen aus Wasser und der Zahnpasta „Colgate Total“ (Colgate Palmolive GmbH, Hamburg, Deutschland) mit einem Quirl gleichmäßig vermischt (Abbildung 30). Sie sollte so in ihrer Viskosität der klinischen Realität entsprechen. Die hergestellte Slurrylösung wurde dann in jede einzelne Probenkammer eingefüllt, sodass die Probe damit bedeckt war. Das Dentin sollte während der Simulation nicht austrocknen, deshalb wurde alle 30 min neue Slurrylösung nachgefüllt. Vorteilhaft erschien bei der Simulation, dass durch die Probenbewegung, die Emulsion ständig umgerührt wurde und die Abrasivpartikel sich nicht absetzen konnten.

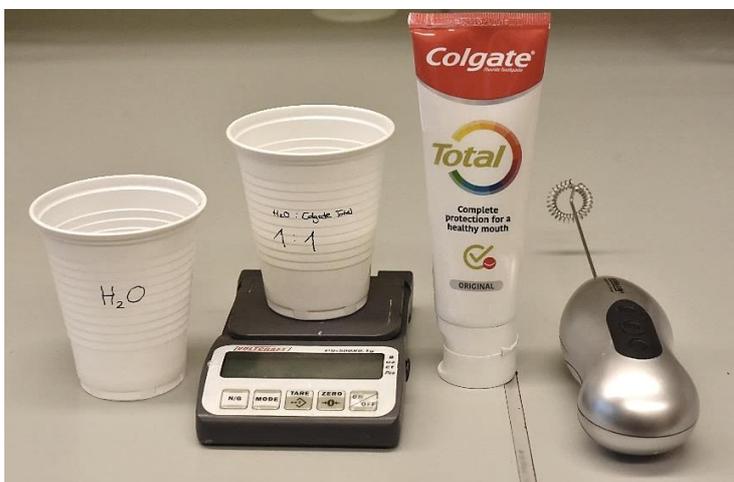


Abbildung 30 Herstellung der Slurrylösung im Verhältnis 1:1 mit Leitungswasser und Zahnpasta Colgate Total (Colgate Palmolive GmbH, Hamburg, Deutschland)

Über eine LCD-Displayanzeige wurde die Zyklenzahl eingestellt (Abbildung 31c), wobei ein Zyklus einer Hin- und Herbewegung entsprach. Die Zyklenzahl 12,5 k simulierte die Benutzung der Handzahnbürste über einen Zeitraum von ca. 6 Wochen bei einer zweimal täglichen Anwendung für je zwei Minuten Putzzeit. Den Überlegungen lag das Paper von Sorensen et al. von 2002 zugrunde, bei denen sich diese Zyklenzahl auf eine einzelne Zahnfläche bezieht [149]. In der aktuellen Untersuchung sollte jedoch besonders die Abnutzung der Zahnbürste und nicht die Abrasion des Dentins im Vordergrund stehen, weshalb sich die Hochrechnungen der Zahnputzzyklen auf die Benutzungsdauer der Zahnbürste, statt der Reinigung der einzelnen Zahnfläche, bezogen (Abbildung 33). Die Simulation wurde manuell über einen „Start/Stop-Schalter“ gestartet (Abbildung 31b) und endete automatisch nach Ablauf der voreingestellten 12,5 k Zyklen. Es war jederzeit möglich bei Bedarf die Simulation über diesen Schalter kurzzeitig zu unterbrechen.

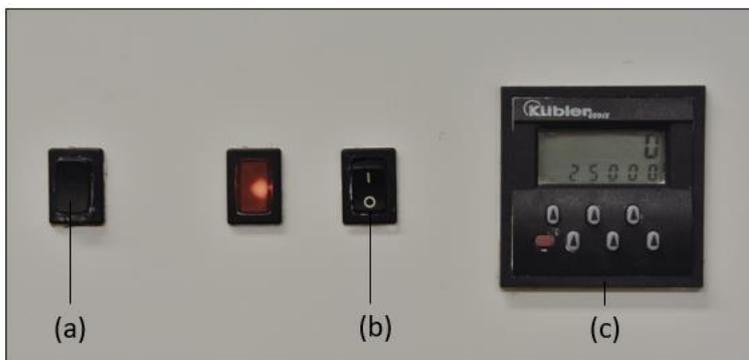


Abbildung 31 Bedienung des Zahnputzsimulators mit LCD-Displayanzeige: (a) Schalter für die Referenzfahrt, (b) „Start/Stop-Schalter“, (c) Einstellung der Zyklenzahl

Nach Abschluss der Simulation wurden die Proben und Zahnbürsten des Zahnputzsimulators entnommen und gründlich mit Wasser abgespült. Es folgte eine anschließende Reinigung der Proben und der Zahnbürsten im Ultraschallbad für drei Minuten. Dann wurde der Zustand der Zahnbürstenborsten makroskopisch mit einer Spiegelreflexkamera festgehalten. Es erfolgten je Zahnbürste Aufnahmen in der Frontal- sowie in der Seitenansicht.

Aus Trocknungsgründen wurden die Borsten 24 Stunden später mikroskopisch mit dem REM dokumentiert und anschließend wurde eine erneute Simulation von 12,5 k Zyklen gestartet. Diese Abfolge wurde insgesamt viermal für drei Zahnbürstenmodelle ($n = 3$) wiederholt, sodass die Gesamtputzzeit insgesamt 6 Monaten, d.h. 50 k Zyklen und damit einer Zahnbürstenabnutzung von 6 Monaten entsprach. Für fünf Zahnbürstenmodelle ($n = 5$) fand lediglich die Simulation mit nur einem Intervall von 50 k Zyklen statt, jedoch ohne den Borstenzustand zwischendurch zu dokumentieren. Diese Untersuchung diente der späteren Oberflächenanalyse des Dentins in Bezug auf Abrasion und Oberflächenrauheit.

3.4 Arbeitsablauf

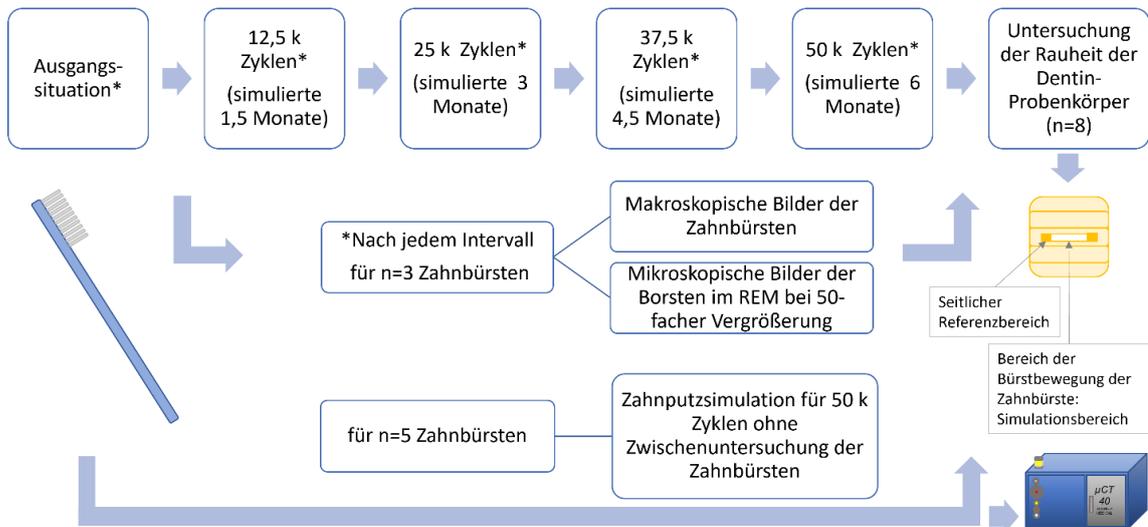


Abbildung 32 Arbeitsablauf: Überblick über den Ablauf der Zahnputzsimulation im Zahnputzsimulator, die Untersuchungen der Zahnbürsten und -borsten, der Dentin-Probenkörper sowie der Mikro-CT-Untersuchungen

3.5 Berechnung der Dauer der Zahnputzsimulation

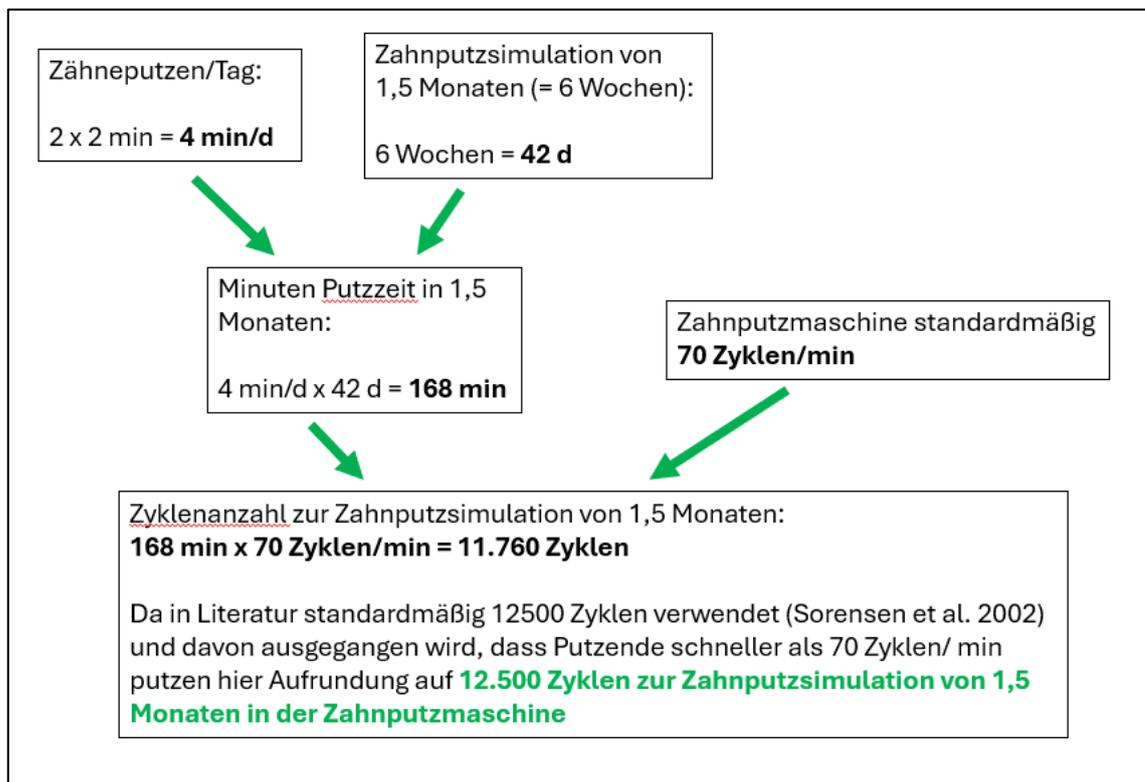


Abbildung 33 Berechnung der Zyklen zur Simulation von 1,5 Monaten Zähneputzen im Zahnputzsimulator

3.6 Makroskopische Untersuchung der Zahnbürstenköpfe

Mit der Spiegelreflexkamera „D7200“ (Nikon, Tokio, Japan) wurden Fotos der Zahnbürstenköpfe im Profil von der Seite als auch frontal aufgenommen. Die Dokumentation fand sowohl vor der Zahnputzsimulation, d.h. im Neuzustand der Bürsten, als auch zu den Zeitpunkten 12,5 k Zyklen, 25 k Zyklen, 37,5 k Zyklen sowie 50 k Zyklen statt. Diese Abfolge wurde für jeden Zahnbürstentyp dreimal wiederholt ($n = 3$).

Ziel war es mithilfe der Aufnahmen zu beurteilen, inwieweit sich die Borsten im Verlauf der Zahnputzsimulation makroskopisch veränderten. Der Fokus lag hier auf Abnutzungserscheinungen wie beispielsweise Umbiegen, Abspreizen oder Auffasern der Borsten. Die Beurteilung der Abnutzung erfolgte repräsentativ nach dem Conforti-Index modifiziert nach Van Leeuwen [128].

3.7 Mikroskopische Untersuchung der Zahnbürstenborsten

Die Zahnbürsten wurden nach der Zahnputzsimulation im Ultraschallbad für drei Minuten gereinigt, damit Slurrybestandteile und Staubpartikel von den Borsten entfernt werden konnten. Die Borsten wurden an einem seitlichen Borstenbüschel in der Mitte des Borstenkopfes der Zahnbürste entnommen. Zum Abtrennen eigneten sich ein Skalpell sowie eine zahnärztliche Pinzette. Anschließend trockneten die Borsten in einem Gefäß für 24 Stunden. Erst dann konnten die einzelnen Borsten auf einem Stift-Probenteller aus Aluminium, auf dessen Leit-Tabs aufgeklebt sind, fixiert werden (Abbildung 34).



Abbildung 34 Stiftprobenteller mit aufgeklebten Zahnbürstenborsten (helle Striche) vor der Besputterung

Das Besputtern unter Vakuum erfolgte mit dem „SC7620 Mini Sputter Coater“ (Polaron Ltd; heute: Quorum Technologies Ltd, Laughton, United Kingdom). Das Gerät arbeitete mit einem Arbeitsdruck von 0,3 atm bei 40 mA Strom. Bei diesem Vorgang wurde eine 50 nm dicke Gold-Palladiumschicht auf die Probenhalter aufgebracht, damit eine für die Untersuchung notwendige elektrisch leitende Oberfläche entstehen konnte.

Im Rasterelektronenmikroskop „ZEISS GEMINI® FESEM SUPRA™55VP“ (Carl Zeiss SMT AG, Oberkochen, Deutschland) (REM) wurden für drei komplette Durchläufe eines Zahnbürstentyps ($n = 3$) mikroskopische Aufnahmen der Borsten gemacht (Abbildung 35). Die Elektronenbeschleunigung betrug hierbei standardisiert 15 kV.



Abbildung 35 Rasterelektronenmikroskop ZEISS GEMINI® FESEM SUPRATM55VP, Carl Zeiss SMT AG, Oberkochen, Deutschland

Bei 50-facher Vergrößerung wurden Bilder zur Ansicht von drei einzelnen Borsten zu Beginn und nach vier weiteren Intervallen (0 Zyklen, 12,5 k Zyklen, 25 k Zyklen, 37,5 k Zyklen, 50 k Zyklen) inklusive deren Borstenspitzen angefertigt. Die mikroskopischen Aufnahmen werden dann zur Beurteilung der Borstenqualität der einzelnen Zahnbürsten genutzt. Schwerpunkte bei der Evaluierung bilden die Borstenendabrundung sowie die Borstenoberflächenbeschaffenheit.

3.7.1 Borstenendabrundung

Für Zahnbürsten mit planem Borstenprofil mit Borstenendabrundung ist in der „DIN EN ISO 20126 Zahnheilkunde - Handzahnbürsten - Allgemeine Anforderungen und Prüfverfahren 2021“ eine Sichtprüfung zur Beurteilung der Borstenendabrundung beinhaltet [294]. Diese Norm zeigt Abbildungen von akzeptabel und nicht akzeptabel endgerundeten Borsten (Abbildung 36).

Für die Bewertung der Borstenendabrundung wurde auf Grundlage der in der DIN 20126 gezeigten akzeptabel endgerundeten Borsten [294] in Microsoft® PowerPoint® (Microsoft 365 MSO, Version 2211) eine transparente Maske angefertigt, die diesen Konturen entsprach (Abbildung 37).

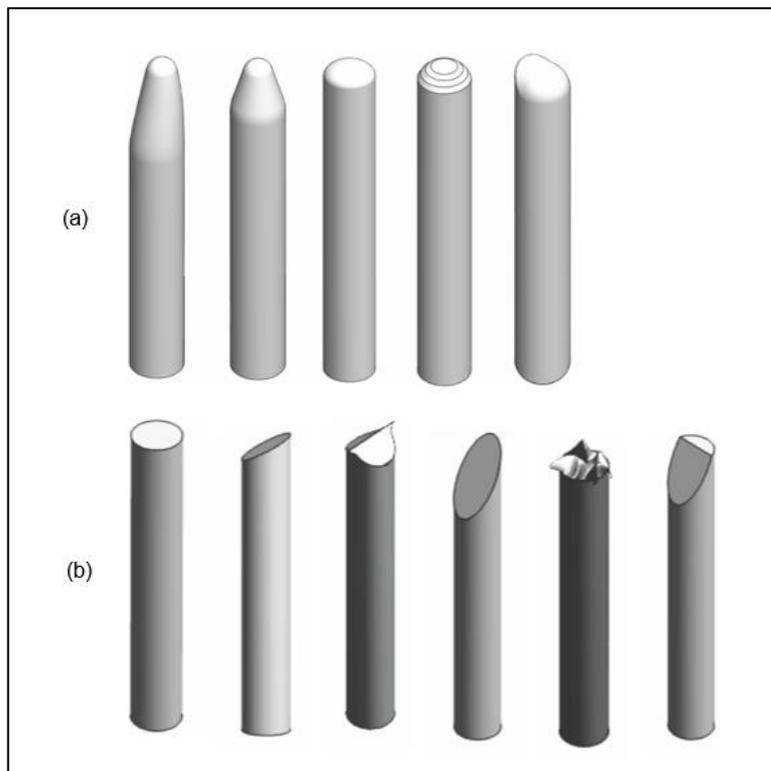


Abbildung 36 DIN 20126 Sichtprüfung der Endabrundung der Filamente: (a) bestandene Borstenenden, (b) nichtbestandene Borstenenden [294]

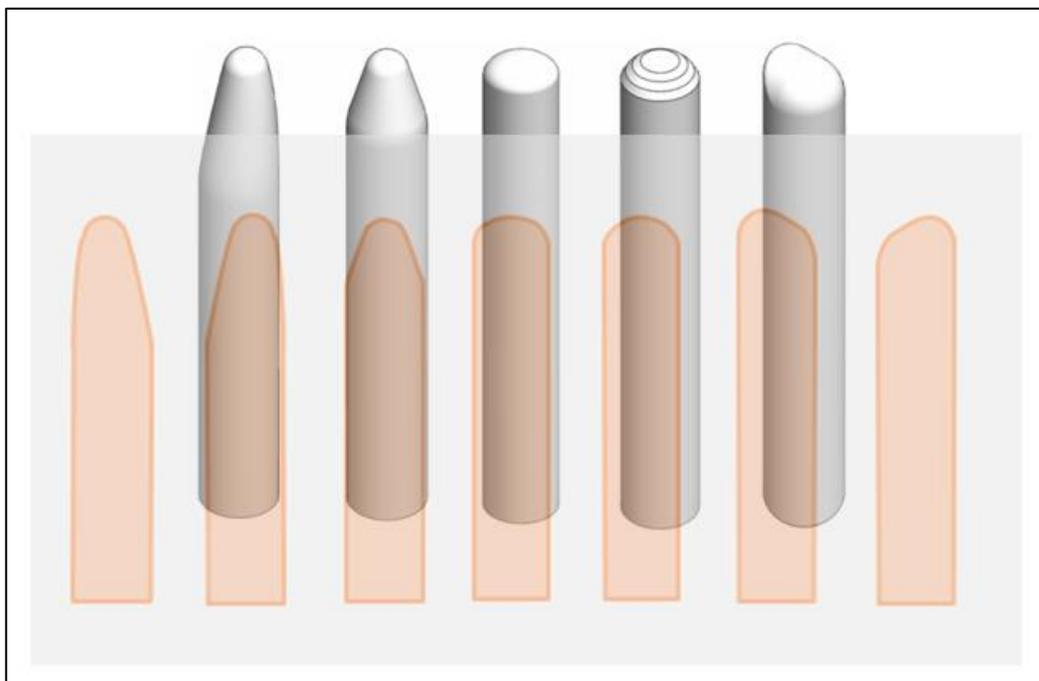


Abbildung 37 Herstellung der transparenten Maske auf Grundlage der Sichtprüfung für bestandene Borstenenden aus der DIN 20126 [294]

In der Maske waren fünf verschiedene Borstenendabrundungen beinhaltet, wovon zwei der Formen aufgrund ihrer Asymmetrie gespiegelt wurden, sodass insgesamt 7 mögliche Umrisse entstanden (Abbildung 38).

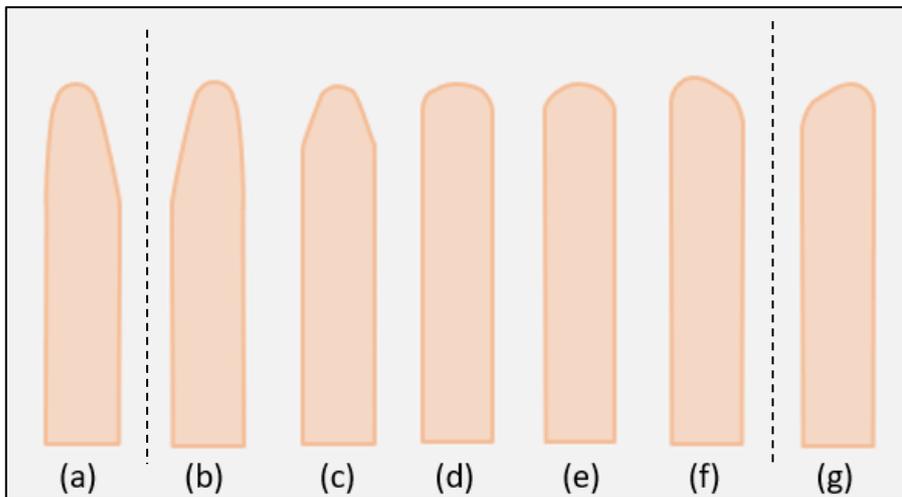


Abbildung 38 Transparente Maske zur Beurteilung der Borstenendabrundung: (b) bis (f) 5 verschiedene Formen akzeptabler Endabrundung sowie (a) und (g) zwei gespiegelte Konturen modifiziert nach DIN EN ISO 20126 [294]

Die transparente Maske konnte nun über jede einzelne Borste in einem REM-Bild gelegt werden. Sie war sowohl dreh- als auch skalierbar, da die Borsten in den REM-Aufnahmen nicht alle parallel lagen und die Borsten in ihrer Größe variierten. Mit ihr konnte eingeschätzt werden, ob der Umriss der jeweiligen Borste mit denen der transparenten Maske übereinstimmte (Abbildung 39).

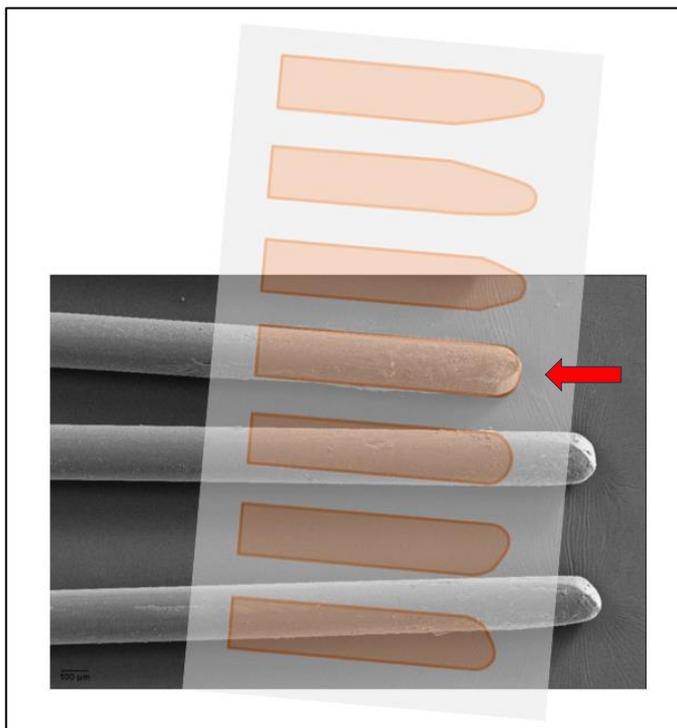


Abbildung 39 REM-Aufnahme von drei Borsten bei 50-facher Vergrößerung: Überprüfung der Borstenendabrundung der obersten Borste mithilfe der transparenten Maske (roter Pfeil)

Entsprach die Kontur der Borstenendabrundung einem der sieben Umrisse der Maske, so wurde in dieser Untersuchung die geprüfte Borste hinsichtlich ihrer Endabrundung als akzeptabel eingeschätzt und erhielt den Grad 1. Folgte die Borstenendabrundung keiner der möglichen Konturen der Maske (rote Pfeile), so galt die Borste hinsichtlich ihrer Endabrundung als inakzeptabel und wurde mit dem Grad 0 bewertet (Abbildung 40).

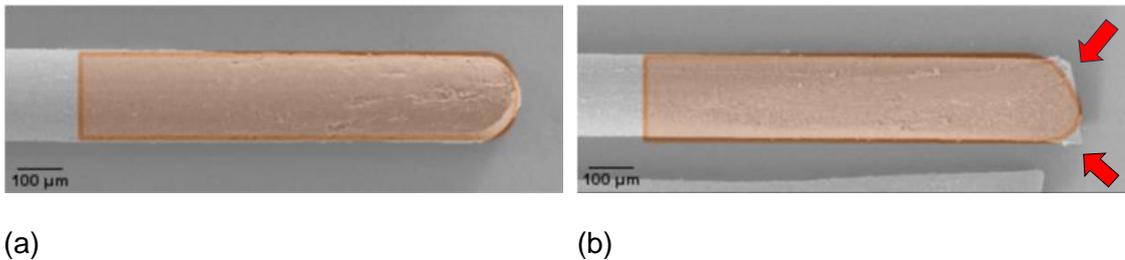


Abbildung 40 REM-Aufnahmen von je einer Borste bei 50-facher Vergrößerung Borstenendabrundung: (a) akzeptabel Grad 1, (b) inakzeptabel Grad 0 (rote Pfeile)

3.7.2 Borstenoberflächenbeschaffenheit

Die Bewertung der Borstenoberflächenbeschaffenheit erfolgte mithilfe einer selbst aufgestellten Klassifizierung in Grad I und II (Tabelle 2).

Tabelle 2 Klassifizierung der Borstenoberflächenqualität in Grad I und II

Beurteilung	Grad	Beschreibung	Beispiele
Akzeptabel	I	nahezu keine Rillen/ Abschilferungen/ Rauigkeiten/ Unebenheiten oder Kombinationen daraus	
Inakzeptabel	II	mehrere Rillen/ Abschilferungen/ Rauigkeiten/ Unebenheiten oder Kombinationen daraus	

Bei diesem Teil der Untersuchung wurde der Fokus auf die Beurteilung der Oberflächen sowohl an der Borstenspitze, als auch seitlich im Verlauf der Borste gelegt. Borsten, die den Grad I erreichten, wurden als akzeptabel klassifiziert, wohingegen Borsten, die als Grad II eingeteilt wurden, inakzeptabel waren (Abbildung 41).

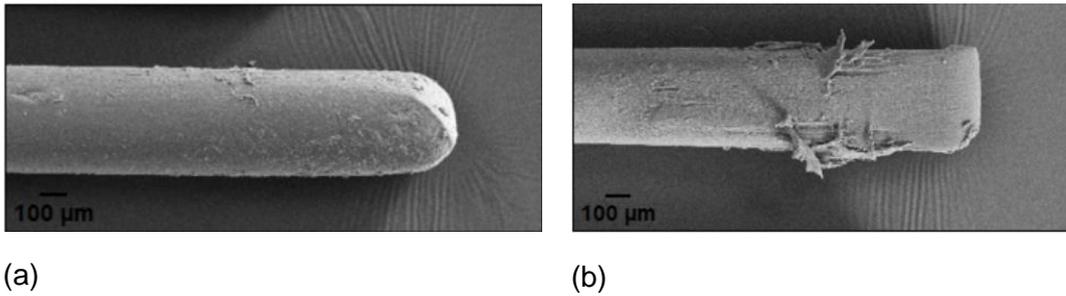


Abbildung 41 REM-Aufnahmen von je einer Borste bei 50-facher Vergrößerung Borstenoberflächenqualität: (a) Grad I akzeptabel, (b) Grad II inakzeptabel

Es war also beispielsweise möglich, dass Borsten trotz geringfügiger Ausfransungen oder Materialüberhänge an der Borstenspitze eine akzeptable Borstenendabrundung aufwiesen, wohingegen die Borstenoberflächenbeschaffenheit nur Grad II erreichte. Wichtig zur Beurteilung der Borstenendabrundung war, dass die Kontur kontinuierlich und mit einer der Umrisse der transparenten Maske überlagerbar war.

3.7.3 Borstengesamtbeurteilung

Aus den Beurteilungskriterien für die Borstenendabrundung nach „ISO 20126“ und Borstenoberflächenqualität ergab sich eine Borstengesamtbewertung. Borsten, die sowohl eine akzeptable Borstenendabrundung 1, als auch eine Borstenoberfläche mit Grad I aufwiesen, bestanden die Untersuchung. Borsten, welche in einer der beiden Kriterien inakzeptabel waren, galten als durchgefallen (Tabelle 3).

Tabelle 3 Borstengesamtbeurteilung bestehend aus der Borstenendabrundung und der Borstenoberflächenbeschaffenheit

Borstenendabrundung	Borstenoberflächenbeschaffenheit	Borstengesamtbeurteilung
1 (akzeptabel)	I (akzeptabel)	bestanden
1 (akzeptabel)	II (inakzeptabel)	durchgefallen
0 (inakzeptabel)	I (akzeptabel)	durchgefallen
0 (inakzeptabel)	II (inakzeptabel)	durchgefallen

3.8 Micro-Computertomographische Untersuchung

Von jeweils einer Zahnbürste im Ausgangszustand (vorher) und nach 50 k Zyklen (nachher) Zahnputzsimulation wurde der Bürstenkopf abgetrennt, horizontal in den Probenhalter ($\varnothing = 37$ mm) des Micro-Computertomographen (Micro-CT 40, Scanco Medical AG, Schweiz) gelegt (Abbildung 42) und 695 Schichten mit hoher Auflösung ($18 \mu\text{m}$) gescannt ($n = 1$), so dass die gesamte Länge der Borsten und der obere Teil der Besteckungsfläche erfasst wurde. Die Beschleunigungsspannung betrug 70 kV, der Kathodenstrom $114 \mu\text{A}$ und die Integrationszeit 600 ms. Die Micro-CT Scans wurden als ISQ-Datei gespeichert.

Die ISQ-Dateien wurden in die Software Fiji (<https://imagej.net/software/fiji/>) importiert (File > import > KHKs scanco isq reader), dann wurde jeweils das 16-bit in ein 8-bit Bild verwandelt (image > type > 8-bit). Danach wurde der Threshold angepasst (Image > adjust > threshold) und das Bild in Grauwerten wurde in ein binäres Bild, also schwarz-weiß, umgewandelt [313].

Die Borsten wurden im Ausgangszustand sowie nach 50 k Zyklen der Zahnputzsimulation untersucht und dargestellt. Zu diesem Zweck wurde eine Schicht im oberen Drittel des Bürstenkopfes (Abbildung 43) als zweidimensionales Bild (2D), sowie mehrere dreidimensionale Ansichten (3D) des Borstenkopfes angefertigt (Plugins > 3D Viewer). Die 3D Ansicht der Zahnbürste im unbeutzten Zustand wurde in weiß dargestellt, die im benutzten Zustand in blau.



Abbildung 42 Micro-Computertomograph (Micro-CT 40, Scanco Medical AG, Schweiz) [314]

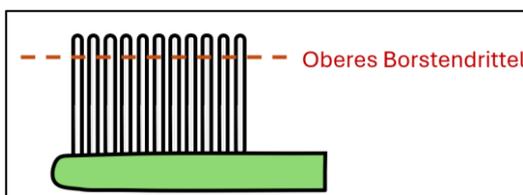


Abbildung 43 Schema der untersuchten Schicht im oberen Drittel des Bürstenkopfes für die zweidimensionale Darstellung der Borsten

3.9 Oberflächenanalyse des Dentins

3.9.1 Quantifizierung der Dentinabrasion

Mit dem 3D-Scanner „Oberflächen Scan KF-30“ (Hardware: SyndiCAD, München, Deutschland; Software: Certiga, Unterhaching, Deutschland), der einen konfokalen (Weißlicht-) Sensor (IFS 2401-3, Micro Epsilon, Ortenburg, Deutschland) besitzt, wurde nach einer Dauer von 50 k Zyklen (ca. 6 Monaten Putzzeit) die Dentinoberfläche ausgemessen, um die Abrasion zu quantifizieren (Abbildung 44).



Abbildung 44 3D-Scanner „Oberflächen Scan KF-30“ (Hardware: SyndiCAD, München, Deutschland; Software: Certiga, Unterhaching, Deutschland)

Zur Gewährleistung einer möglichst genauen Messung wurden alle Proben vor der Untersuchung im Freien aus ca. 20 cm Entfernung mit einem Entspiegelungsspray „MET-L-CHEK developer D70“ (Helling GmbH, Heidgraben, Deutschland) besprüht (Abbildung 45). Die dadurch entstehende dünne Kristallschicht verhinderte Transparenzen des Probenkörpers und somit wurde die Reflexion des Laserstrahls optimiert. Damit das Spray optimal aufgetragen werden konnte, sollte die Probe vorher 30 Minuten trocknen.

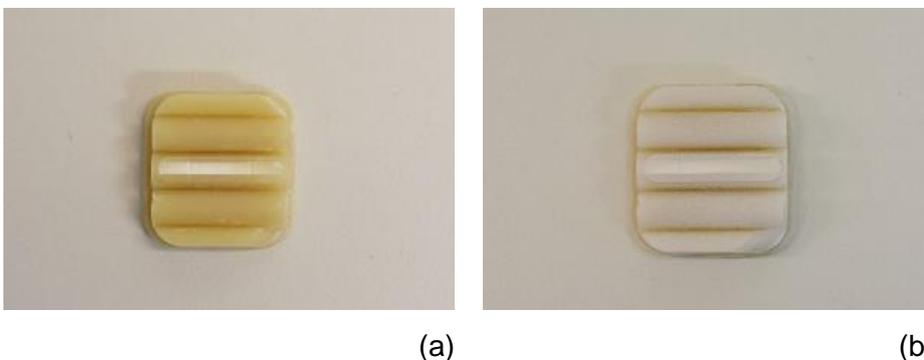


Abbildung 45 Dentin-Probe: (a) unbesprüht, (b) dünn mit Entspiegelungsspray besprüht

Die Proben wurden vorsichtig in einen metallischen Probenhalter eingeschoben und mit seitlich einzudrehenden Schrauben in ihrer Position fixiert. Es war möglich bis zu vier Proben in einem Messvorgang zu scannen. Der bestückte Probenhalter wurde in seiner Lage dank eines Magneten im Laserscanner immer an der gleichen Stelle montiert (Abbildung 46).

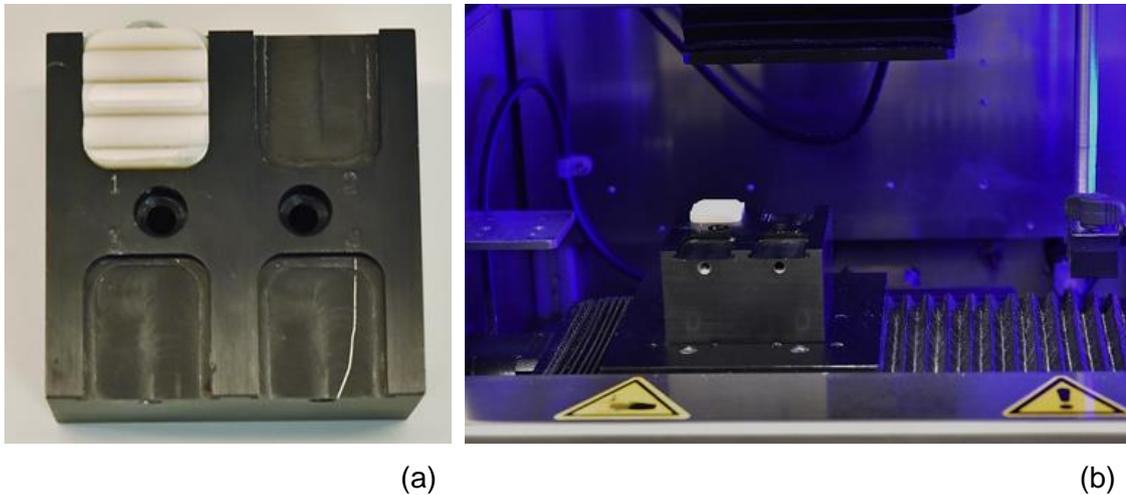


Abbildung 46 (a) Aufnahme einer Probe in den metallischen Probenkörper, (b) Montage des metallischen Probenkörpers im Laserscanner

Anschließend erfolgte die Voreinstellung des Fokus auf ca. 2 mm, damit die Messoberfläche später möglichst genau und scharf abgebildet werden konnte. Im weiteren Schritt erfolgte die Auswahl eines geeigneten Messfensters mithilfe eines integrierten Kamerasystems (Abbildung 47).

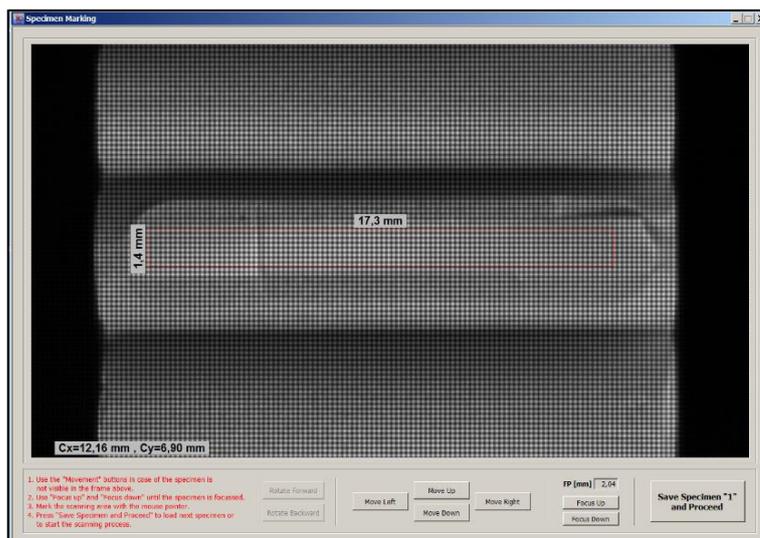


Abbildung 47 Voreinstellung des Fokus und Auswahl des Messfensters

Nach dem Start der Messungen sollte die Klappe des Laserscanners zügig aber vorsichtig geschlossen werden, um externe Störeinflüsse zu vermeiden. Der sehr kleine, scharfe Laserpunkt fuhr das vorher ausgewählte Messfenster in Linien ab und anschließend erschien die gescannte Oberfläche als Höhenprofil am Computerbildschirm (Abbildung 48).

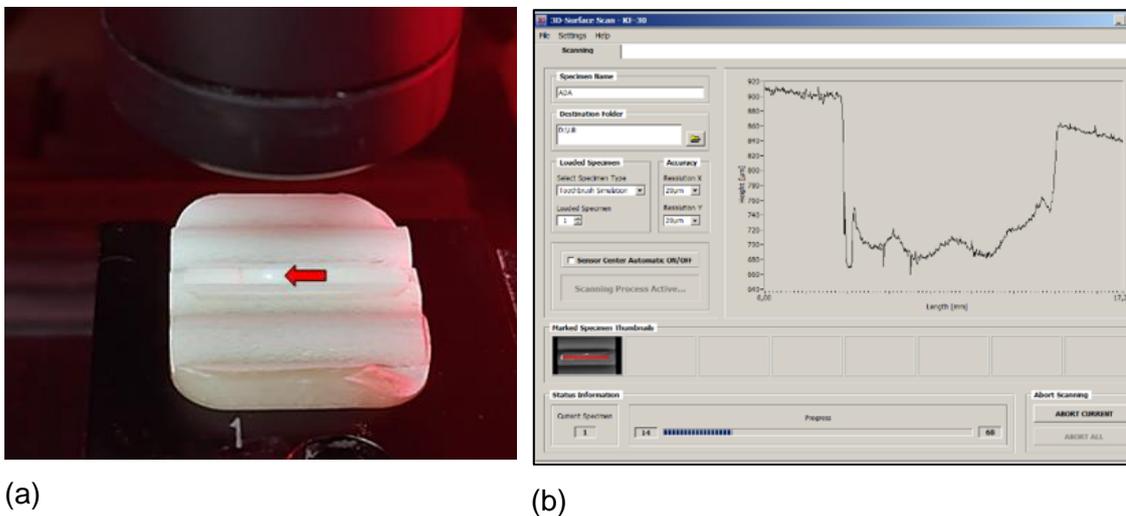


Abbildung 48 (a) Scharfer Laserpunkt während Laserscan (roter Pfeil), (b) Gleichzeitige Ausgabe eines Höhenprofils am Computer

Vorteilhaft erscheint bei diesem Laserscanner die sehr präzise Oberflächenanalyse im μm -Bereich sowie die verschleißfreie Messmethodik [144]. Der Laserscanner verfügt über eine mehrlinzige Optik sowie eine LED-Lichtquelle (= light emitting diode). Laut Herstellerangaben weist das Gerät einen Lichtfleckdurchmesser von $25\ \mu\text{m}$, eine vertikale Auflösung von $0,12\ \mu\text{m}$ und eine Genauigkeit in XY-Richtung von $1,5\ \mu\text{m}$ auf. Der Oberflächenscanner funktioniert mit einem konfokal-chromatischen Messverfahren.

Das aus dem Weißlichtsensor kommende Licht wird in seine spektralen Bestandteile zerlegt, welche anschließend über ein komplexes Linsensystem auf dem Messobjekt fokussiert werden. Die vom Sender projizierten Lichtwellen, die den Fokus auf der Probenoberfläche erzielen, werden aufgrund von Reflexion abhängig von ihrer Entfernung unter einem bestimmten Winkel wieder auf ein Empfangselement zurückgeworfen. Aufgrund der Distanz von Sender zum Empfänger sowie der Lage des Lichtpunktes auf dem Empfänger kann die Distanz zum Messobjekt im Sensor errechnet werden (MICRO-EPSILON Messtechnik GmbH, n. d.).

Nach dem automatischen Abschluss der Messungen erfolgte die weitere Auswertung der Daten mit dem Softwareprogramm „Match 3D“ (Gloger, Weilheim, Deutschland, 1998) [213]. In der Abbildung wurde der gescannte Bereich des Dentinstäbchens in Match 3D sichtbar. Links und rechts waren die beiden Referenzflächen lokalisiert, wohingegen in der Mitte die Abrasionsspur zu sehen war (Abbildung 49).

Vorbereitend für die Vermessung wurden mithilfe eines Filters Ausreißer in der Messung entfernt. Danach wurden die beiden Referenzflächen manuell ausgewählt, sodass sie anschließend zu einer Ebene interpoliert werden konnten (Abbildung 50). Dadurch war es danach möglich eine Differenz zum ausgewählten Bereich der Verschleißspur zu bilden. Das Ergebnis entsprach dann dem mittleren vertikalen Höhenverlust in μm .

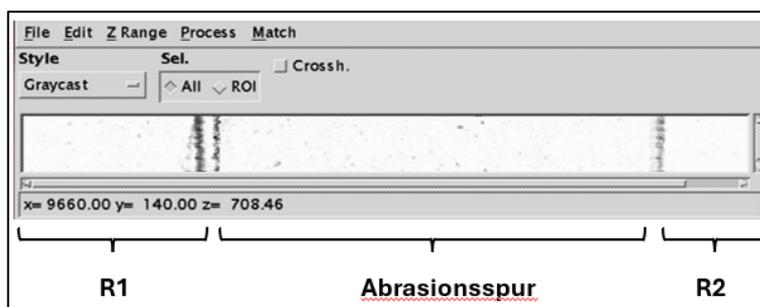


Abbildung 49 Gescannter Bereich des Dentinstäbchens mit den seitlichen Referenzflächen (R1, R2) und der Abrasionsspur

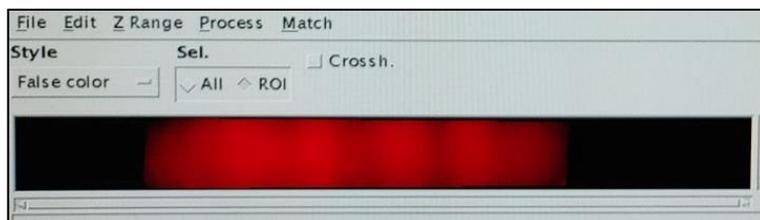


Abbildung 50 Berechnete Verschleißspur unter der interpolierten Ebene in Match 3D (rot)

3.9.2 Bestimmung der Oberflächenrauheit des Dentins

Zur Bestimmung der Oberflächenrauheit der Dentinproben wird das Digitalmikroskop VHX-970F (KEYENCE DEUTSCHLAND GmbH, Neu-Isenburg, Deutschland) genutzt (Abbildung 51).

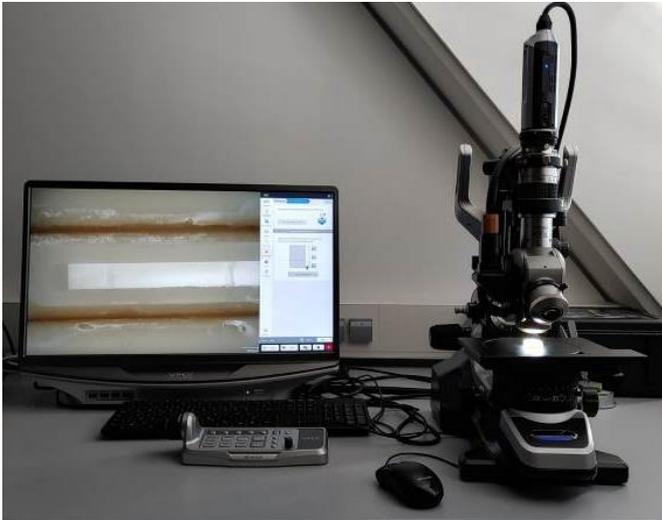


Abbildung 51 Digitalmikroskop VHX-970F (Keyence Deutschland GmbH, Neu-Isenburg, Deutschland)

Nachdem die Dentinprobe auf den Objektisch gelegt wurde, wurde der Abrasions- bzw. Referenzbereich für die Betrachtung ausgewählt. Anschließend wurde die Beleuchtung, sowie der Fokus über die Konsole des Mikroskops eingestellt. Für die Fokussierung des Ausschnitts war hierbei die Funktion „Autofokus ausführen“ unterstützend. Eine tiefscharfe Aufnahme wurde über eine vollautomatische Tiefenzusammensetzung „One Shot Tiefenschärfe“ erreicht. Jetzt konnte das Höhenprofil der Dentineoberfläche mit der 3D-Bildfunktion abgerufen und als farbiges Bild gespeichert werden (Abbildung 52).

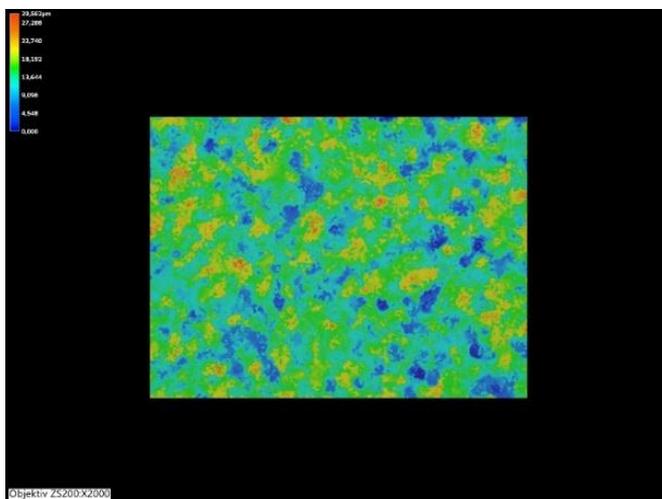


Abbildung 52 Farbiges 3D-Höhenprofil

Im letzten Schritt erfolgte die Messung der Oberflächenrauheit. Der Messbereich wurde über das Werkzeug „Rechteck“ ausgewählt. Es erschien eine Messtabelle zur Oberflächenrauheit, die in Form einer Exceltabelle gespeichert werden konnte.

Der Parameter S_a , mittlere arithmetische Höhe, stellt hier die Erweiterung des Linienrauheitsparameters R_a (arithmetisches Mittel) in die Fläche dar (Abbildung 53a). Dieser Betrag definiert den Höhenunterschied jedes Punktes im Vergleich zum arithmetischen Mittel der Oberfläche. Der Parameter S_z , maximale Höhe, gibt wiederum die Summe aus dem Höhenwert der stärksten Vertiefung und dem Höhenwert der höchsten Spitze innerhalb eines definierten Bereiches an [315] (Abbildung 53b). Beide Werte eignen sich daher zur Evaluierung der Oberflächenrauheit.

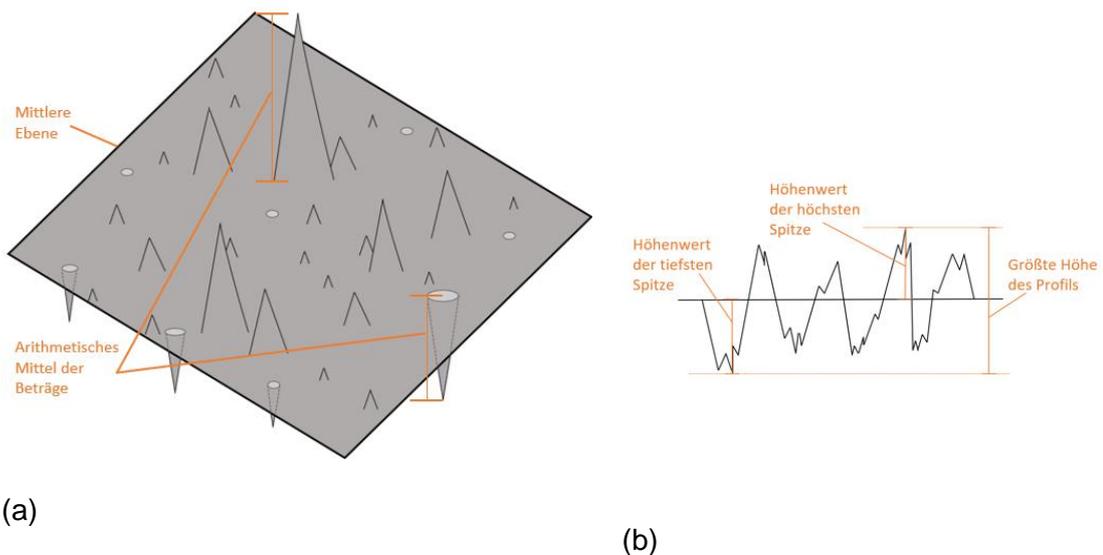


Abbildung 53 (a) arithmetisches Mittel in der Fläche (b) Summe aus dem Höhenwert der höchsten und tiefsten Spitze im definierten Bereich modifiziert nach Keyence Deutschland GmbH [315]

Für eine Dentinprobe wurden acht Messungen im Referenzbereich, am linken und rechten Ende der Dentinprobe, sowie acht Messungen in der Mitte des Dentinstäbchens, im Bereich der Bürstbewegung der Zahnbürsten, durchgeführt. Somit konnte die unberührte Dentinoberfläche (am linken und rechten Ende der Dentinprobe) mit der Oberfläche nach der Putzsimulation in Bezug auf ihre Rauheit verglichen werden.

Das Digitalmikroskop eignet sich besonders für die Beurteilung von funktionalen Oberflächen, die Verschleiß unterliegen. Mit diesem Mikroskop ist es möglich die Dentinoberfläche in der Vergrößerung anzusehen, Bilder anzufertigen, sowie Messungen von ausgewählten Bereichen vorzunehmen. Das Mikroskop verfügt außerdem über eine hohe Tiefenschärfe sowie verschiedene Beleuchtungsfunktionen und ist in der Lage auch unebene Oberflächen von Objekten gut fokussiert abzubilden [315].

3.10 Chemische Elementaranalyse

Mit der Software „Genesis Spectrum EDAX®“ (AMETEK, Mahwah, USA) wurde die chemische Zusammensetzung der Elemente der Zahnbürstenborsten im REM ermittelt (Abbildung 54). Für die Materialcharakterisierung wurde die energiedispersive Röntgenspektroskopie (EDX) genutzt [316].



Abbildung 54 „Genesis Spectrum EDAX®“ (AMETEK, Mahwah, USA)

Nachdem bei einem Arbeitsabstand von 10 mm die Region of interest (ROI) festgelegt wurde, konnte die Spektrenaufnahme über die Schaltfläche „Collect“ begonnen werden. Anschließend wurden die Peaks über das Bedienfeld „Peak ID“ automatisch identifiziert, wobei diese die Häufigkeit von Röntgensignalen mit bestimmter Energie darstellten. Die Darstellung der Peaks erfolgte mit den entsprechenden Elementsymbolen über den jeweiligen Peaks. Die Elemente Gold und Palladium mussten nachträglich aus der Elementliste entfernt werden, da diese bei dem für die REM-Aufnahmen nötigen Sputtervorgang aufgetragen wurden und somit nicht der Elementzusammensetzung der Borsten entsprach. Nachdem über die Schaltfläche „HPD“ mit einer Kurve die Peakidentifizierung überprüft wurde, konnten das für jede Borste ermittelte Spektrendiagramm sowie die Tabelle zur prozentualen Elementverteilung in einer Worddatei abgespeichert werden.

Bei allen sechs Zahnbürstenmodellen wurde die chemische Zusammensetzung bei je drei Borsten untersucht ($n = 3$). Da bei den Zahnbürstenmodellen von Alterra, Dr. Best sowie Prokudent eine Zweifarbigkeit der Borsten bestand, wurden sowohl die grünen als auch die weißen Borsten separat auf ihre Zusammensetzung untersucht. Die Zahnbürstenmodelle von ADA Control, Alverde und Hydrophil hatten dagegen nur einfarbige Borsten.

3.11 Mechanische Untersuchung

Zur näheren Bestimmung der mechanischen Eigenschaften wurde mithilfe des Mikrozugprüfgerät TC 550 (SyndiCAD, München, Deutschland) im Zugversuch das Elastizitätsmodul der Zahnbürstenborsten bestimmt (Abbildung 55). Das Elastizitätsmodul gibt die relative Steifigkeit oder Starrheit eines Materials im elastischen Bereich an und ist eine Materialkonstante [317, 318].



Abbildung 55 Mikrozugprüfgerät TC 550 (SyndiCAD, München, Deutschland)

In der Vorbereitung des Zugversuchs wurden von jedem Zahnbürstentyp mithilfe eines Skalpells einzelne Borsten eines Borstenbüschels im mittleren Bereich des Zahnbürstenkopfes abgetrennt und anschließend in einem beschrifteten Gefäß aufbewahrt (Abbildung 56). Beinhaltete eine Zahnbürste mehrfarbige Borsten, so wurde jede Farbe einzeln untersucht. Von jeder Borstenart wurden 30 Borsten ($n = 30$) zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls genutzt.



Abbildung 56 Abgetrennte Borsten der Zahnbürste ADA Control in transparentem Gefäß

Nach Einschaltung des Zug-Druck-Prüfsystems am Hauptschalter startete die Referenzfahrt automatisch, um die Position der Schlitten zu überprüfen.

Erst anschließend wurde die Software „TC-550“ geöffnet. Nach Auswahl des Probenhaltertyps für den Zugversuch, wurden alle Parameter standardisiert voreingestellt und in der Software eingegeben.

Bei der Spannungs-Dehnungsmessung war der Querschnitt der Probe, d.h. der der Borste rund, es wurde eine Zugkraft aufgewendet mit einer maximalen Kraft von 100 N bei einer Geschwindigkeit von 2 mm/min.

Dann wurde an einer definierten Position anhand einer Schieblehre der Durchmesser der zu vermessenden Borste gemessen und ebenfalls in der Software eingegeben (Abbildung 57).



Abbildung 57 Messung des Borstendurchmessers mit der Schieblehre an definierter Position (schwarzer Punkt), siehe roter Pfeil

Anschließend wurde die einzelne Borste in die zwei Probenhalter-Klemmvorrichtungen mit einem Schraubenzieher eingeschraubt. Hierbei war darauf zu achten, dass die Borste mittig platziert wurde und senkrecht zu den Probenhaltern angeordnet war (Abbildung 58).

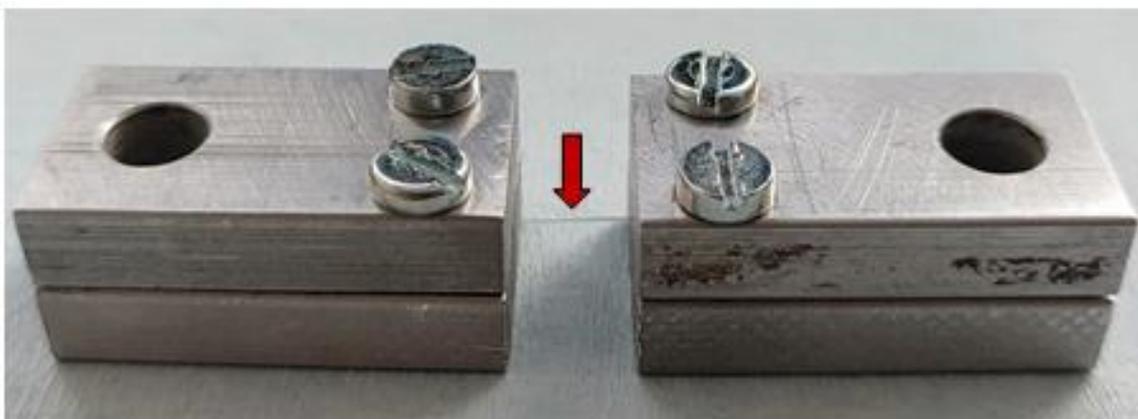


Abbildung 58 Platzieren einer Borste zwischen den Probenhaltern (roter Pfeil)

Es wurden die Probenhalter mitsamt Probe im Mikrozuggerät auf den Schlitten platziert. Mithilfe der Schieblehre wurde dann der Parameter der freien Länge der Borste zwischen den Probenhalter-Klemmvorrichtungen ermittelt und manuell in der Software vermerkt (Abbildung 59).



Abbildung 59 Messung der freien Länge eines Filaments mit der Schieblehre

Da die Software in der Lage war den Parameter des Probenquerschnitts aufzunehmen, wurde es in diesem Versuch möglich, über die Messung der aufgewendeten Kraft mittels kalibriertem Kraftsensor, das Elastizitätsmodul zu berechnen. Sobald die Messung gestartet wurde, erschien eine direkte digitale Grafik als Spannungs-Dehnungs-Diagramm (Abbildung 60). Die Spannungswerte wurden in MPa und die Dehnung wird prozentual angegeben. Nach Beendigung der Messung öffnete sich das Messprotokoll, von dem die Messwerte notiert werden konnten.

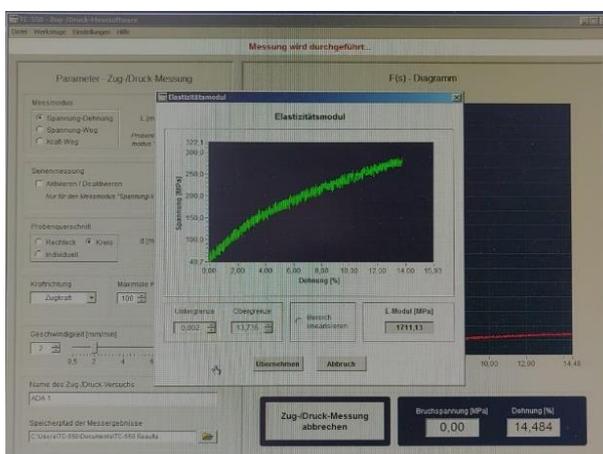


Abbildung 60 Spannungs-Dehnungsdiagramm des Elastizitätsmoduls

3.12 Statistische Auswertung der Ergebnisse

Für die statistische Auswertung der REM-Bilder, bestehend aus der Borstenendabrundung, der Oberflächenbeschaffenheit sowie der Borstengesamtbeurteilung, wurde ein Friedman-Test zur Analyse durchgeführt, ob sich zentrale Tendenzen der Zahnbürstengruppen bei Messwiederholung zu den verschiedenen Simulationszeitpunkten unterscheiden. Es folgte anschließend der Dunn-Bonferroni Post-hoc-Test, zur Bestimmung welche Simulationszeitpunkte sich signifikant unterscheiden. Das Signifikanzniveau wurde auf $\alpha = 0.05$ festgelegt.

Die Daten zur Oberflächenanalyse des Dentins (Dentinabrasion und Oberflächenrauheit des Dentins) wurden mithilfe des Shapiro-Wilk-Tests auf Normalität geprüft und im Anschluss dem einseitigen ANOVA-Test mit dem Bonferroni Post-hoc-Test unterzogen.

Die Daten der chemischen Elementanalyse wurden nur deskriptiv ausgewertet. Die Daten des Elastizitätsmoduls wurden mit dem Shapiro-Wilk-Test auf Normalität geprüft. Im Anschluss wurden sie dem einseitigen ANOVA-Test mit dem Tamhane's T2 Post-hoc-Test unterzogen. Die statistische Auswertung der Ergebnisse erfolgte mit dem Programm IBM® SPSS Statistics 28.

4. Ergebnisse

4.1 Makroskopischer Zahnbürstenverschleiß

Die frontale und seitliche Fotodokumentation der verschiedenen Zahnbürstenmodelle mit der Spiegelreflexkamera im Neuzustand (0 k Zyklen) sowie während verschiedener Zyklen im Verlauf der Zahnputzsimulation (12,5 k, 25 k, 37,5 k und 50 k Zyklen) macht deutlich, dass keine markanten makroskopischen Veränderungen wie Umbiegen, Abspreizen oder Auffasern der Zahnbürstenborsten stattfinden.

4.1.1 ADA Control Referenzzahnbürste

Die ADA Control Referenzzahnbürste zeigt unbenutzt sowie im Verlauf keine makroskopischen Abnutzungserscheinungen. Die Borstenbüschel bleiben nach der Simulation verschiedener Zyklen aufrecht und parallel. Damit erreicht die Zahnbürste nach Van Leeuwen Score 0 (Abbildung 61).

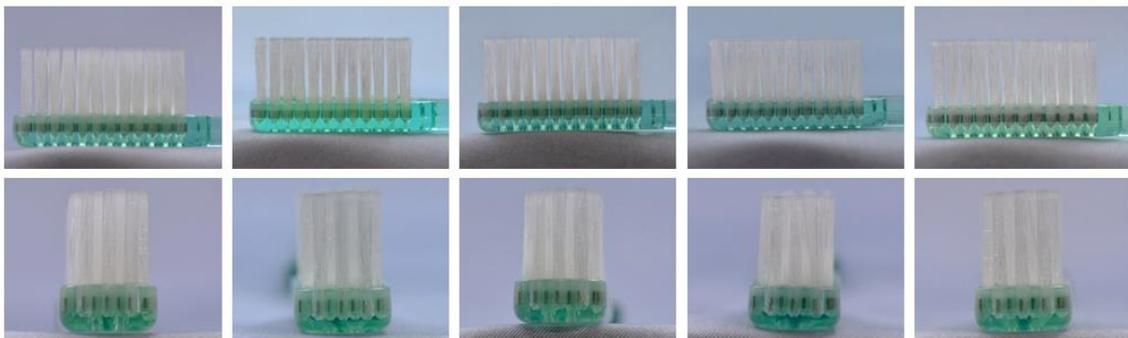


Abbildung 61 Verschleiß der Zahnbürstenborsten ADA Control bei 0 k, 12,5 k, 25 k, 37,5 k und 50 k Zyklen (von links nach rechts) in seitlicher (obere Zeile) und frontaler (untere Zeile) Ansicht: nach allen Intervallen ist keine Abnutzung sichtbar

4.1.2 Alterra

Die Alterra Zahnbürste zeigt wie die ADA Control keine Auffälligkeiten vor und nach ihrer Benutzung. Die Borstenbüschel flachen sich gering ab. Damit erreicht die Zahnbürste nach Van Leeuwen Score 1. Der Bambus des Bürstenkopfes verändert sich trotz Feuchtigkeitsaufnahme durch die Slurrylösung während der Zahnputzsimulation nicht (Abbildung 62).

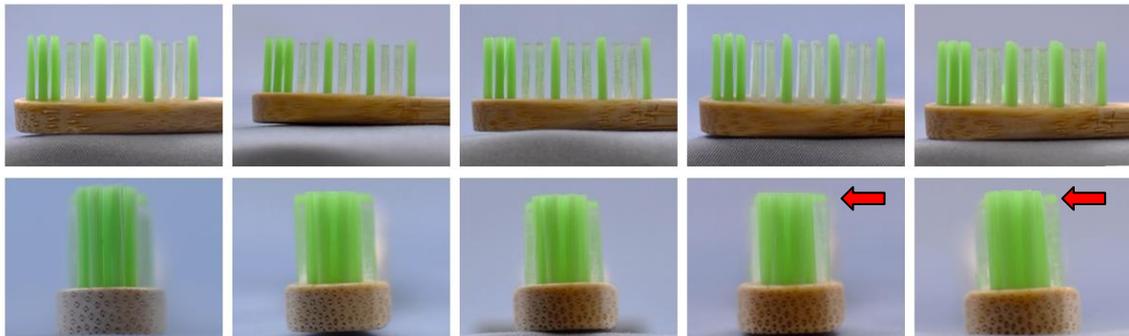


Abbildung 62 Verschleiß der Zahnbürstenborsten Alterra bei 0 k, 12,5 k, 25 k, 37,5 k und 50 k Zyklen (von links nach rechts) in seitlicher (obere Zeile) und frontaler (untere Zeile) Ansicht: nach 37,5 k und 50 k Zyklen ist nur eine leichte Abflachung der Borstenkante sichtbar (Pfeil)

4.1.3 Alverde

Die Alverde Zahnbürste weist makroskopisch im Neuzustand einzelne wenige Filamente auf, die sich leicht zur Seite umbiegen. Im Verlauf der Zahnputzsimulation werden immer wieder einige wenige Filamente gesehen, die sich leicht abspreizen. Lediglich in der frontalen Ansicht wird mit zunehmender Zyklenzahl eine leichte Aufspreizung einzelner Borstenbüschel sichtbar. Damit erreicht die Zahnbürste nach Van Leeuwen Score 1. Das Buchenholz des Bürstenkopfes verändert sich trotz Feuchtigkeitsaufnahme durch die Slurrylösung während der Zahnputzsimulation nicht (Abbildung 63).

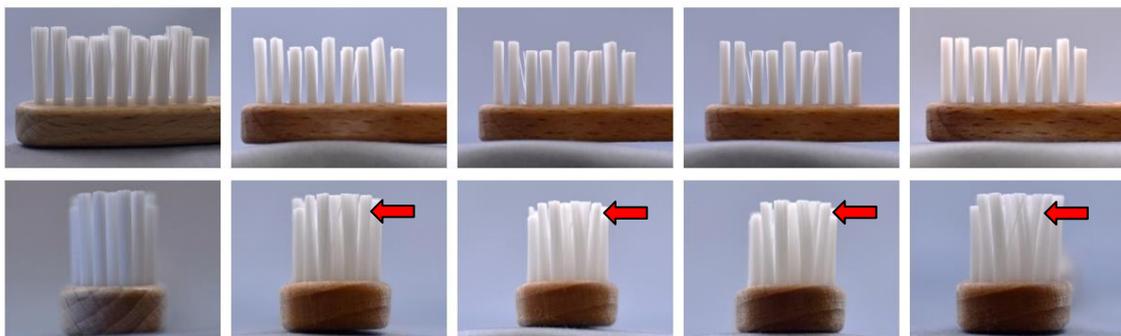


Abbildung 63 Verschleiß der Zahnbürstenborsten Alverde bei 0 k, 12,5 k, 25 k, 37,5 k und 50 k Zyklen (von links nach rechts) in seitlicher (obere Zeile) und frontaler (untere Zeile) Ansicht: nach 12,5 k Zyklen ist eine leichte Aufspreizung der Borsten sichtbar, die mit zunehmender Zyklenzahl stärker wird (Pfeil)

4.1.4 Dr. Best

Die Dr. Best Green Clean Zahnbürste zeigt kleine makroskopische Auffälligkeiten vor und nach der Zahnputzsimulation. In der frontalen Ansicht wird ein leichtes Verbiegen der Borstenbüschel ab 37,5 k Zyklen sichtbar. Damit erreicht die Zahnbürste nach Van Leeuwen Score 1. Die Borstenbüschel bleiben insgesamt jedoch aufrecht und parallel (Abbildung 64).

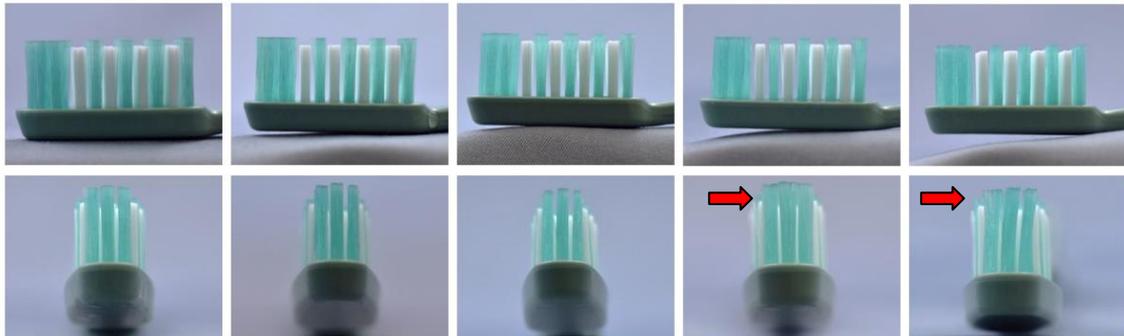


Abbildung 64 Verschleiß der Zahnbürstenborsten Dr. Best bei 0 k, 12,5 k, 25 k, 37,5 k und 50 k Zyklen (von links nach rechts) in seitlicher (obere Zeile) und frontaler (untere Zeile) Ansicht: ab 37,5 k Zyklen werden die Borsten immer mehr seitlich verbogen

4.1.5 Hydrophil

Die Hydrophil Zahnbürste weist makroskopisch im Neuzustand einzelne wenige Filamente auf, die sich leicht zur Seite umbiegen. Lediglich nach der Simulation von 50 k Zyklen scheinen sich alle Borstenbüschel in der seitlichen Ansicht leicht entlang der Putzrichtung (von vorne nach hinten) zu biegen. Während der Zahnputzsimulation bleiben die Borstenbüschel insgesamt jedoch aufrecht und parallel. Der Bambus des Bürstenkopfes verändert sich makroskopisch trotz Feuchtigkeitsaufnahme durch die Slurrylösung während der Zahnputzsimulation nicht (Abbildung 65).

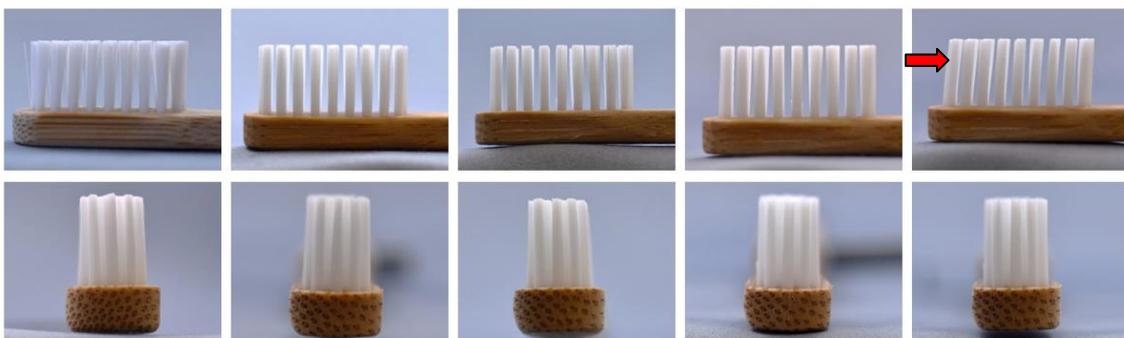


Abbildung 65 Verschleiß der Zahnbürstenborsten Hydrophil bei 0 k, 12,5 k, 25 k, 37,5 k und 50 k Zyklen (von links nach rechts) in seitlicher (obere Zeile) und frontaler (untere Zeile) Ansicht: bei 50 k Zyklen verbiegen sich die Borsten entlang der Putzrichtung und es kommt zu einer Abflachung der Borsten (Pfeil)

4.1.6 Prokudent

Die Prokudent Zahnbürste weist makroskopisch im Neuzustand einzelne sehr wenige Filamente auf, die sich leicht zur Seite umbiegen. Davon sind sowohl parallel stehende Borstenbüschel als auch schräg stehende Borstenbüschel betroffen. Im Verlauf der Zahnputzsimulation werden in der seitlichen Ansicht immer wieder einige wenige Filamente, die sich ganz leicht abspreizen gesehen. Damit erreicht die Zahnbürste nach Van Leeuwen Score 1. In der frontalen Ansicht zeigt sich ab einer Putzdauer von 25 k Zyklen ein leichtes Aufspreizen der Borstenbüschel. Insgesamt bleiben jedoch auch hier die Borstenbüschel aufrecht und parallel (Abbildung 66).

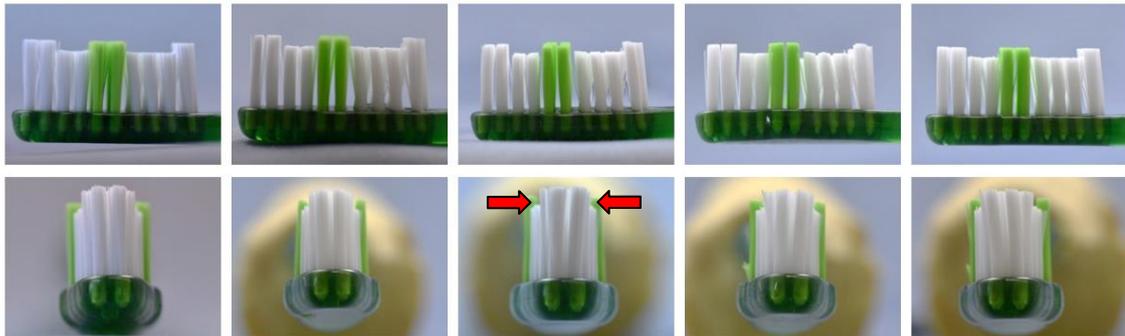
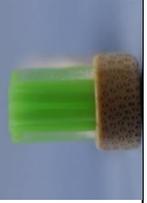
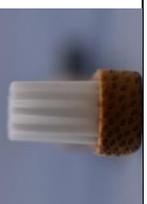
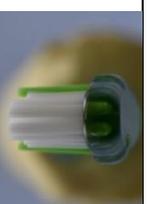
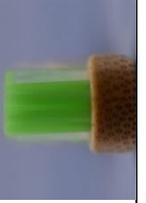
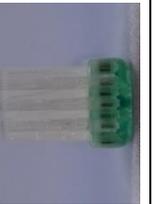
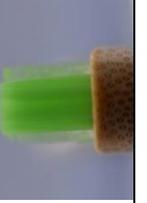


Abbildung 66 Verschleiß der Zahnbürstenborsten Prokudent bei 0 k, 12,5 k, 25 k, 37,5 k und 50 k Zyklen (von links nach rechts) in seitlicher (obere Zeile) und frontaler (untere Zeile) Ansicht: ab 25 k Zyklen spreizen sich zunehmend Borsten ab (Pfeil)

Tabelle 4 Makroskopischer Überblick der Zahnbürsten nach allen Simulationszeitpunkten und Bewertung des Zahnbürstenverschleißes nach dem Conforti-Index modifiziert nach Van Leeuwen [128]

	<u>ADA Control</u>	<u>Alterra</u>	<u>Alverde</u>	<u>Dr. Best</u>	<u>Hydrophil</u>	<u>Prokudent</u>
0 k						
12,5 k						
25 k						
37,5 k						
50 k						
Conforti-Index Van Leeuwen	0	1	1	1	1	1

4.2 Mikroskopische Borstenqualität

4.2.1 Borstenendabrundung

Während die Zahnbürsten von ADA Control, Dr. Best und Prokudent konstant auf einem hohen Niveau akzeptabler Borstenendabrundung bleiben, variiert, bzw. sinkt der Anteil akzeptabler Borstenendabrundung bei den Zahnbürsten von Alterra und Alverde zu den verschiedenen Simulationszeitpunkten.

Die Zahnbürsten von ADA Control und Dr. Best zeigten bei 100% der Borsten akzeptable Borstenendabrundungen. Auch die Zahnbürsten von Prokudent (96%), Alverde (87%), Alterra (82%) und Hydrophil (73%) erreichten hohe Anteile akzeptabler Borstenendabrundungen (Tabelle 5; Abbildung 67).

Die Borstenendabrundung aller untersuchten Zahnbürsten änderte sich, außer bei den Zahnbürsten von Alverde, im Verlauf der Simulationszeitpunkte nicht signifikant.

Bei Alverde liegen im Friedman-Test Unterschiede zwischen den Messzeitpunkten vor ($p = 0,002$), im paarweisen Vergleich des Dunn-Bonferroni Post-hoc-Tests gibt es jedoch keine signifikanten Unterschiede zwischen den unterschiedlichen Zeitpunkten ($p > 0.05$). Bei allen anderen Zahnbürsten gab es keinen signifikanten Unterschied (Tabelle 5).

Tabelle 5 Borstenendabrundung der verschiedenen Zahnbürsten: Anzahl (n) akzeptabel endgerundeter Borsten an den verschiedenen Simulationszeitpunkten (0 k, 12,5 k, 25 k, 37,5 k und 50 k Zyklen)

Zyklen Zahnbürste	0 k (n)	12,5 k (n)	25 k (n)	37,5 k (n)	50 k (n)	\sum Akzeptable Borsten (%)	p - Wert*
ADA Control	9	9	9	9	9	100,0	1,000
Alterra	9	7	8	8	5	82,2	0,132
Alverde	9	9	9	8	4	86,7	0,002 ^(a)
Dr. Best	9	9	9	9	9	100,0	1,000
Hydrophil	6	6	5	8	8	73,3	0,406
Prokudent	9	9	9	8	8	95,6	0,406

*Signifikanzniveau liegt bei $\alpha = 0,05$
(a) Keine signifikanten Unterschiede zwischen den Zeitpunkten ($p > 0.05$)

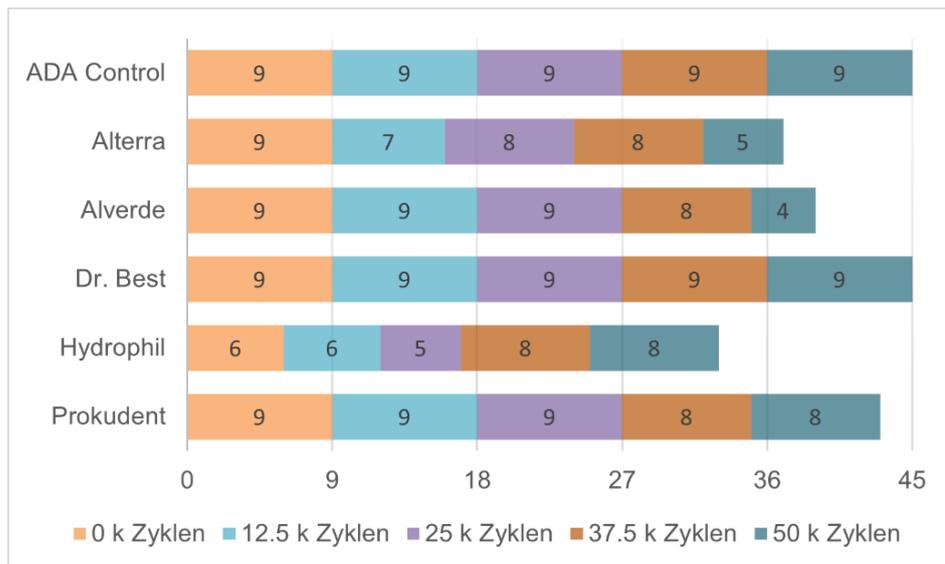


Abbildung 67 Balkendiagramm: Anzahl der Borsten mit akzeptabler Endabrundung während der verschiedenen Simulationszeitpunkte (0 k, 12,5 k, 25 k, 37,5 k und 50 k Zyklen)

4.2.2 Borstenoberflächenbeschaffenheit

Die Zahnbürsten, bis auf Hydrophil, waren während aller Simulationszeitpunkte in ihren Borstenoberflächen akzeptabel.

Während die Zahnbürsten ADA Control, Alterra, Prokudent mit 100% und Alverde mit 98% aller untersuchten Borsten eine gute Qualität aufwiesen, konnte Hydrophil mit lediglich 71% akzeptabler Borstenoberflächen zu allen Simulationszeitpunkten die Untersuchung bestehen (Tabelle 6, Abbildung 68).

Die Borstenoberfläche war bei der Zahnbürste von Hydrophil in der Ausgangssituation sowie nach 12,5 k Zyklen inakzeptabel und unterschied sich von den anderen Zyklen signifikant ($p < 0.001$) (Tabelle 6).

Tabelle 6 Borstenoberflächenbeschaffenheit der verschiedenen Zahnbürsten: Anzahl (n) der akzeptablen Borsten an den verschiedenen Simulationszeitpunkten (0 k, 12,5 k, 25 k, 37,5 k und 50 k Zyklen)

Zyklus Zahnbürste	0 k (n)	12,5 k (n)	25 k (n)	37,5 k (n)	50 k (n)	\sum Akzeptable Borsten (%)	p - Wert*
ADA Control	9	9	9	9	9	100	1,000
Alterra	9	9	9	9	9	100	1,000
Alverde	9	9	9	9	8	97,7	0,406
Dr. Best	9	9	9	9	9	100	1,000
Hydrophil	3	2	9	9	9	71,1	<0,001 ^(a)
Prokudent	9	9	9	9	9	100	1,000

*Signifikanzniveau liegt bei $\alpha = 0,05$

(a) Hydrophil mit signifikanten Unterschieden zwischen den Zeitpunkten ($p > 0,05$):

0 k – 25 k, 37,5 k, 50 k

12,5 k – 25 k, 37,5 k, 50 k

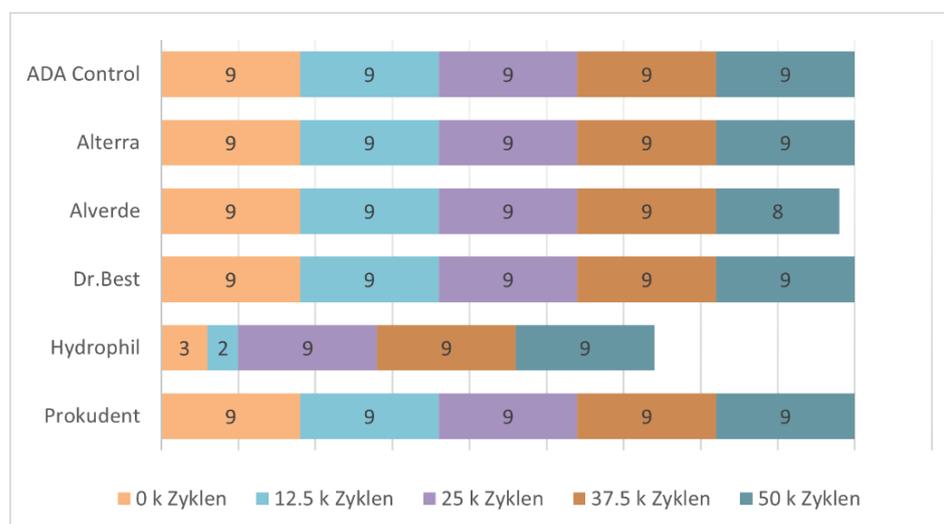


Abbildung 68 Balkendiagramm: Anzahl der Borsten mit akzeptabler Oberflächenbeschaffenheit während der verschiedenen Simulationszeitpunkte (0 k, 12,5 k, 25 k, 37,5 k und 50 k Zyklen)

4.2.3 Borstengesamtbeurteilung

Die Borstengesamtbeurteilung, die sich aus Borstenendabrundung und Borstenoberfläche zusammensetzt, hat in dieser Untersuchung gezeigt, dass diese Kriterien bei den meisten Zahnbürsten akzeptabel waren (ADA 100%, Dr. Best 100%, Prokudent 96%, Alverde 84%, Alterra 82%). Lediglich die Zahnbürste von Hydrophil (51%) erreichte nur bei der Hälfte aller untersuchten Borsten eine akzeptable Borstengesamtbeurteilung (Tabelle 7, Abbildung 69).

Signifikante Unterschiede zwischen den Zeitpunkten gab es bei Alverde im Vergleich zu 50 k Zyklen ($p < 0.001$). Bei Hydrophil war die akzeptable Borstengesamtbeurteilung in der Ausgangssituation, nach 12,5 k und 25 k Zyklen geringer als zu den späteren Zeitpunkten ($p < 0.001$) (Tabelle 7).

Tabelle 7 Borstengesamtbeurteilung der verschiedenen Zahnbürsten: Anzahl (n) insgesamt bestandener Borsten (alle bestandenen Borsten für die Borstenendabrundung und die Oberflächenbeschaffenheit gesamt) an den verschiedenen Simulationszeitpunkten (0 k, 12,5 k, 25 k, 37,5 k und 50 k Zyklen)

Zyklen Zahnbürste	0 k (n)	12,5 k (n)	25 k (n)	37,5 k (n)	50 k (n)	Σ Bestandene Borsten (%)	p-Wert*
ADA	9	9	9	9	9	100,0	1,000
Control	9	9	9	9	9	100,0	1,000
Alterra	9	7	8	8	5	82,2	0,132
Alverde	9	9	9	8	3	84,4	0,001 ^(a)
Dr. Best	9	9	9	9	9	100,0	1,000
Hydrophil	0	2	5	8	8	51,1	0,001 ^(b)
Prokudent	9	9	9	8	8	95,6	0,406

*Signifikanzniveau liegt bei 0,05

Signifikante Unterschiede zwischen den Zeitpunkten ($p > 0.05$):

(a) 50 k – 0 k, 12,5 k, 25 k

(b) 0 k – 37,5 k, 50 k
12,5 k – 37,5 k, 50 k

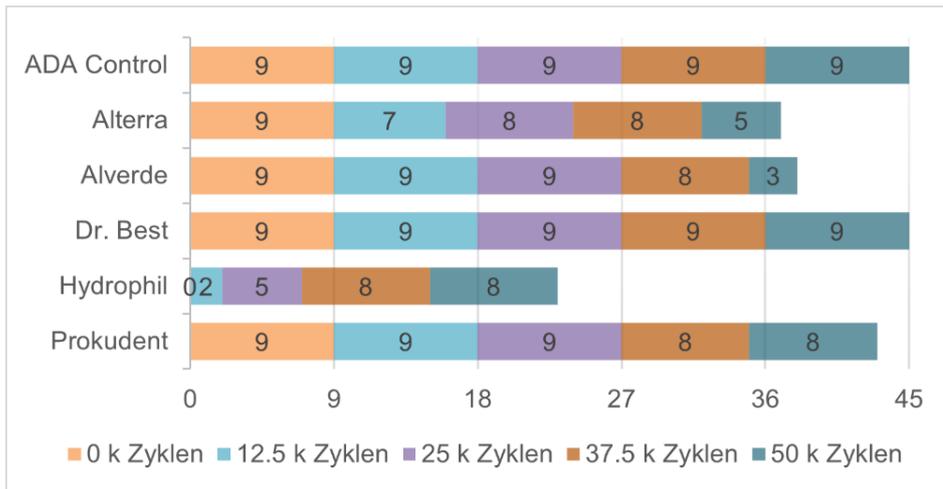


Abbildung 69 Balkendiagramm zur Borstengesamtbeurteilung (\sum akzeptable Borstenendabrundung & akzeptable Borstenoberflächenbeschaffenheit) während der verschiedenen Simulationszeitpunkte (0 k, 12,5 k, 25 k, 37,5 k und 50 k Zyklen)

4.2.4 Mikroskopische Aufnahmen der Zahnbürstenborsten

Exemplarische Darstellung der Zahnbürstenborsten REM-Aufnahmen für die Bewertung der Borstenendabrundung und Borstenoberflächenbeschaffenheit nach 0 k, 12,5 k, 25 k, 37,5 k und 50 k Zyklen in 50-facher Vergrößerung:

Tabelle 8 Bemerkungen für die Zahnbürstenborsten aus den REM-Aufnahmen

Zahnbürste	Bemerkungen für die Zahnbürstenborsten aus den REM-Aufnahmen
ADA Control	Borstenoberfläche und Borstenendabrundung akzeptabel über den gesamten Simulationszeitraum
Alterra	Borstenendabrundung vorwiegend akzeptabel; Borstenoberfläche durchgehend akzeptabel
Alverde	Borstenendabrundung bei 50 k Zyklen inakzeptabel, sonst vorwiegend akzeptabel; Borstenoberfläche vorwiegend akzeptabel
Dr. Best	Borstenoberfläche und Borstenendabrundung akzeptabel über den gesamten Simulationszeitraum
Hydrophil	Borstenendabrundung nur teilweise akzeptabel; Borstenoberfläche bei 0 k und 12,5 k Zyklen unakzeptabel
Prokudent	Borstenendabrundung und Borstenoberfläche akzeptabel über den gesamten Simulationszeitraum

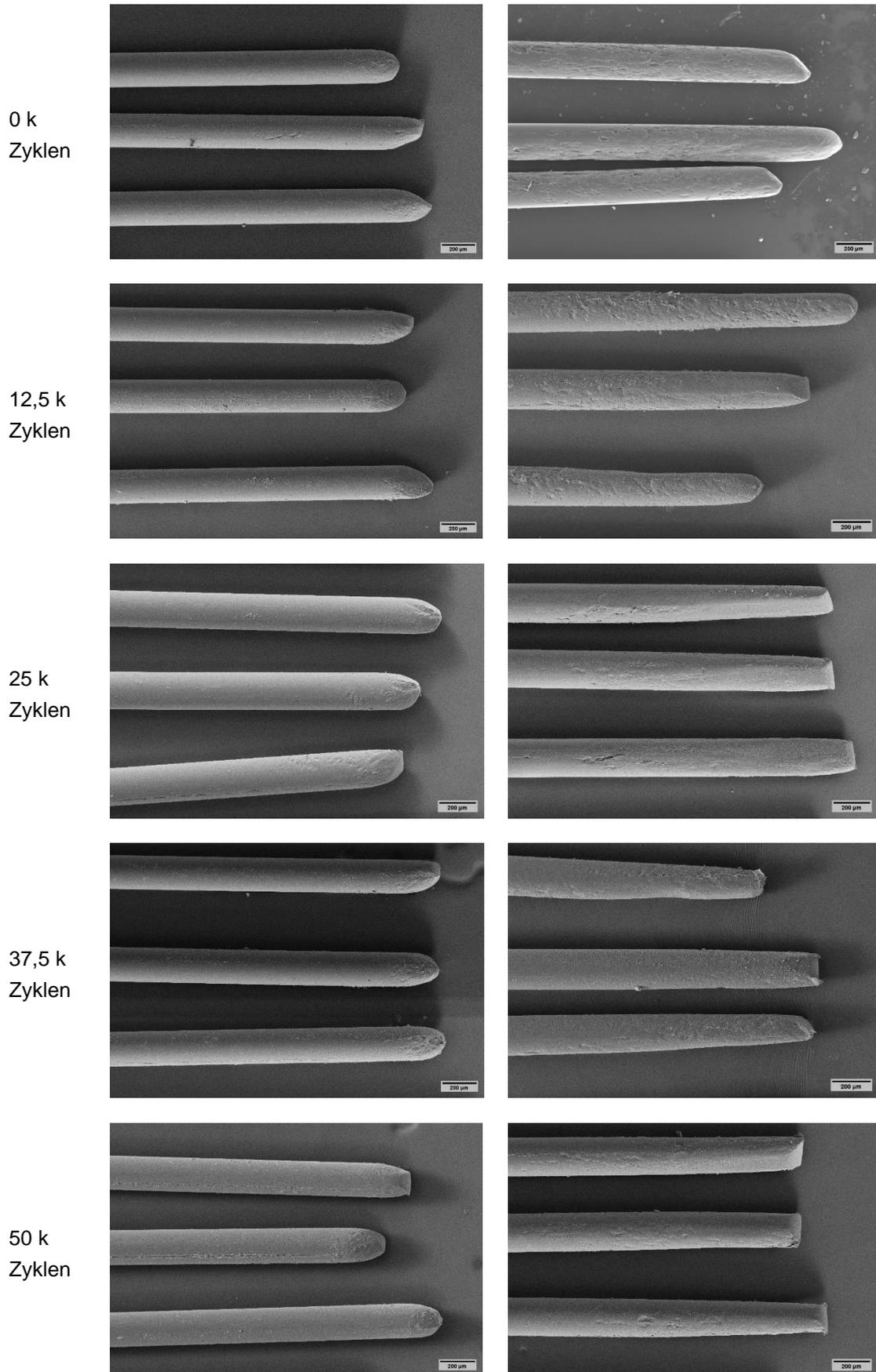
ADA ControlAlterra

Abbildung 70 Mikroskopische Aufnahmen (200 µm) von Zahnbürstenborsten ADA Control (links) und Alterra (rechts) nach verschiedenen Zyklen

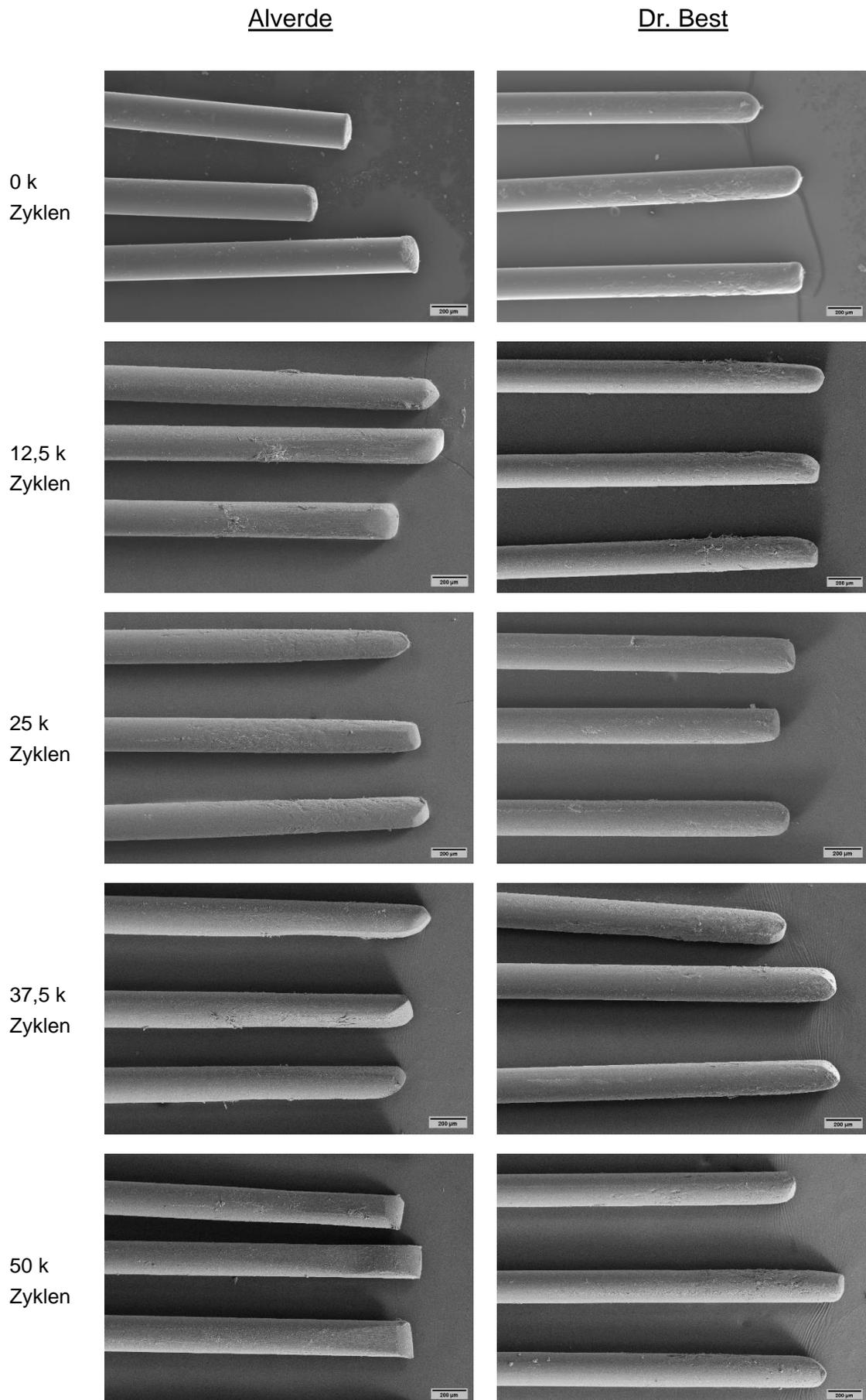


Abbildung 71 Mikroskopische Aufnahmen (200 μm) von Zahnbürstenborsten Alverde (links) und Dr. Best (rechts) nach verschiedenen Zyklen

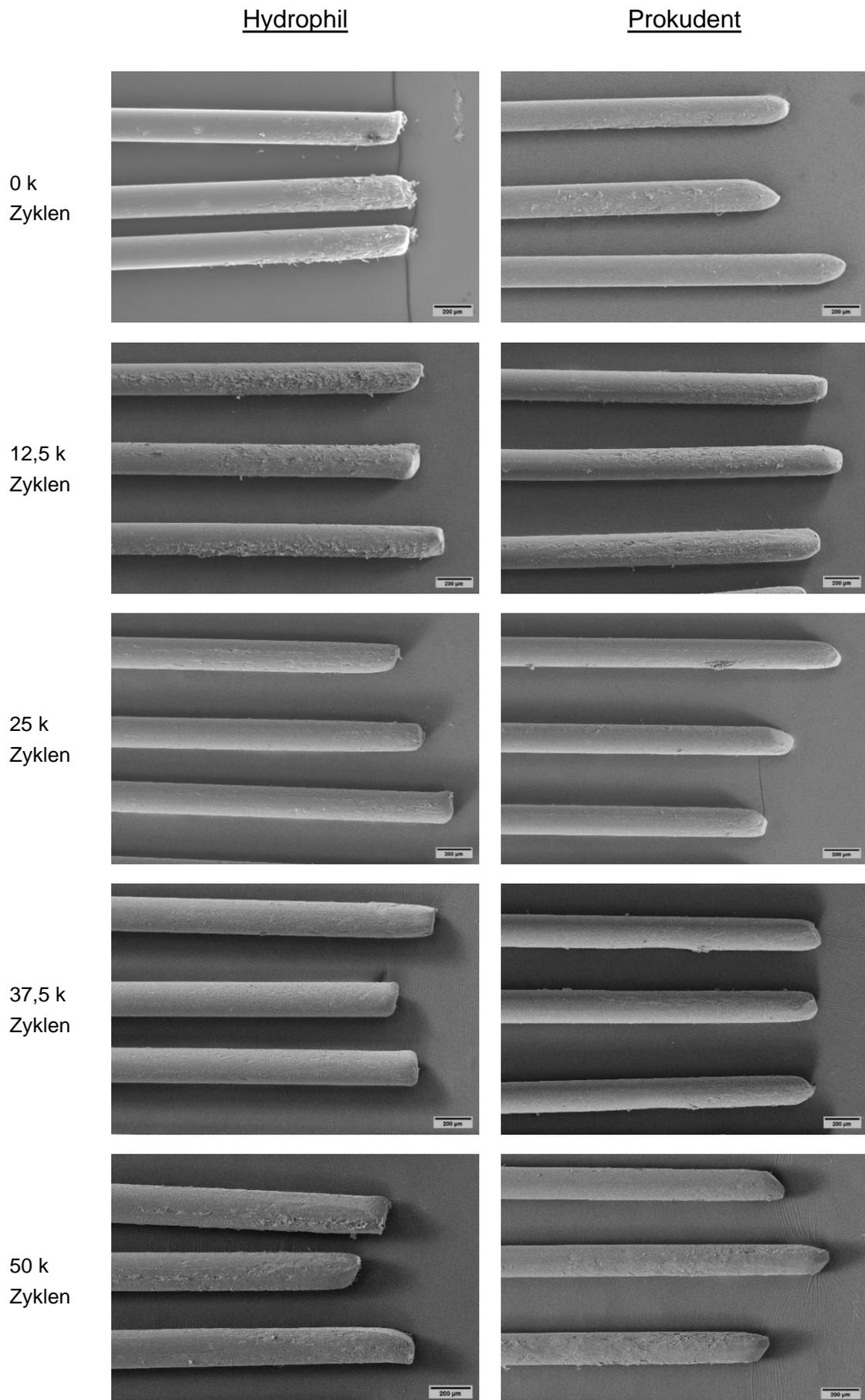


Abbildung 72 Mikroskopische Aufnahmen (200 µm) von Zahnbürstenborsten Hydrophil (links) und Prokudent (rechts) nach verschiedenen Zyklen

4.3 Micro-Computertomographische Untersuchung

Die Borsten der Zahnbürsten sowie die Borstenkonfiguration waren in den Micro-CT Aufnahmen gut zu visualisieren. Im 2-dimensionalen (2D) sowie im 3-dimensionalen (3D) Vergleich gab es bei allen Zahnbürsten kaum Unterschiede.

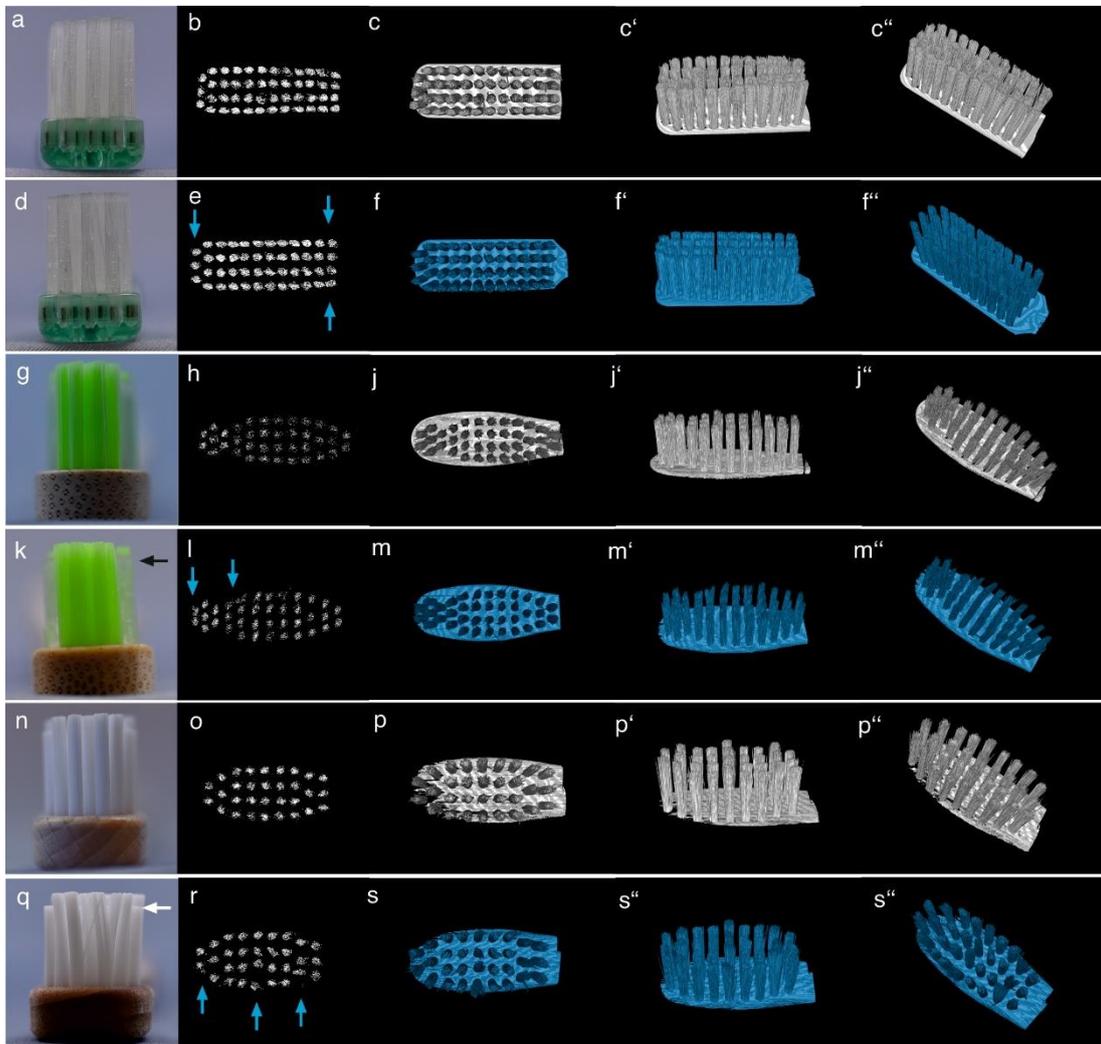


Abbildung 73 Makroskopische Aufnahmen (erste Spalte) und microcomputertomographische Aufnahmen in 2D Borstenoberfläche (zweite Spalte) und 3D (restliche Spalten) der verschiedenen Zahnbürstenköpfe nach 0 k und 50 k Zyklen: (a) – (c)'' ADA Control 0 k Zyklen, (d) – (f)'' ADA Control 50 k Zyklen bei der Borstenoberfläche leichte Deformierung der Borstenbüschel im vorderen und hinteren Bereich sichtbar, (g) – (j)'' Alterra 0 k Zyklen, (k) – (m)'' Alterra 50 k Zyklen bei der Borstenoberfläche leichte Deformierung der Borstenbüschel im vorderen Bereich sichtbar, (n) – (p)'' Alverde 0 k Zyklen, (q) – (s)'' Alterra 50 k Zyklen bei der Borstenoberfläche Deformierung der Borstenbüschel sichtbar

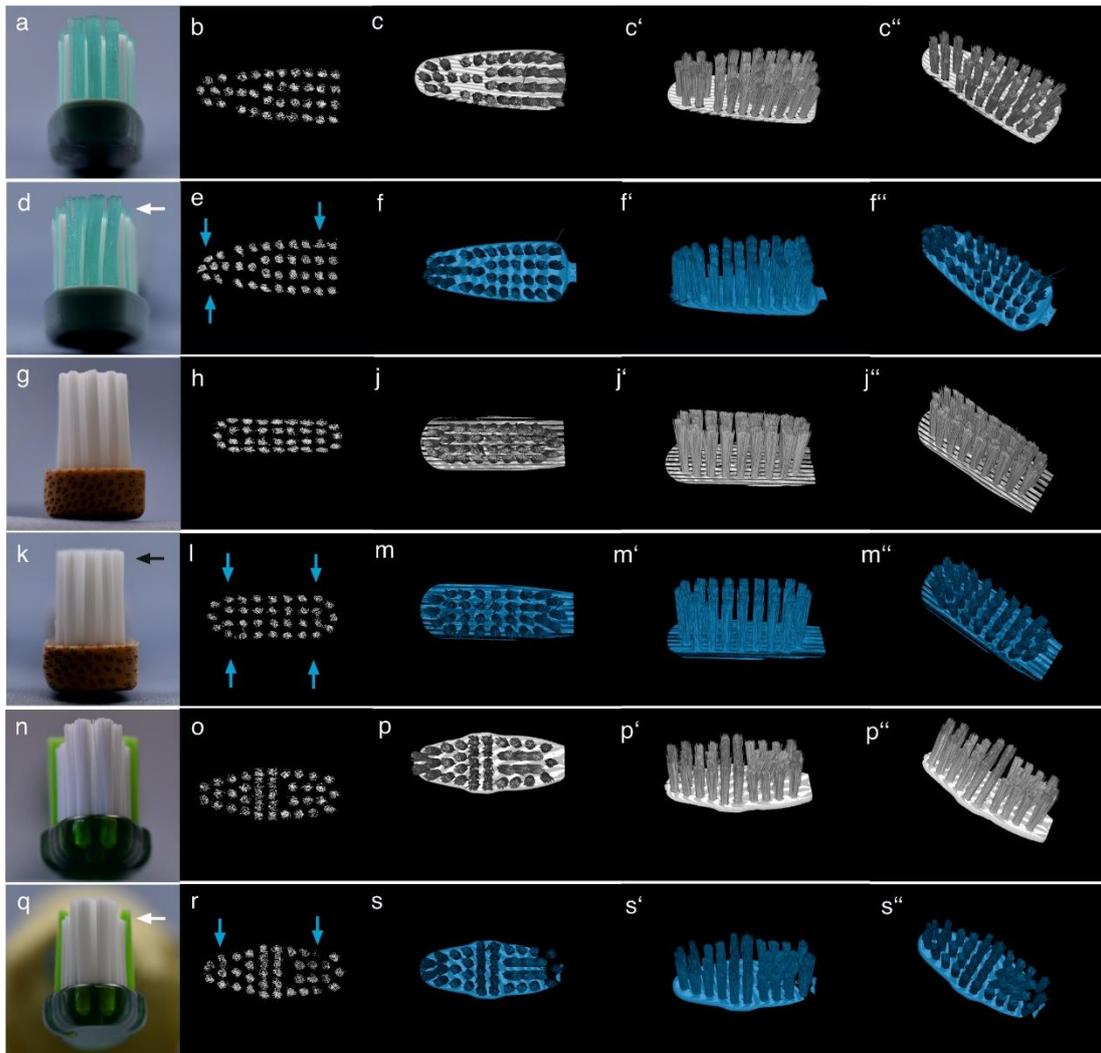


Abbildung 74 Makroskopische Aufnahmen (erste Spalte) und microcomputertomographische Aufnahmen in 2D Borstenoberfläche (zweite Spalte) und 3D (restliche Spalten) der verschiedenen Zahnbürstenköpfe nach 0 k und 50 k Zyklen: (a) – (c)'' Dr. Best 0 k Zyklen, (d) – (f)'' Dr. Best 50 k Zyklen bei der Borstenoberfläche leichte Deformierung der Borstenbüschel im vorderen und hinteren Bereich sichtbar, (g) – (j)'' Hydrophil 0 k Zyklen, (k) – (m)'' Hydrophil 50 k Zyklen bei der Borstenoberfläche leichte Deformierung der Borstenbüschel im vorderen und hinteren Bereich sichtbar, (n) – (p)'' Prokudent 0 k Zyklen, (q) – (s)'' Prokudent 50 k Zyklen bei der Borstenoberfläche leichte Deformierung der Borstenbüschel im vorderen und hinteren Bereich sichtbar

4.4 Oberflächenanalyse des Dentins

4.4.1 Quantifizierung der Dentinabrasion

Die Mittelwerte und 2,5%-Quantile zum vertikalen Verschleiß bilden negative Zahlen, da diese im Verhältnis zu einer Ausgleichsebene berechnet wurden [319].

Die Mittelwerte liegen bei $-60,1 - (-95,4)$ μm und die 2,5%-Quantile bei $-140,6 - (-147,9)$ μm . Den stärksten Verschleiß während der Zahnputzsimulation ergaben die Zahnbürsten von Alterra mit $-95,4 (\pm 22,8)$ μm , dicht gefolgt von den Dr. Best Green Clean Zahnbürsten mit $-92,6 (\pm 29,8)$ μm . Einen im Verhältnis zu den anderen Zahnbürsten mittleren vertikalen Abtrag zeigten die Zahnbürsten von Hydrophil mit $80,0 (\pm 27,0)$ μm . Die Verschleißwerte der Zahnbürsten ADA Control als Referenzzahnbürste mit $69,7 (\pm 17,1)$ μm sowie Prokudent mit $69,6 (\pm 23,2)$ μm waren sehr ähnlich. Die geringste Abrasion hatten die Zahnbürsten von Alverde mit $60,1 (\pm 27,9)$ μm (Tabelle 9).

Die Untersuchung zur Quantifizierung der Dentinabrasion war normalverteilt ($p < 0,05$), weshalb die Daten im Anschluss dem einseitigen ANOVA-Test unterzogen wurden. Hier waren die Ergebnisse nicht signifikant ($p = 0,044$).

Tabelle 9 Werte der Dentinabrasion [μm] durch die verschiedenen Zahnbürstenmodelle nach 50 k Zyklen Zahnputzsimulation: Mittelwerte und Standardabweichung (SD), 2,5% Quantile und Median

Zahnbürste	Mittelwert \pm SD [μm]	Quantil (2,5%) [μm]	Median [μm]
ADA Control	$-69,7 \pm 17,1$	$-112,7$	$-70,2$
Alterra	$-95,4 \pm 22,8$	$-140,6$	$-99,6$
Alverde	$-60,1 \pm 27,9$	$-99,0$	$-58,6$
Dr. Best	$-92,6 \pm 29,8$	$-147,9$	$-91,5$
Hydrophil	$-80,0 \pm 27,0$	$-116,1$	$-82,3$
Prokudent	$-69,6 \pm 23,2$	$-103,7$	$-69,7$

4.4.2 Oberflächenrauheit des Dentins

Die Dentin Rauheit S_a betrug im Simulations-, und im Referenzbereich 3,4 - 3,8 μm (HYD-ALT) und die Daten für S_z betrug 28,9 – 29,4 μm (DRB-ADA). Die Werte für S_a ($F = 0,964$; $Df = 11, 84$; $p = 0,485$) und S_z ($F = 1,226$; $Df = 11, 84$; $p = 0,283$) wiesen keine signifikanten Unterschiede zwischen den Gruppen und den Bereichen auf (Tabelle 10).

Tabelle 10 Mittelwerte und Standardabweichung (SD) der Oberflächenrauheit des Dentins [μm]: Mittlere arithmetische Höhe S_a und maximale Höhe S_z

Zahnbürste	Oberflächenposition*	Mittelwert $S_a \pm SD$ [μm]	Mittelwert $S_z \pm SD$ [μm]
ADA Control	Mitte	3,5 \pm 0,2	29,4 \pm 0,3
	Seite	3,6 \pm 0,4	29,0 \pm 0,4
Alterra	Mitte	3,8 \pm 0,5	29,1 \pm 0,3
	Seite	3,8 \pm 0,3	29,1 \pm 0,4
Alverde	Mitte	3,4 \pm 0,4	29,2 \pm 0,3
	Seite	3,5 \pm 0,3	29,2 \pm 0,2
Dr. Best	Mitte	3,7 \pm 0,4	29,1 \pm 0,2
	Seite	3,6 \pm 0,5	28,9 \pm 0,6
Hydrophil	Mitte	3,6 \pm 0,3	29,1 \pm 0,3
	Seite	3,4 \pm 0,4	29,2 \pm 0,2
Prokudent	Mitte	3,5 \pm 0,3	29,0 \pm 0,4
	Seite	3,5 \pm 0,3	29,1 \pm 0,2
*Oberflächenposition:			
Mitte: Bereich der Bürstbewegung, exponierte Dentinoberfläche			
Seite: Referenzbereich, ungebürstete geschützte Dentinoberfläche			

4.5 Chemische Elementaranalyse

Bei der chemischen Elementaranalyse wurde für alle untersuchten Borsten der Zahnbürstenmodelle in Übereinstimmung mit der Kontrollzahnbürste ADA Control eine ähnliche Zusammensetzung der Elemente festgestellt. Diese bestand jeweils aus Kohlenstoff, Stickstoff und Sauerstoff.

Die Massenanteile für alle sechs untersuchten Zahnbürsten lagen für Kohlenstoff bei 54,6 - 62,7%, für Stickstoff bei 19,4 - 24,3% und für Sauerstoff bei 16,0 - 21,1%. Der Prozentsatz des atomaren Gewichts, befindet sich für Kohlenstoff bei 59,8 - 67,6%, für Stickstoff bei 17,2 - 22,8% und für Sauerstoff bei 14,0 - 17,3%. (Tabelle 11).

Tabelle 11 Mittelwerte und Standardabweichung (SD) der prozentualen Elementverteilung der Zahnbürstenborsten

Zahn- bürste	Borsten- farbe	Kohlenstoff C [%]		Stickstoff N [%]		Sauerstoff O [%]	
		Wt ± SD	At ± SD	Wt ± SD	At ± SD	Wt ± SD	At ± SD
ADA Control	einfarbig	54,6 ± 0,5	59,8 ± 0,5	24,3 ± 0,4	22,8 ± 0,4	21,1 ± 0,4	17,3 ± 0,4
Alterra	grün	61,9 ± 1,0	66,8 ± 1,0	20,6 ± 0,9	19,1 ± 0,8	17,5 ± 0,3	14,2 ± 0,3
	weiß	61,0 ± 2,5	67,2 ± 0,2	19,6 ± 1,2	18,5 ± 0,6	17,0 ± 1,0	14,0 ± 0,7
Alverde	einfarbig	62,3 ± 1,3	67,1 ± 1,2	20,6 ± 0,9	19,0 ± 0,8	17,1 ± 0,7	13,8 ± 0,6
Dr. Best	grün	57,9 ± 0,6	63,0 ± 0,6	22,7 ± 0,3	21,2 ± 0,3	19,4 ± 0,5	15,9 ± 0,4
	weiß	65,3 ± 1,3	69,9 ± 1,2	18,7 ± 1,0	17,2 ± 1,0	16,0 ± 0,3	12,9 ± 0,3
Hydrophil	einfarbig	58,9 ± 0,5	64,1 ± 0,3	20,3 ± 1,4	18,9 ± 1,4	20,8 ± 1,9	17,0 ± 1,6
Prokudent	grün	62,7 ± 0,8	67,6 ± 0,7	19,4 ± 0,2	17,9 ± 0,2	18,0 ± 0,9	14,5 ± 0,8
	weiß	59,7 ± 1,6	64,7 ± 1,5	21,3 ± 0,6	19,8 ± 0,6	19,0 ± 1,2	15,5 ± 1,0

Die Gleichverteilung der Elemente in den untersuchten Borstenmaterialien wird in den Spektren-
diagrammen grafisch verdeutlicht (Abbildung 75).

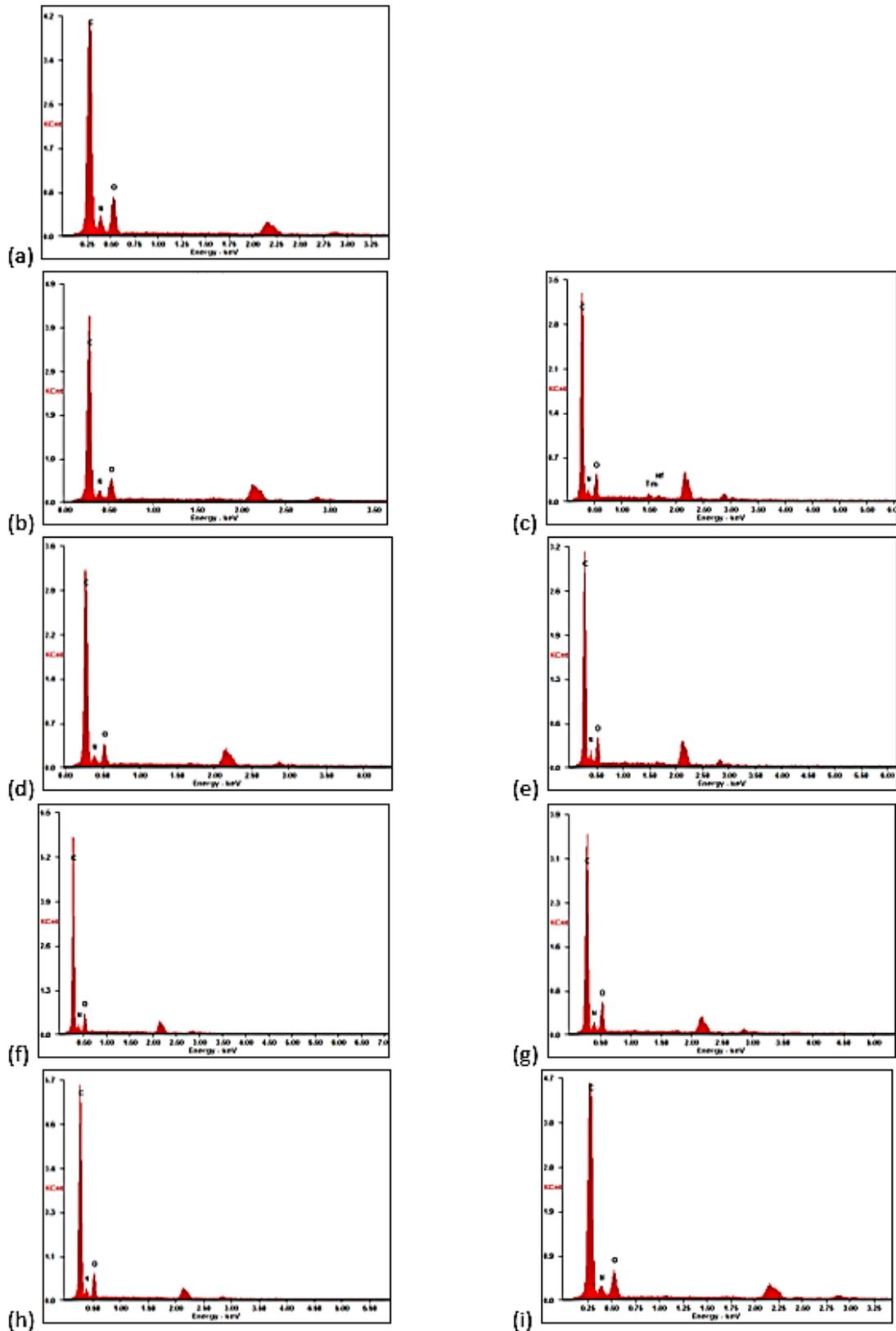


Abbildung 75 Spektrendiagramme zur Elementverteilung der Zahnbürstenfilamente in weiß und/oder grün: (a) ADA Control, (b) Alterra grün, (c) Alterra weiß, (d) Alverde, (e) Dr. Best grün, (f) Dr. Best weiß, (g) Hydrophil, (h) Prokudent grün, (i) Prokudent weiß

4.6 Elastizitätsmodul

Die Daten des Elastizitätsmoduls lagen für alle untersuchten Zahnbürstenmodelle zwischen 1,14 GPa bei den weißen Zahnbürstenborsten Prokudent und 1,81 GPa bei den weißen Zahnbürstenborsten Alterra. Die Kontrollzahnbürste von ADA hatte einen Wert von 1,55 GPa.

Die Daten waren normalverteilt. Nur in zwei Gruppen (Alterra grün, Dr. Best weiß) gab es keine Normalverteilung ($p < 0,05$), aber der ANOVA-Test ist robust gegenüber Abweichungen von der Normalität [320]. Der ANOVA-Test war im Post-hoc Tamhane's T2 Test signifikant ($F=31,746$; $Df=8, 261$; $p < 0.001$). Die signifikanten Unterschiede sind in der Tabelle dargestellt (Tabelle 12).

Tabelle 12 Mittelwerte und Standardabweichung (SD) des Elastizitätsmoduls [GPa] der Zahnbürstenborsten

Zahnbürstenfilament	Elastizitätsmodul \pm [GPa]	Signifikanzen*
ADA Control	1,55 \pm 0,13	(a, b, e)
Alterra weiß	1,81 \pm 0,28	(c, e)
Alterra grün	1,45 \pm 0,24	(a, b, d)
Alverde	1,47 \pm 0,19	(a, b, d)
Dr. Best weiß	1,40 \pm 0,12	(a, b, d)
Dr. Best grün	1,45 \pm 0,13	(b, d)
Hydrophil	1,43 \pm 0,13	(b, d)
Prokudent weiß	1,63 \pm 0,16	(f)
Prokudent grün	1,14 \pm 0,13	(a, c, e)
*Gleiche Buchstaben entsprechen einer homogenen Untergruppe, unterschiedliche Buchstaben zeigen einen signifikanten Unterschied zwischen den Untergruppen		

5. Diskussion

5.1 Borstenverschleiß und Bewertung der DIN 20126

Die hemisphärische Borstenendabrundung ist eine sehr wichtige Anforderung an eine Zahnbürste, welche schon in den 1940er Jahren gefordert wurde. Ziel war es Läsionen des oralen Gewebes zu minimieren [87]. Breitenmoser et al. entdeckten, dass abgerundete Borstenenden im Gegensatz zu abgeschnittenen scharfkantigen Borstenenden 30% weniger gingivale Verletzungen verursachen [295]. Dieser Parameter ist auch heute eine wichtige Eigenschaft für eine Zahnbürste und ist Teil der „DIN EN ISO 20126“. Viele Hersteller behaupten auf den Verpackungen von Zahnbürsten, dass deren Produkte endabgerundete Borsten besitzen (Abbildung 78). Doch genau dieser vermeintliche Standard sollte zur Sicherheit des Verbrauchers regelmäßig überprüft werden.

In dieser Untersuchung wurden die Borstenqualitäten der untersuchten Zahnbürstenmodelle vor und im Verlauf der Zahnputzsimulation mithilfe von Fotos, REM-Aufnahmen und Microcomputertomographischen Aufnahmen dokumentiert und ausgewertet. Die Zahnputzsimulation der Zahnbürsten mit Borsten aus Rizinusöl zeigte makroskopisch bei allen Zahnbürsten kaum oder nur eine geringe Abnutzung, Abflachung oder Spreizung der Borsten.

Diese Abnutzung würde nach dem Schema von Van Leeuwen et al. bezüglich der Abnutzung der Borsten Score 1 (Skala Score 0 – Score 4) entsprechen, der die Unversehrtheit der meisten inneren Borsten einer Zahnbürste und lediglich ein leichtes Spreizen der äußeren Borsten einer Zahnbürste bedeutet. Van Leeuwen et al. bewerten es für wichtiger nicht die Zahnbürste anhand ihres Alters, etwa nach 3 Monaten, auszuwechseln, sondern den Grad der Abnutzung der Borsten als Kriterium zu wählen. So wird vorgeschlagen die Zahnbürste auszuwechseln sobald sich die Borsten permanent krümmen oder abspreizen [105].

Die REM-Ergebnisse zur Borstenendabrundung zeigten, dass bei allen untersuchten Zahnbürstenmodellen mindestens 73% der Borsten die Prüfung bestanden. Diese Werte zeigen ein zufriedenstellendes Ergebnis der Zahnbürsten für die Endabrundung. In früher durchgeführten Studien variierte der Anteil akzeptabel endabgerundeter Borsten zwischen verschiedenen Zahnbürsten stark. Der Prozentanteil war insgesamt meistens deutlich niedriger als in der durchgeführten Untersuchung [163-165, 168, 174]. Jedoch beziehen sich mehrere Untersuchungen nicht auf den deutschen Markt und lassen daher nur bedingt Vergleiche zu. Bei einigen Studien wurden insgesamt ebenfalls gute Qualitäten der Borstenendabrundung festgestellt [172, 173, 252]. Meyer-Lueckel et al. erzielten beispielsweise in ihrer Studie von 2005 Ergebnisse, bei denen 13 von insgesamt 15 elektrischen Zahnbürstenmodellen eine akzeptable Borstenendabrundung mit mindestens 76% erreichten [172]. Ähnliche Ergebnisse finden sich auch in der hier vorliegenden Untersuchung, wie bei der Zahnbürste Hydrophil.

Die Voraussetzung für abgerundete Borsten einer Zahnbürste scheint ein geeignetes Abrundungsverfahren darzustellen und wird von der DIN Norm 20126 als eine gute Qualität festgelegt. Verschiedene Verfahren haben sich im Laufe der Jahrzehnte etabliert.

Nach dem Abschneiden oder Abrasieren der Borsten auf die gewünschte Länge entstehen Kanten an den Borstenenden. Diese werden dann entweder mechanisch oder thermisch bearbeitet, sodass endabgerundete Borsten entstehen. Die mechanische Modifikation der Borsten ist eine häufig verwendete Methode [321]. Sie erfolgt für gewöhnlich mit mehreren frei drehbaren Schleifern, die einseitig beispielsweise mit Schleifmitteln oder Diamant beschichtet sind und deren kombinierte Bewegung das gewünschte Borstenprofil erzeugen [322]. Bei einem weiteren Verfahren schmilzt das Borstenende mittels Wärmebehandlung, indem die Borsten mit einem Laser behandelt werden und damit ihre Form erhalten [323]. Heutzutage scheint bei den verschiedenen Herstellern ein gewisser Standard für die Borstenendabrundung zu existieren, da sich die Abrundungsverfahren etabliert haben.

Zur Analyse der Borstenendabrundung wurde für diese Untersuchung eine transparente Maske angefertigt, welche dreh- und skalierbar ist. Deren Vorlage waren Bilder der „DIN EN ISO 20126“ von Borsten mit bestandener Endabrundung [294]. Die Borstenumrisse konnten in der vorliegenden Untersuchung anhand der Maske ausgewertet werden. Die Evaluierung der Borstenendabrundung mithilfe einer Maske fand schon 1983 bei Chong und Beech statt. Sie nutzten jedoch eine transparente Doppelkontur, bei der das Intervall zwischen den beiden Linien den Bereich für eine akzeptable Borstenendabrundung darstellte [2]. Die Borstenprofile wurden hierfür direkt mittels eines Projektionsmikroskops vergrößert. Kritisch sollte bei deren Standardtest angemerkt werden, dass auch asymmetrische oder scharfkantige Borstenenden innerhalb des Intervalls den Test bestehen konnten.

Eine andere oft angewendete Methode zur Einschätzung der Borstenendabrundung ist die visuelle Prüfung von lichtmikroskopischen oder rasterelektronenmikroskopischen Borsten-Aufnahmen anhand von Klassifikationen [160, 170, 178]. Vorteil der REM-Aufnahmen ist die stärkere Vergrößerung der Borstenumrisse im Gegensatz zu lichtmikroskopischen Aufnahmen. Somit kann die Bewertung der Borstenendabrundung und sogar der gesamten Borstenoberfläche aufgrund einer höheren Tiefenschärfe sowie einem besseren 3D-Eindruck sehr detailgenau erfolgen [161]. Zu erwähnen ist jedoch, dass die Borsten mithilfe von mikroskopischen Aufnahmen nur zweidimensional dargestellt werden können. Das bedeutet, dass die Rückseite einer Borste nicht in die Bewertung der Borstenendabrundung mit einbezogen werden kann, da sie nicht sichtbar ist. In dieser Arbeit wurden die Borsten, wie auch schon in früheren Studien, einzeln nebeneinander liegend untersucht [163, 164, 167, 168, 179].

Andere Untersuchungen stellten die Borsten in ganzen Büscheln in einem Winkel von 45° oder 90° dar [161, 165, 170, 174]. Meyer-Lueckel et al. gaben der Untersuchung im 45°-Winkel den Vorzug, da so mehr Borsten pro Büschel sichtbar sind [161]. Da in der vorliegenden Untersuchung die Borsten einzeln liegend platziert wurden, spielt diese Tatsache eine untergeordnete Rolle.

Eine Limitation der Ergebnisse stellt die Menge der untersuchten Borstenenden dar. Pro Zahnbürstenmodell wurden von drei Zahnbürsten an fünf verschiedenen Zeitpunkten (0 – 50 k Zyklen) REM-Aufnahmen mit je drei Borsten pro Bild gemacht, sodass für jedes Zahnbürstenmodell insgesamt 35 Borstenenden untersucht wurden ($n = 35$).

In vergleichbaren Studien wurden deutlich höhere Gesamtzahlen für ein Zahnbürstenmodell untersucht und auch Borsten verschiedener Positionen auf dem Bürstenkopf für die Untersuchung ausgewählt. Die geringe Stichprobe, mit nur 9 Borsten für jeden einzelnen Zeitpunkt, lässt nur bedingt Aussagen zur gesamten Borstenendabrundung einer Zahnbürste zu und die Ergebnisse sollten in ihrer Aussagekraft kritisch hinterfragt werden. Die Borsten der vorliegenden Untersuchung wurden für alle Zahnbürsten auf der Mitte der Kopfhöhe von Randbüscheln entnommen. Studien konnten zeigen, dass die Position der verwendeten Borsten für die Untersuchung keinen signifikanten Unterschied verursacht [161, 174].

Die Beurteilung mikroskopischer Aufnahmen ist ein schnelles und einfaches Verfahren. Da diese Methode jedoch subjektiv und abhängig vom individuellen Untersucher ist, sollten mehrere verblindete Untersucher die Borsten bewerten [161, 174, 175]. Es muss kritisch betrachtet werden, dass die REM-Aufnahmen der vorliegenden Untersuchung lediglich von einem Untersucher beurteilt wurden und die Gruppen nicht verblindet waren. Jedoch erlaubt die Anwendung der skalierbaren Maske eine objektivere Auswertung als nur eine rein visuelle Bewertung anhand eines Klassifikationsschemas, da die Borsten mit den Umrissen der Maske verglichen werden. Die derzeit einzige bekannte Untersuchungsmethode zur quantitativen Beurteilung der Borstenendabrundung, stellt die Formfaktoranalyse dar. Sie ist ein zeitintensives Verfahren, welches objektive Ergebnisse liefert [180]. Jedoch können damit keine Borstenoberflächen begutachtet werden. Meyer-Lueckel et al. bewerten die subjektive Bewertung anhand von REM-Aufnahmen als hinreichend genau [161].

Mit der „DIN EN ISO 20126“ werden Prüfverfahren für die physikalischen Eigenschaften von Handzahnbürsten und Anforderungen daran aufgestellt. Auch für die Borstenendabrundung einer Zahnbürste existiert hier ein Prüfverfahren. Bezüglich der Borstenendabrundung bestehen Handzahnbürsten die Sichtprüfung, sobald bei drei zufällig ausgewählten Zahnbürsten und davon bei je drei zufällig ausgewählten und untersuchten Borstenbüscheln der prozentuale Anteil von Borsten ohne scharfe Kanten mindestens 50% beträgt. Bei der visuellen Prüfung mit 20- bis 90-facher Vergrößerung wird der Anteil endgerundeter bzw. nicht endgerundeter Borsten in einem Borstenbüschel in der Schrägansicht in 10% - Abständen geschätzt und notiert oder die Borsten eines Büschels werden abgeschnitten, separat untersucht und gezählt [294].

Auch dieses Prüfverfahren ist wie die visuelle Auswertung in Klassifikationen eine subjektive Methode, die von Untersucher zu Untersucher variieren kann. Zudem können bei Schätzungen des Anteils eines Büschels mit akzeptabler Borstenendabrundung starke Verzerrungen der Ergebnisse entstehen. Für das Bestehen der Borstenendabrundung einer Zahnbürste müssen lediglich 50% der untersuchten Borsten akzeptabel endgerundet sein.

Die Bestehensgrenze scheint jedoch für einen Zahnbürsten-Standard etwas gering angesetzt zu sein. Es sollte hinterfragt werden, ob dieses Mindestmaß für eine Zahnbürste ausreichend ist. Da in dieser Untersuchung selbst bei der Zahnbürste mit der am wenigsten akzeptablen Borstenendabrundung mehr als 70 % akzeptabel waren. Sicherlich wäre vergleichend mit dieser Untersuchung eine Anhebung der Bestehensgrenze sinnvoll.

Darüber hinaus ist die „DIN EN ISO 20126“ nicht für mehrstufige Borstenprofile, elektrische Zahnbürsten oder Zahnbürsten mit konischen Filamenten geltend, was ihren Indikationsbereich stark einschränkt. Auch in Bezug auf die Oberflächenbeschaffenheit der einzelnen Borsten wird in dieser Norm nicht weiter eingegangen. Die Borsten werden lediglich vage mit einer glatten Oberfläche und ohne ersichtliche Verschmutzungen beschrieben [294].

Da jedoch die Borstenoberflächenbeschaffenheit so wie die Borstenendabrundung wichtige Anforderungen an eine Zahnbürste darstellen [161], sollte die Oberfläche der Borste ebenso analysiert werden. Die äußere Morphologie sowie die Abnutzung der Borsten beeinflussen die Ansiedlung von Mikroorganismen auf der Zahnbürste. Dabei führen Oberflächenunebenheiten oder -beschädigungen zu vermehrter Bakterienretention [324]. Daher wurde in der vorliegenden Untersuchung die Borstenqualität in Bezug auf die äußere Beschaffenheit der Borsten mithilfe einer Klassifikationsskala bestimmt. Frühere Studien beachteten die generelle Borstenoberfläche nicht oder stellten Klassifikationsskalen auf, die sich jedoch meist nur auf die Borstenspitze bezogen [161, 178]. In einer neueren Untersuchung von Rehman et al. wird auch die generelle Borstenoberfläche berücksichtigt und in REM-Aufnahmen dargestellt [179].

In der vorliegenden Untersuchung erfolgte die Einteilung der Borstenoberfläche in zwei Grade unabhängig von der Borstenendabrundung, wobei der erste Grad als akzeptabel für die Borstenoberflächenbeschaffenheit galt. Diese Beurteilung war einerseits subjektiv, bot jedoch die Möglichkeit die äußere Morphologie der Borsten detaillierter zu bestimmen. Die Ergebnisse zur Borstenoberflächenbeschaffenheit zeigten, dass fünf von sechs untersuchten Zahnbürstenmodellen den Test bestanden. Lediglich bei der Zahnbürste von Hydrophil erreichte mehr als ein Drittel der untersuchten Borsten keine akzeptable Borstenoberfläche, da sie durch vermehrte Unebenheiten, Rauigkeiten oder Defekte auffiel.

Die Ergebnisse einzelner Borsten verschiedener Hersteller belegten, dass die Borstenoberfläche akzeptabel war, die Borstenendabrundung in ihrem Umriss hingegen nicht (Abbildung 76). Dieses Phänomen trat auch umgekehrt auf. Daher erscheint die separate Betrachtung der Kriterien Borstenendabrundung und Borstenoberflächenbeschaffenheit für Zahnbürsten sinnvoll. Das Kriterium Borstenoberflächenbeschaffenheit sollte für die Qualität einer Zahnbürste berücksichtigt werden und in einer zukünftigen Version der „DIN EN ISO 20126“ mit aufgenommen werden.

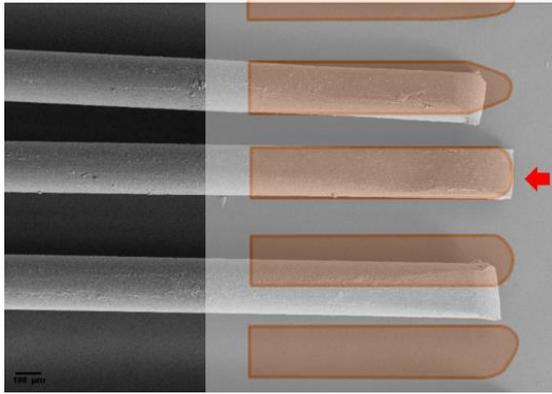


Abbildung 76: REM-Aufnahme bei 50-facher Vergrößerung von drei Borsten der Zahnbürste Alverde nach 50 k Zyklen Zahnputzsimulation: akzeptable Borstenoberflächenbeschaffenheit jedoch inakzeptable Borstenendabrundung (überprüft mit transparenter Maske) der mittleren Borste (roter Pfeil)

Die anschließende Betrachtung der Borsten in einer Gesamtbeurteilung bestehend aus Borstenendabrundung und Borstenoberflächenbeschaffenheit erzielte ähnliche Ergebnisse wie die gesonderte Betrachtung der Kriterien. Beim Zahnbürstenmodell von Hydrophil zeigte sich jedoch eine Verschlechterung der Ergebnisse aufgrund der zusätzlichen Beurteilung der Borstenoberfläche, die vermehrt unzureichend war (Grad II). Besonders die Gesamtbewertung der Borsten im Ausgangszustand bis hin zu 25 k Zyklen schnitt bei Hydrophil mangelhaft ab. Erst durch die Zahnputzsimulation verbesserte sich die Borstenoberfläche, da die Unebenheiten abgerundet wurden und somit die Oberflächenqualität akzeptabel wurde. In der klinischen bzw. alltäglichen Anwendung ist dies fraglich. Daher kann im Rahmen dieser Untersuchung von der Zahnbürste Hydrophil abgeraten werden, da sie im Gegensatz zu den anderen untersuchten Zahnbürstenmodellen mit 51% am schlechtesten abschnitt. Bezüglich der Borstenoberflächenbeschaffenheit scheinen die meisten Hersteller einen sehr guten Standard etabliert zu haben.

5.2 Zahnbürstenauswechslung

Die Zahnbürste ist ein Gegenstand des täglichen Gebrauchs und sollte daher regelmäßig ersetzt werden [94-96]. Es gibt verschiedene Gründe, welche für eine Zahnbürstenauswechslung sprechen. Hierzu zählen die ungenügende Reinigung der Zähne von Plaque, die mikrobielle Kontamination der Zahnbürste und eine mögliche Verletzungsgefahr abgeknickter oder aufgezwirbelter Borsten mit zunehmender Zeit [96]. Die Frage, nach welcher expliziten Nutzungsdauer Handzahnbürsten aufgrund von Abnutzungserscheinungen der Borsten ersetzt werden sollten, kann im Rahmen der vorliegenden Untersuchung nicht ausreichend beantwortet werden.

Während der vorliegenden Zahnputzsimulation wurden makroskopische und mikroskopische Veränderungen in regelmäßigen Intervallen von 12,5 k Zyklen dokumentiert (bis 50 k Zyklen).

Diese entsprechen einer simulierten Verwendung der Zahnbürste von sechs Wochen bei zweimal täglichem Putzen für je zwei Minuten. Der Simulationszeitraum von 50 k Zyklen entspricht demnach einer simulierten Verwendung der Zahnbürste von sechs Monaten.

Die Ergebnisse im Rahmen dieser Untersuchung zeigten bezüglich der Verschleißerscheinungen an den Borsten wenige Auffälligkeiten und waren nicht signifikant. Daher ist im Rahmen dieser Ergebnisse eine Zahnbürstenauswechslung nach einer Verwendung von drei Monaten, nicht belegt, dass der Verschleiß bis zu diesem Zeitpunkt noch nicht weit fortgeschritten ist.

Da die makroskopischen Ergebnisse teilweise ein leichtes Umbiegen bzw. Aufspreizen der Borsten nach den simulierten sechs Monaten Putzzeit zeigten, scheint die Entscheidungsfindung für die Auswechslung einer Zahnbürste anhand der Aufspreizung oder dem Auffasern der Borsten durchaus sinnvoll zu sein. In der vorliegenden Untersuchung verbesserten sich lediglich bei der Zahnbürste von Hydrophil die Endabrundung aber vor allem die Borstenoberflächenbeschaffenheit im Verlauf der Putzsimulation. Es existieren Belege dafür, dass sich schlecht abgerundete Borsten mit zunehmender Benutzung mehr abrunden [125, 161]. Andere Studien belegen jedoch eine Veränderung der Form der Borstenspitze, die nicht verbessert oder akzeptabel ist [126, 325]. Das Ziel der Zahnbürstenhersteller sollte dennoch die primäre Borstenendabrundung sein, um eine Traumatisierung des oralen Gewebes zu verhindern [95, 125, 161, 178, 221].

Es sollte kritisch angemerkt werden, dass die untersuchten Borsten im Verlauf der Zahnputzsimulation zwar von einer Zahnbürste stammten, jedoch nicht die gleichen Borsten untersucht worden sind, da diese für die Untersuchung mit einem Skalpell abgetrennt wurden. Daher sind mögliche Schlussfolgerungen über den fortschreitenden Verschleiß, weitere Borstenendabrundungen oder Oberflächenbegradigungen über die Zeit nicht direkt zu beweisen.

Ein wichtiger Faktor, der für den Borstenverschleiß beachtet werden sollte, stellt das verwendete Auflagegewicht für die durchgeführte Zahnputzsimulation dar. Bei in-vitro-Versuchen existiert kein allgemein anerkannter Standard, daher variieren die Auflagegewichte bei Zahnputzsimulationen zwischen verschiedenen Studien stark. Die Spanne liegt dabei zwischen 100 - 500 g [145, 147, 155, 157-159, 244, 319, 326-332]. Auch das in-vivo-Putzverhalten zwischen den Individuen divergiert deutlich [333, 334]. Daher ist es schwierig Vergleiche zwischen verschiedenen Untersuchungen vorzunehmen.

Vieira et al. empfehlen eine geringere Bürstenbelastung von ca. 150 g, um das Zahngewebe nicht zu schädigen [201]. In der vorliegenden In-vitro-Untersuchung wurde ein Auflagegewicht von 150 g verwendet. Dieses Gewicht wird vom Hersteller des Zahnputzsimulators empfohlen und wurde auch in anderen Versuchen angewendet [144, 311, 312]. Aufgrund der in-vivo Versuche wird jedoch davon ausgegangen, dass einige Menschen mit deutlich höherem Andruck putzen als die gewählten 150 g und somit schneller einen höheren Borstenverschleiß hervorrufen können. So sollte beachtet werden, dass entscheidend für den Verschleiß einer Zahnbürste sowohl die verwendete Zahnputzbelastung als auch das Individuum selbst mit seiner spezifischen Zahnputztechnik ist [103, 124]. So wird beispielsweise bei elektrischen Zahnbürsten die integrierte Überprüfung der ausgeübten Kraft beim Zähneputzen auf den Bereich 0,8 - 2,5 N festgelegt, was etwa einem Auflagegewicht im Bereich von 80 – 250 g entspricht [335].

Es muss erwähnt werden, dass der Zahnputzsimulator der vorliegenden Untersuchung nur lineare Hin- und Herbewegungen der Proben und nicht der Zahnbürstenköpfe durchführen kann und somit keine physiologischen Bürstbewegungen vorliegen, da Rotationen, Kippungen oder Richtungswechsel der Borsten nicht möglich sind. Die im Gegensatz zu physiologischem Zähneputzen geringe Putzbelastung sowie die eingeschränkte Putzbewegung verursachen eventuell einen veränderten Borstenverschleiß.

Die Zahnbürstenmodelle, welche in dieser Untersuchung verwendet wurden, sind mit verschiedenen Borstenprofilen versehen, da die Grundlage für die Auswahl der Zahnbürsten der Rohstoff Rizinusöl für die Borsten war. Während die Referenzzahnbürste sowie die Zahnbürste von Hydrophil plan gestaltet sind, haben alle anderen Zahnbürsten ein Multilevel-Design. Das unebene Borstenprofil kann durch sein vermindertes Zahnflächenkontaktvermögen möglicherweise auch zu einer verminderten Abrasionswirkung oder sogar einer Steigerung der Abrasion führen, weil einzelne Büschel auf die Zahnoberfläche gedrückt werden. Daher sind die erzielten Ergebnisse kritisch zu betrachten. Es existieren weitere Faktoren, die eine klinische Vorhersagbarkeit unmöglich machen.

Da bei diesem in-vitro-Versuch zwar Zahnmaterial verwendet wurde, jedoch kein weitere mikrobielle Belastung wie Plaqueauflagerung auf den Zähnen, Konkrementen oder Speichel vorhanden waren, entsprechen die Versuchsparameter nur unzureichend den physiologischen Bedingungen. Der Borstenverschleiß kann daher deutlich langsamer vorangegangen sein als es im Mund eines Menschen der Fall wäre. Auch die fehlende komplexe Morphologie beispielsweise einer konvexen bukkalen Zahnoberfläche sowie das Vorhandensein von Zahnzwischenräumen waren nicht gegeben und schränken damit die Aussagekraft der Ergebnisse ein. Da im Rahmen der Untersuchung der Fokus auf den Verschleiß der Zahnbürsten gelegt wurde, kam der Reinigungsleistung als eigentliche Hauptfunktion keine Bedeutung zu.

In der vorliegenden Untersuchung war die Größe der Dentinstäbchen aufgrund der Anatomie der Zähne limitiert. Zwar wurde für diesen Versuch bovines Zahnmaterial eingesetzt, um die Größe der Dentinstäbchen im Gegensatz zu humanen Zähnen zu erhöhen, dennoch blieb es schwierig die Abmessungen von 2 mm x 3 mm x mindestens 15 mm zu erreichen. Gründe hierfür waren unter anderem der Ausschluss von Dentinstäbchen mit Schmelzanteilen oder Wurzelspitzen. Diese Probleme ließen sich mit einem standardisierten Material umgehen.

Die Zahnputzsimulation gegen eine Dentinoberfläche entspricht nicht der Putzfunktion gegen eine Schmelzoberfläche, da Schmelz deutlich härter als Dentin ist. Dies müsste in einer weiteren Studie untersucht werden.

5.3 Micro-Computertomographische Untersuchung

Die microcomputertomographischen Aufnahmen konnten das makroskopische Erscheinungsbild der Borsten nur bei einigen Zahnbürsten bestätigen, wie bei der ADA und der Prokudent Zahnbürste. Obwohl bei Alterra makroskopisch nur eine Abflachung der Borsten sichtbar war, zeigten die Micro-CT Aufnahmen enger stehende Borsten nach der Zahnputzsimulation.

Die Spreizung der Borsten war sowohl makroskopisch als auch in den Micro-CT Aufnahmen der Zahnbürste Alverde gut erkennbar. Eine deutliche Abweichung vom makroskopischen Erscheinungsbild zeigte sich bei den Borsten der Zahnbürste Hydrophil, bei der die Borsten stärker auseinander standen, als es in der Ausgangssituation der Fall war.

Somit konnte die Konfiguration der Borstenbüschel und deren Abweichungen anhand der Micro-CT Aufnahmen sowohl vor als auch nach der Zahnputzsimulation detaillierter untersucht werden, als lediglich in den makroskopischen Bildern. Diese Untersuchungsmethode ist damit eine neue Art Borsten zusätzlich zu beurteilen.

5.4 Dentinveränderungen

Für die Quantifizierung der Dentinabrasion konnte in dieser Untersuchung mithilfe der Software „Match 3D“ der vertikale Verschleiß der Zahnputzsimulation bestimmt werden. Eine frühere Untersuchung zur Dentinabrasion nach Zahnputzsimulation nutzte den gleichen Zahnputzsimulator wie in der vorliegenden Untersuchung [145]. Vorteilhaft für einen guten Vergleich erscheint, dass auch in diesem Versuch die Referenzzahnbürste ADA Control verwendet wurde. Die Mittelwerte für den vertikalen Dentin-Verschleiß fallen für die untersuchten Zahnbürstenmodelle deutlich höher aus als in der vorliegenden Untersuchung. Dies gilt auch für die Standardzahnbürste ADA Control, welche 3,5 mal mehr Dentinabrasion erreichte.

Hier sollte allerdings die Bedeutung der für diesen Versuch eigens hergestellten Abrasiv-Slurrylösung, sowie die Bedeutung, des erhöhten Auflagegewichts der Zahnbürsten von 250 g beachtet werden [145]. Möglicherweise hatte mindestens ein Parameter davon einen Einfluss auf die stärkere Dentinabrasion. Es könnte jedoch auch sein, dass in dem Versuch von Bark die geringere Zyklenzahl von 12,5 k Zyklen die Abrasionswirkung abschwächte und diese bei einer Simulation von 50 k Zyklen noch deutlich höher ausgefallen wäre. Die Untersuchung der Dentinabrasion ist vor allem im Hinblick auf freiliegende Dentinbereiche der Zahnhäule sinnvoll.

In einer weiteren aktuellen Untersuchung von Martin wurde der Verschleiß dentaler Befestigungskomposite unter Verwendung des gleichen Zahnputzsimulators bestimmt [319]. Hier erstreckten sich die mittleren Verschleißwerte von 20 μm bis 38 μm , was deutlich geringer ist als die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung. Auch in dieser Untersuchung wurden andere Versuchsparameter bezüglich Auflagegewicht und Zyklenzahl ausgewählt. Die am naheliegendsten Versuchsbedingungen mit 125 g und 35 k Zyklen ergaben jedoch auch deutlich geringere Werte als in der vorliegenden Untersuchung [319].

Ein entscheidender Grund für diesen Unterschied stellt hier vermutlich das auf Abrasion untersuchte Kompositmaterial dar, weshalb direkte Vergleiche mit Zahnbürsten schwierig erscheinen.

In der vorliegenden Untersuchung wurden für die Bestimmung der Oberflächenrauheit des Dentins nach Zahnputzsimulation mithilfe eines Digitalmikroskops die mittlere arithmetische Höhe S_a und die maximale Höhe S_z bestimmt.

Die Ergebnisse dieser Untersuchung zeigten für beide Parameter der Rauheit keine signifikanten Veränderungen zwischen den Zeitpunkten vor und nach der Zahnputzsimulation.

In einer Untersuchung von Heintze et al. konnte bei zuvor polierten Dentinprobenoberflächen nach einer Zahnputzsimulation mit 170 g Auflagegewicht und 36.000 zirkulären Bürstenstrichen, eine signifikante Reduktion der mittleren Rauheit um ca. 35% festgestellt werden. Die Messung erfolgte wie in der vorliegenden Untersuchung mit einem optischen Profilometer. Heintze et al. nutzen zur Herstellung der Slurrylösung das gleiche Verhältnis für Zahnpasta und Leitungswasser wie es in der vorliegenden Untersuchung der Fall war [336]. Auch die relative Dentinabrasivität (RDA) der unterschiedlichen Zahnpasten war für beide Versuche ähnlich [337]. Die Bestimmung der relativen Dentinabrasivität von Zahnpasten ist entscheidend für die ungefähre Einschätzung ihrer möglichen klinischen Abrasion und der Überprüfung ihrer Qualität [338, 339]. Es konnte bei Untersuchungen von Zahnpasten, wie auch bei der im vorliegenden Versuch verwendeten Zahnpasta Colgate Total Original, eine Korrelation zwischen RDA-Werten und Rauheit der Dentinoberfläche festgestellt werden [337, 339].

Auch bei dentalen Kompositen führte die Zahnputzsimulation mit Zahnpasta zu einer vermehrten Rauheit der Oberflächen [154, 156, 340]. Verschiedene Studien machen deutlich, dass die Abrasivität einer Zahnpasta ein wichtiger Parameter für die Abrasion beim Zähneputzen ist. Dennoch spielen weitere Faktoren wie die Borstenform, -anzahl, -härte oder das individuelle Verhalten des Anwenders eine Bedeutung [92, 341]. Die multifaktorielle Ätiologie von Zahnverschleiß macht deutlich, dass für dessen Entstehung ein komplexes Zusammenspiel an verschiedensten Parametern eine Bedeutung hat.

5.5 Borstenzusammensetzung und deren Nachhaltigkeit

In der Untersuchung wurde die chemische Zusammensetzung der Borsten verschiedener Zahnbürstenmodelle analysiert. Die Elementaranalyse der Borsten im REM mithilfe energiedispersiver Röntgenspektroskopie (EDX-Analyse, von engl. Energy Dispersive X-ray spectroscopy) ist geeignet, um die elementare Zusammensetzung eines anorganischen Materials genauer charakterisieren zu können [342, 343]. Bei dieser Methode sind alle Elemente ab Kohlenstoff bestimmbar, leichtere Elemente wie beispielsweise Wasserstoff sind allerdings nicht nachzuweisen [342]. Da das herkömmliche Polyamid der Referenzzahnbürste ADA Control, jedoch unter anderem aus Wasserstoffatomen aufgebaut ist, wird es mit dieser EDX-Analyse nicht möglich die genaue Zusammensetzung des Materials zu bestimmen.

Im Ergebnis der Untersuchung zeigt sich dennoch für alle Zahnbürsten eine Elementarverteilung bestehend aus Kohlenstoff, Stickstoff und Sauerstoff. Da lediglich geringe prozentuale Unterschiede zwischen den Zahnbürstenmodellen vorzufinden sind, kann davon ausgegangen werden, dass Zahnbürstenborsten auf der Basis von Rizinusöl eine sehr ähnliche Zusammensetzung wie die Borsten der Referenzzahnbürste ADA Control aufweisen, welche aus Polyamid 6.6 bestehen.

Der Herstellungsweg der Zahnbürsten mit Borsten auf der Basis von Rizinusöl gibt hier Aufschluss über die Zusammensetzung. Aus den Samen des Baumes *Ricinus communis*, auch Wunderbaum genannt, kann durch Kaltpressen Rizinusöl gewonnen werden [344, 345], (Abbildung 77). Rizinusöl ist als Rohstoff für Biopolymere sinnvoll, da es keine Konkurrenz für die Erzeugung von Nahrungsmitteln darstellt. Somit wird das Material unter anderem für die Produktion von Zahnbürstenfilamenten verwendet [344]. Im Rizinusöl sind 80 - 85% von Rizinolsäure enthalten, welches den Ausgangsstoff für die Polyamidproduktion bildet [344, 345]. Durch die Behandlung von Rizinusöl mit Methanol entsteht Methylricinoleat, woraus durch Pyrolyse bei hohen Temperaturen Methyldecylenat und Heptaldehyd gewonnen wird. Durch die darauffolgende Hydrolyse entsteht dann Undecylensäure, die in weiteren Schritten chemisch verarbeitet wird. Sobald dann Gamma-Aminodecansäure entstanden ist, können die Monomere zu Nylon-11 polymerisiert werden [345, 346].



(a)



(b)

Abbildung 77 (a) Rizinusbaum „*Ricinus communis*“ [347], (b) Rizinussamen [348]

Zahnbürsten mit Borsten auf der Basis von Rizinusöl werden als Biopolymere definiert. Obwohl sie aus nachwachsenden Rohstoffen bestehen, sind sie jedoch nicht biologisch abbaubar. Die Annahme, dass eine Zahnbürste mit Holzgriff und Borsten auf der Basis von Rizinusöl im Bio-Abfall entsorgt werden kann, ist demnach nicht richtig. Einige Hersteller empfehlen den Bürstengriff, wenn er beispielsweise aus Holz hergestellt ist, getrennt vom Bürstenkopf im Kompost zu entsorgen. Der Bürstenkopf gehört jedoch nach wie vor in den Restmüll, da sich die Biopolymere aus Rizinusöl nicht biologisch abbauen. Von dieser Tatsache wissen jedoch die meisten Verbraucher nicht. Das Zerteilen der Zahnbürste stellt für die Entsorgung ebenfalls einen deutlichen Mehraufwand dar.

Die umweltfreundliche Produktion moderner Zahnbürsten-Unternehmen beinhaltet unter anderem die Umstellung und Nutzung von erneuerbaren Energien. Des Weiteren werden, die für die konventionelle Zahnbürstenherstellung vorhandenen Produktionsanlagen weiter genutzt und an neue Anforderungen angepasst. Somit bleiben die Fertigungsstraßen erhalten, obwohl sich die Produkttypen verändern. Zusätzlich versuchen Hersteller durch Wiederverwertung recycelbare Verpackungen zu nutzen, um möglichst nachhaltig zu agieren [349].

Für die Herstellung von Rizinusöl werden im Anbau jedoch große Wassermengen sowie ausreichend Bepflanzungsfläche benötigt. Desweiteren benötigen Zahnbürsten mit Borsten aus Rizinusöl bei der Produktion Energie und erzeugen Kohlendioxidemissionen. Fossile Rohstoffe scheinen jedoch deutlich höhere Werte zu erzielen [344, 345]. Aufgrund dieser und diverser andere Faktoren ist die Frage der Nachhaltigkeit von Zahnbürsten aus Rizinusöl nicht eindeutig zu klären. Eine erhöhte Transparenz der Hersteller über die Hintergründe und Nachhaltigkeit solcher Zahnbürsten wäre sinnvoll.

5.6 Elastizitätsmodul und Bürstensteifheit

Für die Untersuchung der mechanischen Eigenschaften der Zahnbürsten mit Borsten auf der Basis von Rizinusöl wurden mithilfe eines Mikrozugprüfgeräts die Borsten im Zugversuch auf ihr Elastizitätsmodul getestet. Bei diesem Versuch wird das Elastizitätsmodul aus dem Verhältnis von Spannung und Dehnung bestimmt [318]. Da das Elastizitätsmodul die relative Steifheit oder Starrheit eines Materials im elastischen Bereich angibt und eine Materialkonstante ist, eignet es sich, um die Bürstensteifheit der verschiedenen Zahnbürsten miteinander zu vergleichen [317, 318]. Von den sechs verschiedenen Herstellern werden die Zahnbürsten alle „mittel“ deklariert. Aufgrund der Ergebnisse der Elementaranalyse und einer ähnlichen Zusammensetzung der Borsten, wurden gleiche Werte des Elastizitätsmoduls erwartet, die sich untereinander wenig unterscheiden. Die Elastizitätsmodule von Polymeren sind im Verhältnis zu Metallen oder Keramik relativ gering [317]. Die Ergebnisse des Mikrozugversuchs lieferten passende Werte des Elastizitätsmoduls für alle Zahnbürsten, welche im Mittel bei 1,5 GPa lagen. Diese Werte stimmen mit den Tabellenwerten für Polyamid 6.6 mit 1,0 – 3,5 GPa überein [350]. Dieses Ergebnis unterstreicht die Materialgleichheit der Borsten für die sechs untersuchten Zahnbürstenmodelle im Vergleich mit herkömmlichen Polyamidborsten.

Die Steifheit einer Zahnbürste hängt nicht nur vom verwendeten Borstenmaterial, sondern auch von der Anzahl der Borsten und Büschel, von der Anzahl der Borsten pro Büschelloch pro Flächeneinheit sowie von den Abmessungen der einzelnen Monofilamente ab [1, 2]. Daher kann keine endgültige Aussage über die Eigenschaften der einzelnen untersuchten Zahnbürsten getroffen werden. Die technischen Abmessungen der Zahnbürsten mittels Schieblehre zeigten in dieser Untersuchung deutliche Unterschiede bezüglich Zahnbürstengröße, Bürstenkopfgröße, Büschel- und Filamentanzahl. Die Abmessungen eines einzelnen Filaments bezüglich Durchmesser und Länge ergaben auch verschiedene Werte.

Hierbei stach besonders die Zahnbürste von Hydrophil hervor, deren Bürstenkopfgröße, Büschelanzahl sowie Borstendurchmesser recht gering im Gegensatz zu den anderen untersuchten Zahnbürsten ausfielen. Die Zahnbürste von Prokudent hatte im Vergleich als Besonderheit eine sehr hohe Borstenanzahl pro Büschel, der einzelne Borstendurchmesser betrug jedoch lediglich 0,17 mm. Bezüglich der Borstenlänge schienen sich bestimmte Werte etabliert zu haben.

Die Borstenlänge für alle untersuchten Zahnbürsten betrug für kurze Borsten 9 mm bzw. 9,5 mm, wohingegen für lange Borsten die Werte immer bei 11 mm lagen. Auch für den Borstendurchmesser war bei drei von sechs Zahnbürstenmodellen der Wert bei 0,2 mm.

Vermutlich haben sich die Abmessungen der einzelnen Monofilamente für die meisten Zahnbürstenhersteller standardisiert, während die Zahnbürstengröße, die Bürstenkopfgröße, die Büschelanzahl sowie die Filamentanzahl variieren. Diese Faktoren und auch weitere Parameter wie die Wasseraufnahme, die Temperatur, die Position und Form der Borsten oder die Häufigkeit der Zahnbürstenbenutzung [1, 298, 300] machen es nahezu unmöglich die Steifheit einer Zahnbürste genau zu bestimmen, bzw. Zahnbürsten in ihrer Steifheit exakt zu vergleichen.

Grundsätzlich sinnvoll erscheint es jedoch Zahnbürsten möglichst ähnlicher Morphologie, das heißt Zahnbürsten mit ähnlicher Größe, Borstenprofil, Büschelanzahl, etc., miteinander zu vergleichen. Da das Elastizitätsmodul einer Zahnbürste heute als der Widerstand der Borsten gegen einen Druck definiert wird [1], wäre ein Test der Borsten des ganzen Borstenkopfes gegen Druck deutlich realitätsgetreuer. Dementsprechend wurde in der „DIN EN ISO 22254: 2005 – 11“ ein Verfahren entwickelt die Biegefestigkeit der Besteckungsfläche einer Zahnbürste zu messen. Die Biegefestigkeit gibt die Widerstandskraft der Borstenbüschel gegen eine Verbiegung im rechten Winkel zur Besteckungsebene unter einem Kraftaufwand von 5 N an. Bei dieser Methode wird ein abgeschnittener Bürstenkopf parallel zu einem Bürstentisch, bestehend aus fünf Metallstäben eingespannt. Mithilfe einer Vorschubeinheit wird dieser mit $5 \pm 0,05$ N über den Tisch bewegt und mithilfe eines Kraftmessgeräts wird die Biegefestigkeit der Borstenbüschel vermessen. Die vermessene Biegefestigkeit kann im Weiteren verwendet werden, um die Härte der Besteckungsfläche zu berechnen. Hierfür muss jedoch vorerst die Besteckungsfläche eines Bürstenkopfes mithilfe eines Fotos oder einer Zeichnung auf $\pm 0,1$ cm² vermessen werden. Sobald die Werte für die Biegefestigkeit und Fläche der Besteckungsebene ermittelt wurden, kann aus deren Differenz die Härte der Besteckungsfläche berechnet werden [225]. Die Biegefestigkeit ist bei einem planem Borstenprofil relativ einfach zu berechnen, jedoch nicht bei unplanem Borstenprofil. Außerdem hat der Zahn keine plane Oberfläche, sondern Wölbungen, Höcker und Fissuren.

Mithilfe dieser Methode sind jedoch keine adäquaten Bestimmungen der Härte einer gesamten Zahnbürste möglich, da die Vermessungsmethode sowie die Form der Büschellöcher variieren können [225]. Diese Variante bietet jedoch einen ersten Ansatz die Steifheit bzw. Härte der Besteckungsfläche einer Zahnbürste näher zu bestimmen und zu standardisieren. Zukünftig könnte eine Bildverarbeitungssoftware oder anhand von Micro-CT Scans eine exaktere Vermessung der Besteckungsfläche liefern, womit verlässlichere Ergebnisse erzielt werden können. Inwiefern sich die verschiedenen Zahnbürstenmodelle in ihrer Steifheit unterscheiden, ist nach wie vor eine Festlegung der Hersteller. Verbraucher sollten sich grob an Deklarationen wie „mittel“ oder „weich“ orientieren. Trotzdem sollte beim Zähneputzen die Steifheit der Zahnbürste nicht nur anhand der Deklaration, sondern individuell ausgewählt werden. Daher bleibt es empfehlenswert für Patienten mithilfe ihres Zahnarztes die individuelle Mundsituation zu eruieren und dementsprechend die passende Zahnbürste auszuwählen.

5.7 Schlussfolgerung

Folgende Punkte können schlussfolgernd für diese Untersuchung zusammengefasst werden:

- Die untersuchten Zahnbürstenmodelle mit Borsten aus Rizinusöl sind bezüglich der Borstenendabrundung und der Borstenoberflächenbeschaffenheit im Neuzustand sowie während und nach deren Verwendung mehrheitlich akzeptabel. Nach einem simulierten Zähneputzen von sechs Monaten sind mikroskopische, microcomputertomographische sowie makroskopische Abnutzungserscheinungen sehr gering. Allerdings wurden bei der Untersuchung keine Variationen der Kraft beim Zähneputzen, mikrobielle Einflüsse oder anatomische Zahnformen berücksichtigt.
- Es kann im Rahmen dieser Untersuchung keine pauschale Empfehlung zur Nutzungsdauer einer Handzahnbürste aufgrund von Abnutzungserscheinungen nach sechs Monaten gegeben werden.
- Borsten aus Rizinusöl haben eine ähnliche chemische Zusammensetzung wie herkömmliche Polyamid Borsten.
- Das Elastizitätsmodul von Borsten aus Rizinusöl unterscheidet sich nicht von herkömmlichen Polyamid Borsten.
- Die Abrasion sowie Oberflächenrauheit des Dentins unterscheiden sich weder vor noch nach der Zahnputzsimulation wesentlich zwischen den verschiedenen Zahnbürstenmodellen.
- Die „DIN EN ISO 20126“ für Handzahnbürsten betrachtet nur die Borstenendabrundungen, sollte aber für eine umfassendere Untersuchung und Bewertung von Zahnbürstenborsten auch die Borstenoberflächenbeschaffenheit einbeziehen. Für die Bewertung der Borstenendabrundung sollte die Bestehensgrenze von 50% angehoben werden.

5.8 Ausblick

Diese Untersuchung zeigt, dass Zahnbürsten mit Borsten aus Rizinusöl auch in Zukunft gerade im Hinblick auf ihre Eigenschaften, ihre Sicherheit und ihre Reinigungseffektivität beim Zähneputzen untersucht werden sollten. Dies gilt insbesondere vor dem Hintergrund, dass Zahnbürsten aus alternativen Rohstoffen wie Rizinusöl vermehrt verkauft werden. Die hier durchgeführten Versuche bieten verschiedene Ansatzpunkte, um in zukünftigen Studien über Zahnbürsten darauf aufzubauen.

In dieser Untersuchung wird deutlich, dass eine Vielzahl von Faktoren existiert, welche verschiedenste Auswirkungen auf Zahnbürsten haben kann. Vorteilhaft wäre daher, zukünftige Studienziele klar voneinander abzugrenzen, um einzelne Parameter wie den Borstenverschleiß, die Dentinveränderungen, mechanische Eigenschaften oder die chemische Zusammensetzung genauer untersuchen zu können.

Weiterhin liefert diese Arbeit einen Hinweis auf die Notwendigkeit, zukünftig standardisierte und reproduzierbare Labormethoden zu definieren. Empfehlenswert wären hierbei Zahnbürsten, die möglichst einen gleichartigen Härtegrad und ähnliche Zahnbürstenkonfigurationen aufweisen, wie beispielsweise die gleiche Borstenkopfgröße, die gleiche Büschelanordnung und das gleiche Borstenprofil. Auch die in diesem Versuch verwendeten möglichst ebenen Dentinoberflächen könnten zukünftig besser normiert werden, um adäquatere Vergleiche durch standardisierte Oberflächenbedingungen zuzulassen. Eine solche Normierung wäre beispielweise durch ein vorangehendes Politurprotokoll zu erreichen oder indem vorab 3D-gedruckte Testoberflächen bzw. Zahnmodelle erstellt werden.

Es sollten vom gleichen Zahnbürstentyp ebenfalls mehrere Borsten untersucht werden, damit quantitative Aussagen möglich sind. Hier hätten Micro-CT Aufnahmen einen besonderen Vorzug. Anders als das Abschneiden der Borsten nach je 12,5 k Zyklen zur Untersuchung wie es in dieser Studie der Fall war, könnte man in Bezug auf den Borstenverschleiß auch mehrfach dieselben Borsten untersuchen und somit genauer den fortschreitenden Verschleiß der Zahnbürste bei zunehmenden Putzzyklen dokumentieren. Des Weiteren könnten Abweichungen der Zahnbürsten nach zunehmendem Verschleiß wie beispielsweise das Umbiegen oder Aufspreizen der Borsten besser visualisiert werden, indem man den Ausgangszustand der Zahnbürstenköpfe mit dem Zustand nach einer bestimmten Zyklenzahl übereinander projiziert. Dank dieser Überlagerung wäre der Grad der Abweichung eindeutig sichtbar.

Damit künftig eine höhere Aussagekraft bei derartigen Untersuchungen getroffen werden kann, sollte die Studie verblindet durchgeführt werden, um möglichst objektive Ergebnisse zu erzielen.

Um in der Zukunft möglichst genaue Aussagen für die Anwendung einer Zahnbürste treffen zu können, wären Untersuchungen mit Probanden geeignet. Diese klinischen Studien würden jedoch, aufgrund der individuellen Vielfalt der Personen die Schwierigkeit bergen, weniger gut standardisierbar zu sein.

Die in dieser Arbeit verwendeten Zahnputzsimulatoren sind in ihrer Bewegung auf eine Achse begrenzt, wodurch die Übertragbarkeit auf reale Anwendungsszenarien eingeschränkt ist. Um klinisch relevante Ergebnisse zur Zahnbürstenabnutzung während des Zahnputzvorgangs zu erzielen, empfiehlt sich anders als in dieser Untersuchung der Einsatz von mehrachsigen Zahnputzrobotern, die in der Lage sind Putzbewegungen in mehreren Freiheitsgraden mit Rotationen auszuüben.

Diese Zahnputzroboter wurden bereits in mehreren Studien zur Untersuchung der Reinigungsleistung von Zahnbürsten, der Abrasivität von Zahnpasten oder sogar zur Zahnbürstenabnutzung eingesetzt [351-355]. Eine aktuelle in-vitro Studie zeigt, dass neueste Robotersysteme in der Lage sind Ersatzplaque ebenso erfolgreich zu entfernen wie zahnmedizinische Fachangestellte, weshalb sich diese Systeme als sehr vorteilhaft für die Reproduzierbarkeit eines Versuchs erweisen könnten [354].

Auch die zusätzliche Verwendung von simulierten Plaque- und Speichelsubstraten wäre zur Untersuchung der Effektivität der Plaqueentfernung von Zahnbürsten von klinischem Vorteil [331, 351, 354]. Da die Reinigung der Zahnoberflächen eine essenzielle Voraussetzung an eine Zahnbürste darstellt, gilt es dieses Kriterium bei deren Überprüfung zu beachten.

Die Fragestellung, wann eine Zahnbürste ausgetauscht werden soll, muss noch genauer untersucht werden. Hierfür müssten neue Parameter definiert werden. Eine Putzsimulation, welche eine höhere Anzahl an Putzzyklen beinhaltet, wäre sinnvoll, um mögliche Auswirkungen auf die Zahnbürstenborsten besser zu simulieren.

Das Auflagegewicht der Zahnbürsten müsste auch verändert werden. Denn es wird davon ausgegangen, dass Menschen einen höheren Anpressdruck aufwenden können als es in dieser Untersuchung mit 150 g der Fall war. Daher sind moderne elektrische Zahnbürsten teilweise mit Drucksensoren bis zu 2,5 N ausgestattet [335], welches einem Auflagegewicht der Zahnbürste von 250 g entsprechen würde.

6.2 Verpackungen der untersuchten Zahnbürsten



Abbildung 78 Verpackung Alterra Bambus Zahnbürste: biobasierte Borsten aus Rizinusöl (Oval)



Abbildung 79 Verpackung Alverde Zahnbürste aus Holz: Borsten aus biologisch nachwachsenden Ressourcen (Oval); empfohlene Zahnbürstenauswechslung nach zwei Monaten (roter Pfeil)



Abbildung 80 Verpackung Dr. Best Nature Green Clean Zahnbürste aus nachwachsenden Rohstoffen: nachhaltiges Borstenmaterial aus Rizinusöl (Oval)



Abbildung 81 Verpackung Hydrophil Zahnbürste: biobasierte Borsten aus Rizinusöl/ biobasiertes Nylon (Oval)



Abbildung 82 Verpackung Prokudent Recycling Zahnbürste: biologische Rohstoffe auf Basis von Rizinusöl, erdölfrei (Oval); empfohlene Zahnbürstenauswechslung nach zwei Monaten (roter Pfeil)

6.3 Apparative Ausstattung

Tabelle 14 Apparative Ausstattung der Untersuchung

Gerät	Anwendung
Zahnbürst-Prüfmaschine-linear LR 1, SyndiCAD, München, Deutschland	Zahnputzsimulation mit Zahnbürsten
IsoMet™ Low Speed Saw Niedertourentrenner, Buehler, Illinois, USA	Herstellung von Dentin-Stäbchen (Dentin-Probenherstellung)
SS-200 Grinder/Polisher, LECO Cooperation, Michigan, USA	Dentin-Probenglättung
Wärmeschrank, Memmert, Schwabach, Deutschland	Lagerung der Dentin-Proben für 24 h bei 37°C
3D Laserscan KF-30 SyndiCAD, München, Deutschland	Laserscan der Dentin-Proben
Rasterelektronenmikroskop ZEISS GEMINI® FE-SEM, SUPRA™55VP, Carl Zeiss SMT AG, Oberkochen, Deutschland	Mikroskopische Auswertung der Borsten
Genesis Spectrum EDAX®, AMETEK, Mahwah, USA	Ermittlung der chemischen Elementzusammensetzung der Borsten
SC7620 Mini Sputter Coater, Polaron Ltd; heute: Quorum Technologies Ltd, Laughton, United Kingdom	Besputtern der Borsten-Proben
Mikrozugprüfgerät TC 550, SyndiCAD, München, Deutschland	Mikrozugtest der einzelnen Zahnbürstenborsten
Nikon D7200 Spiegelreflexkamera, Nikon, Tokio, Japan	Fotodokumentation des Zahnbürstenkopfes
Microcomputertomograph 40, Scanco Medical AG, Schweiz	Micro-CT-Dokumentation des Zahnbürstenkopfes

6.4 Anleitung Probenherstellung



Rinderzahnauswahl:

Kariesfreie, möglichst lange Krone



Vorbereitungen für das Aufkleben des

Rinderzahnes auf das Isomet-Plättchen:

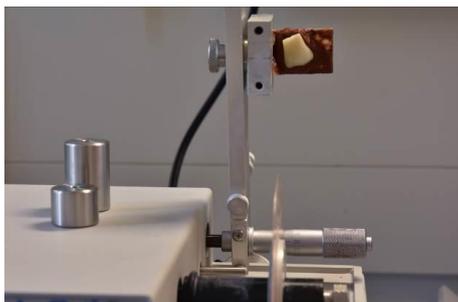
Feuerzeug, Flamme, Kerrstange, Isomet-Plättchen und Zementspatel



Erwärmen der Abformmasse Kerr Impression Compound



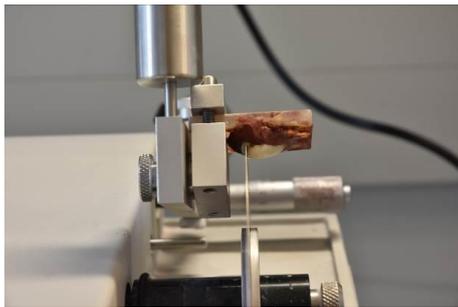
Aufkleben des Rinderzahnes auf das Isomet-Plättchen



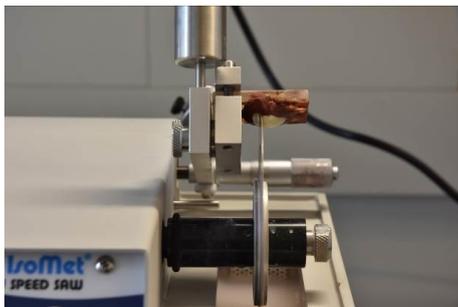
Einspannen des Isomet-Plättchens in die Diamantsäge



Aufschieben von 2 Gewichten (1x 150g & 75g) zum gleichmäßigen Sägen,
Einstellen der Sägeschwindigkeit auf Stufe 8,
Säge starten,
Probe auf das Sägeblatt aufsetzen



Probe vollständig durchsägen zum Entfernen der lateralen Schmelzschicht



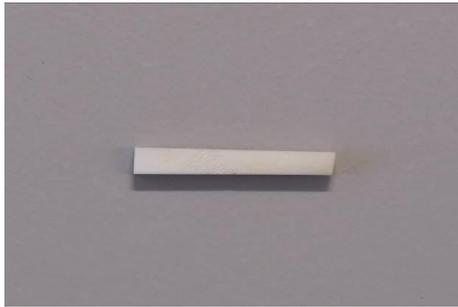
Probe nach einem Abstand von 2 mm (einstellbar über manuelle Mikrometerschraube) erneut vollständig durchsägen



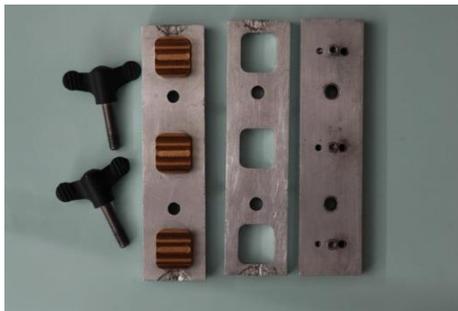
Fertige Zahnscheibe entnehmen



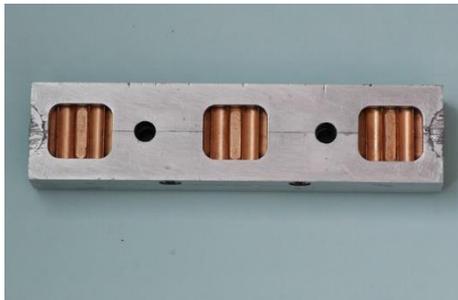
Zahnscheibe erneut auf das Isomet-Plättchen aufkleben und vollständig durchsägen in einem Abstand von 3 mm, anschließend die Stäbchenenden begradigen



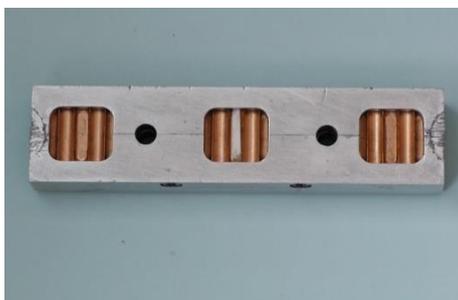
Dentinstäbchen entnehmen, welches frei von Schmelz, Unregelmäßigkeiten und Karies sein sollte



Matrize zur Herstellung des Kunststoff-Blocks, um das Dentinstäbchen einzubetten
(Möglichkeit zur gleichzeitigen Herstellung von drei Proben)



Einzelteile der Matrize zusammensetzen,
Fetten der Matrizenhohlräume mit Vaseline und Watte-
stäbchen (für die spätere einfache Entformen der
Probe)



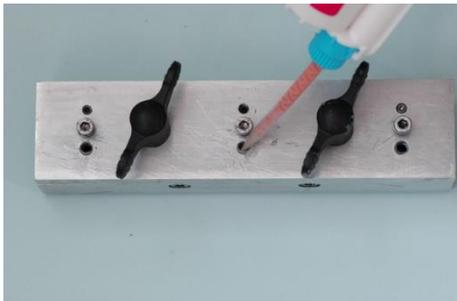
Dentinstäbchen in Matrize, mit der 3 mm breiten Fläche
nach unten, mittig einlegen



Mit den beiden großen Schrauben die zusamme-
gesetzte Matrize fixieren

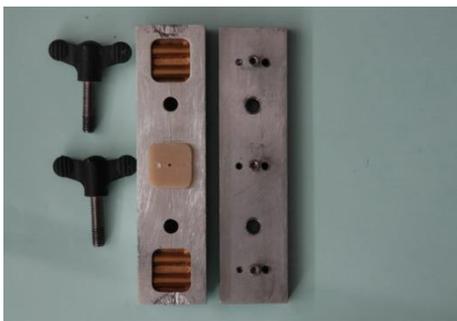


Selbsthärtenden Kunststoff Luxatemp Automix Plus in den Automix-Dispenser einbringen und eine Mischkanüle aufsetzen



Kunststoff über die Einfülllöcher langsam und kontinuierlich einspritzen,

anschließend die Einfülllöcher mit einem Wattestäbchen wieder versäubern und Kunststoff entfernen (um Verkeilen beim späteren Entformen zu verhindern)



Nach 10 min Aushärten Matrize öffnen und Probe entnehmen



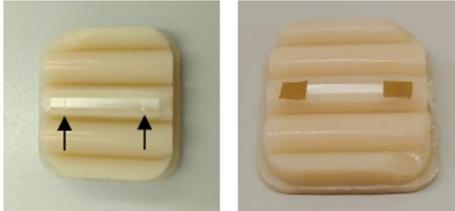
Entformte Probe an der Dentinoberfläche plan schleifen zur Entfernung von Kunststoffüberhängen



Fertige Probe:
Eingebettetes Dentinstäbchen



Probe für 24 h im Wärmeschrank in Wasser bei 37° aufbewahren



Referenzbereich mit Handstück am linken und rechten Ende der Dentinprobe senkrechte Linien eingravieren und Referenzbereiche mit Paketklebeband abkleben



Probe in den Probenhalter der Zahnbürstmaschine einschieben und Abdeckung aufschieben



Probe bereit zur Einbringung in die Zahnbürstmaschine

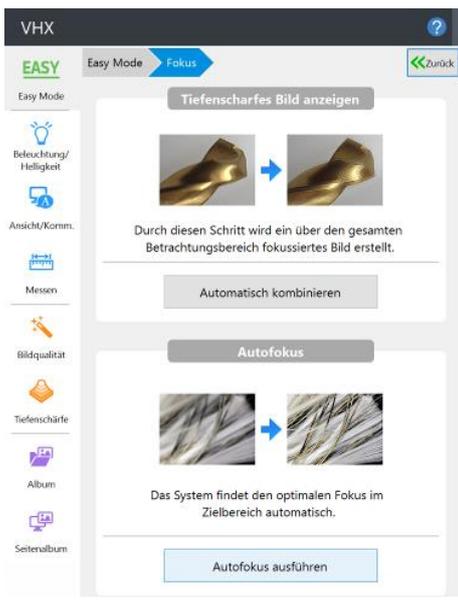
6.5 Anleitung Keyence Oberflächenrauheit



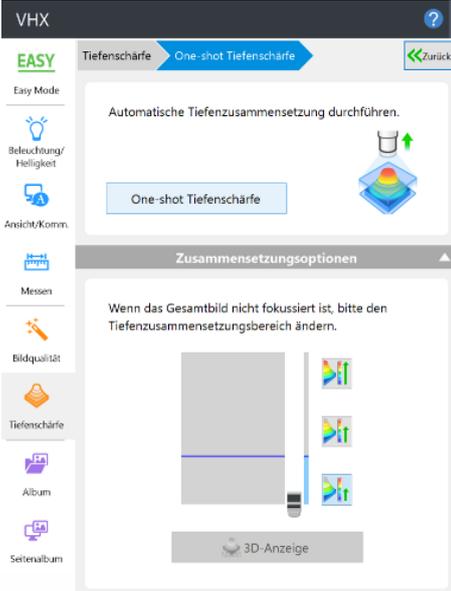
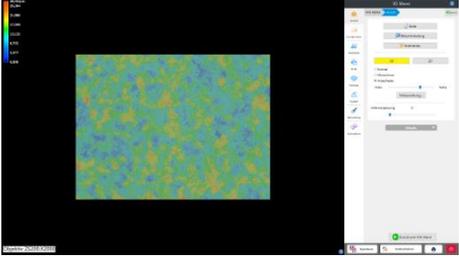
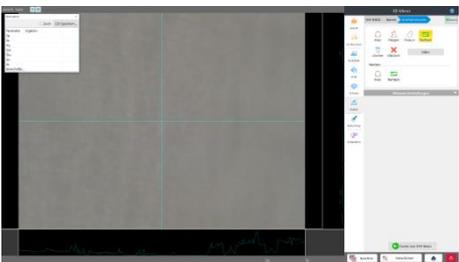
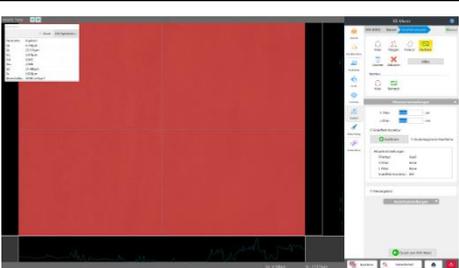
Einschalten des Digitalmikroskops VHX-970F (bestehend aus Mikroskop, Monitor und Konsole)



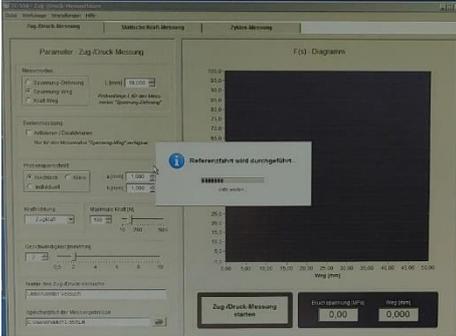
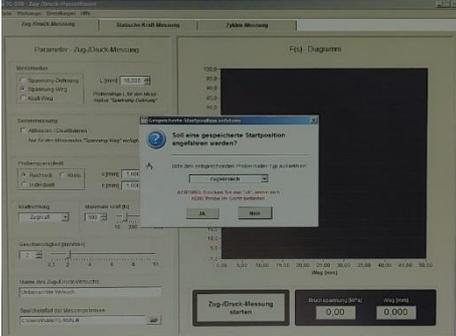
Probe auflegen

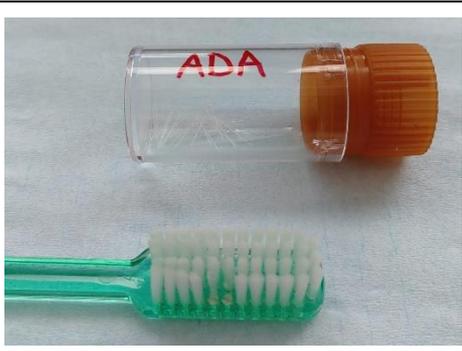
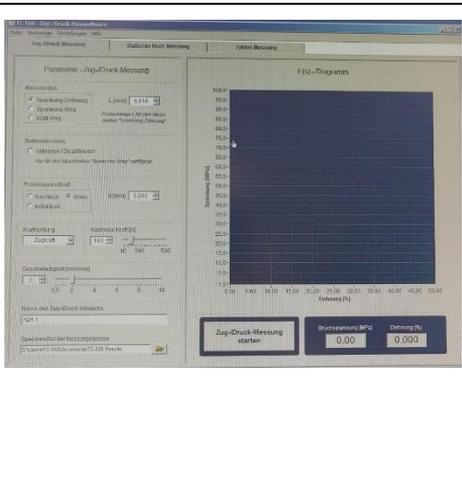


Fokus einstellen mit „Autofokus ausführen“

	Tiefenschärfe einstellen mit „One Shot Tiefenschärfe“
	3D-Anzeige mit Höhenprofil der Oberfläche
	Auswahl des Messbereichs für die Oberflächenrauheit mit dem Werkzeug „Rechteck“
	Anzeige der Messergebnisse Abspeichern der Daten als Exceltabelle

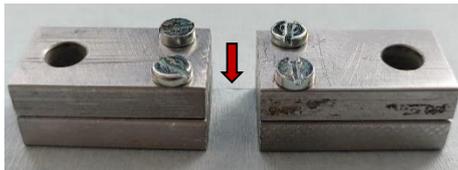
6.6 Anleitung Messung des E-Moduls der Borsten mittels des Mikrozugversuchs

	<p>Öffnen des Programmes TC-550 am Computer</p>
	<p>Einschalten des Zug-Druck-Prüfsystems TC-550 am Kippschalter</p>
	<p>Automatische Durchführung der Referenzfahrt</p>
	<p>Auswahl des Probenhaltertyps: Zugversuch</p>
	<p>Vorbereitung zur Borstenabtrennung: Skalpell, Zahnbürste, Pinzette und beschriftetes Gefäß für die abgetrennten Borsten</p>

	<p>Abtrennen der Borsten mit Skalpell und Pinzette mit anschließender Aufbewahrung in einem beschrifteten Gefäß</p>
	<p>Vorbereitung zum Mikrozugversuch:</p> <p>Schieblehre, Pinzette, Schraubenzieher, Borstengefäß und selbstangefertigte Schraubvorrichtung zur Befestigung einer Borste</p>
	<p>Parametereingabe:</p> <p>Messmodus: Spannung-Dehnung</p> <p>Probenquerschnitt: rund</p> <p>Kraftrichtung: Zugkraft</p> <p>Maximale Kraft [N]: 100</p> <p>Geschwindigkeit: 2 mm/min</p> <p>Name des Zug-Druck-Versuchs und Speicherpfad der Messergebnisse</p>
	<p>Messen des Borstendurchmessers mit der Schieblehre immer auf gleicher Höhe der Schieblehre „schwarzer Punkt“ für alle Borsten (siehe roter Pfeil),</p> <p>anschließendes Eintragen des Messergebnisses ins Programm bei d [mm] (hier 0,20 mm)</p>

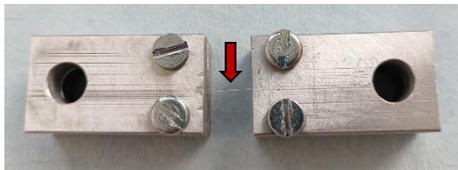


Aufschrauben der Vorrichtung zur Aufnahme einer einzelnen Borste



Festgeschraubte Vorrichtung links und rechts mit aufgenommener Borste (siehe roter Pfeil):

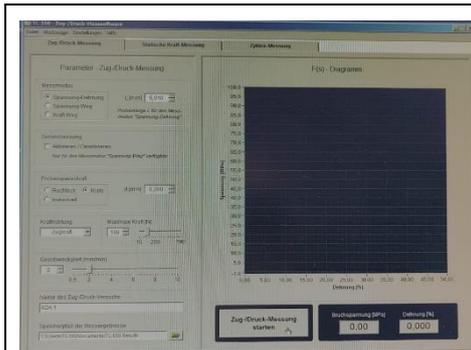
Borste gerade, senkrecht zur Schraubvorrichtung



Einbringen der Schraubvorrichtung in das Mikrozuggerät

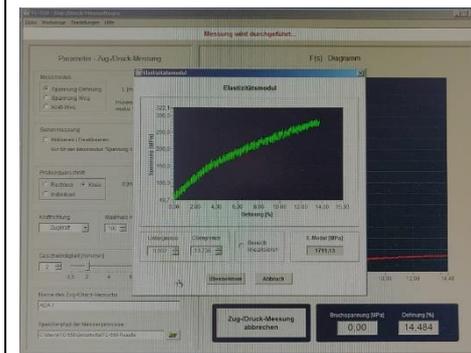


Messen der freien Borstenlänge,
anschließendes Eintragen des Messergebnisses ins
Programm bei L [mm] (hier: 6,91 mm)



Mikrozugversuch starten:

Anklicken „Zug-/Druck-Messung starten“

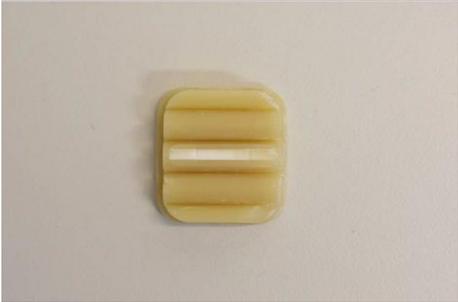


Messungsende:

Anzeige des Elastizitätsmoduls

Anklicken von „Übernehmen“ zum Öffnen des Messprotokolls

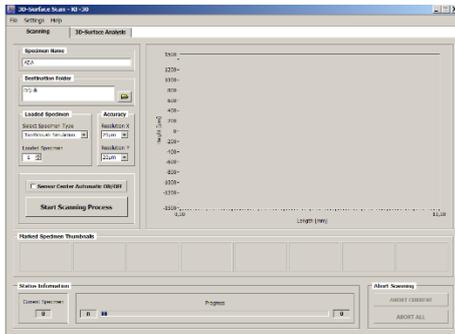
6.7 Anleitung Quantifizierung der Dentinabrasion: Laserscan

	<p>Probe für 30 min trocknen lassen</p>
	<p>Im Freien Auftragen von Entspiegelungsspray „MET-L-CHEK Developer D70“ auf die Probe:</p> <p>in einem Abstand von ca. 20 cm zur Probe, unter ständigem Sprühen die Düse senkrecht über die Probe bewegen, sodass eine dünne Schicht entsteht</p>
	<p>Probe kurz trocknen lassen und dünn eingesprühte Oberfläche nicht mehr berühren</p>
	<p>Laserscan KF-30 einschalten,</p> <p>anschließend den Computer hochfahren</p>



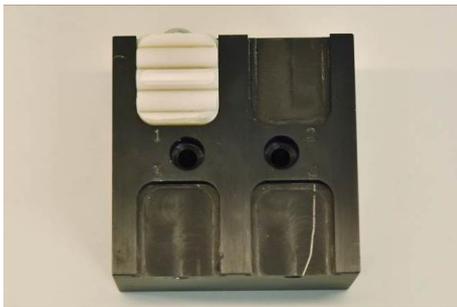
Öffnen des Programmes „KF-30“ am Computer:

Laserscan führt automatisch Referenzfahrt durch

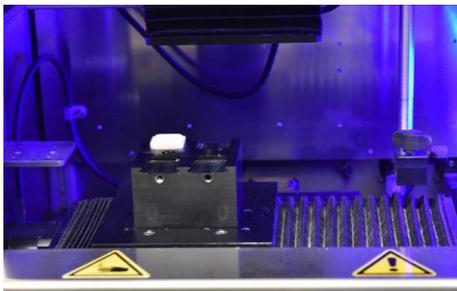


Probenbenennung und Auswahl von Voreinstellungen:

- Speicherort
- Probenart: „Zahnputzsimulation“
- Auflösung x und y: 20 µm
- Anzahl der Proben: maximal 4 Proben gleichzeitig

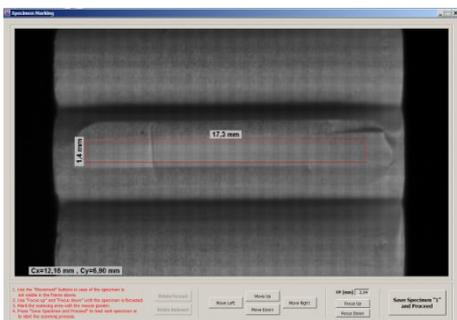


Befestigen von bis zu vier Prüfkörpern in metallischem Probenhalter



Einbringen des metallischen Probenhalters in die Kammer des Laserscans,

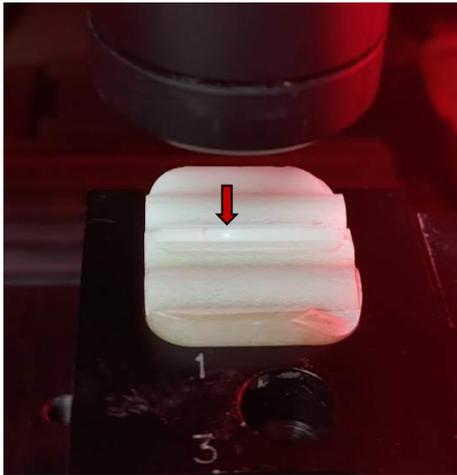
anschließend Auswahl „Start Scanning Process“ im Programm



Fokuseinstellung auf ca. 2 mm und

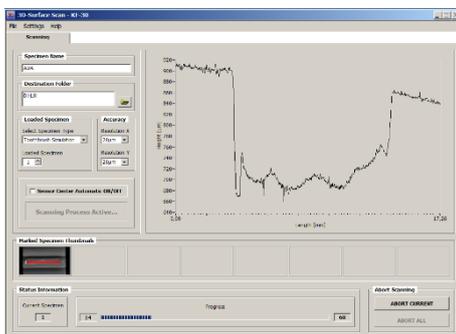
Auswahl des Messfensters auf der Dentinoberfläche (für jede Probe),

nach Anklicken „Save Specimen and Proceed“ startet der Laserscan

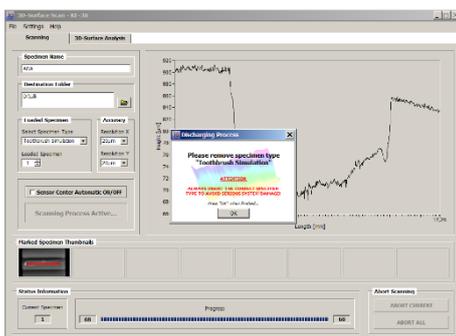


Zügiges visuelles Überprüfen des Laserstrahl nach Messungsstart:

kleiner scharfer Messpunkt auf der Dentinoberfläche sichtbar, dann vorsichtiges Schließen der Laserscanklappe



Im Programm erscheint der Scan des Messfensters als Höhenprofil



Messungsende: Aufforderung des Programmes die Proben zu entfernen

7. Literaturverzeichnis

1. Baruah, K., et al., *A Review on Toothbrushes and Tooth Brushing Methods. International Journal of Pharmaceutical Science Invention. Volume 6 Issue 5 || May 2017 || PP. 29-38.* International Journal of Pharmaceutical Sciences, 2017: p. 29-38.
2. Chong, M.P. and D.R. Beech, *Characteristics of toothbrushes.* Aust Dent J, 1983. **28**(4): p. 202-11.
3. Drisko, C., R. Henderson, and J. Yancy, *A review of current toothbrush bristle endo-rounding studies.* Compend Contin Educ Dent, 1995. **16**(7): p. 694, 696, 698; quiz 708.
4. Hawkins, B.F., et al., *Duration of toothbrushing for effective plaque control.* Quintessence Int, 1986. **17**(6): p. 361-5.
5. Husseini, A., D.E. Slot, and G.A. Van der Weijden, *The efficacy of oral irrigation in addition to a toothbrush on plaque and the clinical parameters of periodontal inflammation: a systematic review.* Int J Dent Hyg, 2008. **6**(4): p. 304-14.
6. Macgregor, I.D. and A.J. Rugg-Gunn, *Survey of toothbrushing duration in 85 uninstructed English schoolchildren.* Community Dent Oral Epidemiol, 1979. **7**(5): p. 297-8.
7. Saxer, U., J. Barbakow, and S. Yankell, *New studies on estimated and actual toothbrushing time and dentifrice use.* The Journal of clinical dentistry, 1998. **9**: p. 49-51.
8. Zimmer S Fau - Bizhang, M. and M. Bizhang, *Die häusliche kontrollierte Mundhygiene mit Zahncreme, Mundspülung und Co. – Eine Standortbestimmung FAU - Zimmer, Stefan.* (0033-6580 (Print)).
9. Klotz, S., *Klinisch-experimentelle Studie zweier Zahnbürsten im Vergleich über die Wirksamkeit in Bezug auf Gingivitisreduktion und Plaquereduktion an Zahnoberflächen, in LMU München.* 2009.
10. Dörfer, C.E. and H.J. Staehle, *Strategien der häuslichen Plaquekontrolle.* Zahnmedizin up2date, 2010. **4**(3).
11. Chadwick, B., et al., *Preventative behaviour and risks to oral health.* Adult Dental Health Survey 2009, 2011: p. 1-44.
12. BP Europa SE. *Vom Rohöl zur Zahnbürste.* n.d. [cited 2022 19.09.2022]; Available from: https://www.bp.com/de_de/germany/home/wer-wir-sind/bp-in-deutschland/raffineriegeschaeft/erdoel-im-alltag/vom-rohoel-zur-zahnbuerste.html.
13. Petersen, P.E., *The World Oral Health Report 2003: continuous improvement of oral health in the 21st century--the approach of the WHO Global Oral Health Programme.* Community Dent Oral Epidemiol, 2003. **31 Suppl 1**: p. 3-23.
14. Bowen, W.H., et al., *Oral Biofilms: Pathogens, Matrix, and Polymicrobial Interactions in Microenvironments.* Trends Microbiol, 2018. **26**(3): p. 229-242.
15. Mathur, V.P. and J.K. Dhillon, *Dental Caries: A Disease Which Needs Attention.* Indian J Pediatr, 2018. **85**(3): p. 202-206.
16. Kidd, E.A. and O. Fejerskov, *What constitutes dental caries? Histopathology of carious enamel and dentin related to the action of cariogenic biofilms.* J Dent Res, 2004. **83 Spec No C**: p. C35-8.
17. Hellwig, E. and M. Altenburger, *[Paradigm shift in conservative dentistry: from a mechanistic to a prevention-oriented perception].* Bundesgesundheitsblatt Gesundheitsforschung Gesundheitsschutz, 2011. **54**(9): p. 1015-21.
18. Kidd, E., O. Fejerskov, and B. Nyvad, *Infected Dentine Revisited.* Dent Update, 2015. **42**(9): p. 802-6, 808-9.
19. Fejerskov, O., *Concepts of dental caries and their consequences for understanding the disease.* Community Dent Oral Epidemiol, 1997. **25**(1): p. 5-12.
20. Selwitz, R.H., A.I. Ismail, and N.B. Pitts, *Dental caries.* Lancet, 2007. **369**(9555): p. 51-9.
21. Haak, R. and J. Kühnisch, *Visuelle Kariesdiagnostik mit ICDAS.* Die Quintessenz, 2011. **62**: p. 1425-1430.

22. Loe, H., E. Theilade, and S.B. Jensen, *EXPERIMENTAL GINGIVITIS IN MAN*. J Periodontol, 1965. **36**: p. 177-87.
23. Ericsson, I., et al., *Experimental periodontal breakdown in the dog*. Scand J Dent Res, 1975. **83**(3): p. 189-92.
24. Genco, R.J. and W.S. Borgnakke, *Risk factors for periodontal disease*. Periodontol 2000, 2013. **62**(1): p. 59-94.
25. Hellwig, E., et al., *Einführung in die Zahnerhaltung: Prüfungswissen Kariologie und Parodontologie*. 7 ed. 2018, Köln: Deutscher Zahnärzte Verlag.
26. Lindhe, J., S. Hamp, and H. Loe, *Experimental periodontitis in the beagle dog*. J Periodontal Res, 1973. **8**(1): p. 1-10.
27. Moore, W.E., et al., *Bacteriology of experimental gingivitis in young adult humans*. Infect Immun, 1982. **38**(2): p. 651-67.
28. Moore, W.E., et al., *Bacteriology of experimental gingivitis in children*. Infect Immun, 1984. **46**(1): p. 1-6.
29. Chapple, I.L., et al., *Primary prevention of periodontitis: managing gingivitis*. J Clin Periodontol, 2015. **42 Suppl 16**: p. S71-6.
30. Papapanou, P.N., et al., *Periodontitis: Consensus report of workgroup 2 of the 2017 World Workshop on the Classification of Periodontal and Peri-Implant Diseases and Conditions*. J Periodontol, 2018. **89 Suppl 1**: p. S173-s182.
31. Graetz, C., M. Keschull, and B. Dannewitz, *S3-Leitlinie „Die Behandlung von Parodontitis Stadium I-III“ – Die vierte Therapiestufe – Sicherung des Therapieerfolgs*. Zahnärztliche Mitteilungen, 2021. **111**: p. 48-54.
32. World Health Organization. *World Health Assembly Resolution paves the way for better oral health care*. 2021; Available from: <https://www.who.int/news/item/27-05-2021-world-health-assembly-resolution-paves-the-way-for-better-oral-health-care>.
33. Frencken, J.E., et al., *Global epidemiology of dental caries and severe periodontitis - a comprehensive review*. J Clin Periodontol, 2017. **44 Suppl 18**: p. S94-s105.
34. Addy, M., M.A. Slayne, and W.G. Wade, *The formation and control of dental plaque--an overview*. J Appl Bacteriol, 1992. **73**(4): p. 269-78.
35. Abdellatif, H.M. and B.A. Burt, *An epidemiological investigation into the relative importance of age and oral hygiene status as determinants of periodontitis*. J Dent Res, 1987. **66**(1): p. 13-8.
36. Loe, H., *Oral hygiene in the prevention of caries and periodontal disease*. Int Dent J, 2000. **50**(3): p. 129-39.
37. World Health Organization. *Oral Health*. 2022 05.07.2022; Available from: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/oral-health>.
38. Institut der Deutschen Zahnärzte [IDZ], A.R. Jordan, and W. Micheelis, eds. *Deutsche Mundgesundheitsstudie V*. Vol. 2014. 2016, Deutscher Zahnärzte Verlag DÄV: Köln.
39. Eick, S., *Biofilms*. Monogr Oral Sci, 2021. **29**: p. 1-11.
40. Aas, J.A., et al., *Defining the normal bacterial flora of the oral cavity*. J Clin Microbiol, 2005. **43**(11): p. 5721-32.
41. Lehmann, K.M., E. Hellwig, and H.J. Wenz, *Zahnärztliche Propädeutik: Einführung in die Zahnheilkunde ; mit 32 Tabellen*. 2012: Dt. Zahnärzte-Verlag.
42. Marsh, P.D. and D.J. Bradshaw, *Dental plaque as a biofilm*. J Ind Microbiol, 1995. **15**(3): p. 169-75.
43. Kreth, J., J. Merritt, and F. Qi, *Bacterial and host interactions of oral streptococci*. DNA Cell Biol, 2009. **28**(8): p. 397-403.
44. Graetz, C., et al., *Häusliches mechanisches Biofilmmangement in der Prävention und Therapie der Gingivitis*. Parodontologie (Berlin, Germany), 2018. **29**: p. 4.

45. Sälzer, S., et al., *Efficacy of inter-dental mechanical plaque control in managing gingivitis-a meta-review*. J Clin Periodontol, 2015. **42 Suppl 16**: p. S92-105.
46. Sicilia, A., et al., *A systematic review of powered vs manual toothbrushes in periodontal cause-related therapy*. J Clin Periodontol, 2002. **29 Suppl 3**: p. 39-54; discussion 90-1.
47. Deutsches Institut für Normung e.V., ed. *DIN 50 320: Verschleiß - Begriffe, Systemanalyse von Verschleißvorgängen, Gliederung des Verschleißgebietes*. 1979.
48. Mair, L.H., *Wear in dentistry--current terminology*. J Dent, 1992. **20**(3): p. 140-4.
49. Deters, L., *Grundsätzliches zu Reibung und Verschleiss in der technischen Anwendung*. Magdeburger Wissenschaftsjournal, 2004. **1**: p. 16-26.
50. *Chapter 4 Classification of Wear Processes*, in *Tribology Series*, K.-H.Z. Gahr, Editor. 1987, Elsevier. p. 80-131.
51. Shellis, R.P. and M. Addy, *The interactions between attrition, abrasion and erosion in tooth wear*. Monogr Oral Sci, 2014. **25**: p. 32-45.
52. Tomasik, M., [*Analysis of etiological factors involved in noncarious cervical lesions*]. Ann Acad Med Stetin, 2006. **52**(3): p. 125-36.
53. Roberts, W.E., J.E. Mangum, and P.M. Schneider, *Pathophysiology of Demineralization, Part I: Attrition, Erosion, Abfraction, and Noncarious Cervical Lesions*. Curr Osteoporos Rep, 2022. **20**(1): p. 90-105.
54. Sperber, G.H., *Dental Wear: Attrition, Erosion, and Abrasion-A Palaeo-Odontological Approach*. Dent J (Basel), 2017. **5**(2).
55. Pickles, M.J., *Tooth wear*. Monogr Oral Sci, 2006. **19**: p. 86-104.
56. Kontaxopoulou, I. and S. Alam, *Risk Assessment for Tooth Wear*. Prim Dent J, 2015. **4**(3): p. 25-9.
57. Hunter, M.L., et al., *The role of toothpastes and toothbrushes in the aetiology of tooth wear*. International Dental Journal, 2002. **52**: p. 399-405.
58. Kaidonis, J.A., *Tooth wear: the view of the anthropologist*. Clin Oral Investig, 2008. **12 Suppl 1**(Suppl 1): p. S21-6.
59. Imfeld, C. and A. Lussi, *Tooth wear (Teil 1) Nicht-kariesbedingte Zahnhartsubstanzverluste*. Swiss Dent J, 2017. **127**(7-8): p. 640-641.
60. Emmanuel, D.I. and P. Saulue, *Understanding dental wear*. Journal of dentofacial anomalies and orthodontics, 2012. **15**: p. 19p.
61. Addy, M. and M.L. Hunter, *Can tooth brushing damage your health? Effects on oral and dental tissues*. Int Dent J, 2003. **53 Suppl 3**: p. 177-86.
62. Kunzelmann, K.-H., *Verschleißanalyse und Quantifizierung von Füllungsmaterialien in vivo und in vitro*. Verschleißsimulation in-vitro. 1998, Aachen: Shaker Verlag.
63. Smith, B.G., *Toothwear: aetiology and diagnosis*. Dent Update, 1989. **16**(5): p. 204-12.
64. ten Cate, J.M. and T. Imfeld, *Dental erosion, summary*. Eur J Oral Sci, 1996. **104**(2 (Pt 2)): p. 241-4.
65. Pindborg, J.J., *Pathology of the dental hard tissues*. 1970, Copenhagen: Munksgaard.
66. Shellis, R.P., et al., *Methodology and models in erosion research: discussion and conclusions*. Caries Res, 2011. **45 Suppl 1**: p. 69-77.
67. Saads Carvalho, T. and A. Lussi, *Chapter 9: Acidic Beverages and Foods Associated with Dental Erosion and Erosive Tooth Wear*. Monogr Oral Sci, 2020. **28**: p. 91-98.
68. Eccles, J.D. and W.G. Jenkins, *Dental erosion and diet*. J Dent, 1974. **2**(4): p. 153-9.
69. Shaw, L. and A. Smith, *Erosion in children: an increasing clinical problem?* Dent Update, 1994. **21**(3): p. 103-6.
70. Jaeggi, T. and A. Lussi, *Prevalence, incidence and distribution of erosion*. Monogr Oral Sci, 2014. **25**: p. 55-73.

71. Deshpande, S.D. and S.M. Hugar, *Dental erosion in children : an increasing clinical problem*. J Indian Soc Pedod Prev Dent, 2004. **22**(3): p. 118-27.
72. Hasselkvist, A., A. Johansson, and A.K. Johansson, *Dental erosion and soft drink consumption in Swedish children and adolescents and the development of a simplified erosion partial recording system*. Swed Dent J, 2010. **34**(4): p. 187-95.
73. Johansson, A.K., et al., *Dental erosion and its growing importance in clinical practice: from past to present*. Int J Dent, 2012. **2012**: p. 632907.
74. Grippo, J.O., *Abfractions: a new classification of hard tissue lesions of teeth*. J Esthet Dent, 1991. **3**(1): p. 14-9.
75. Kitchin, P.C., *The Prevalence of Tooth Root Exposure, and the Relation of the Extent of Such Exposure to the Degree of Abrasion in Different Age Classes*. Journal of Dental Research, 1941. **20**(6): p. 565-581.
76. Epstein, S. and M.L. Tainter, *The Relationship of Particle Size and other Properties of Dentifrice Ingredients to Toothbrush-Abrasion of Enamel*. Journal of Dental Research, 1943. **22**(4): p. 335-344.
77. Sangnes, G., *Traumatization of teeth and gingiva related to habitual tooth cleaning procedures*. J Clin Periodontol, 1976. **3**(2): p. 94-103.
78. Sangnes, G. and P. Gjermo, *Prevalence of oral soft and hard tissue lesions related to mechanical toothcleansing procedures*. Community Dent Oral Epidemiol, 1976. **4**(2): p. 77-83.
79. Khan, F., W.G. Young, and T.J. Daley, *Dental erosion and bruxism. A tooth wear analysis from south east Queensland*. Aust Dent J, 1998. **43**(2): p. 117-27.
80. Lussi, A. and M. Schaffner, *Progression of and risk factors for dental erosion and wedge-shaped defects over a 6-year period*. Caries Res, 2000. **34**(2): p. 182-7.
81. Wiegand, A. and N. Schlueter, *The role of oral hygiene: does toothbrushing harm?* Monogr Oral Sci, 2014. **25**: p. 215-9.
82. Hand, J.S., R.J. Hunt, and J.W. Reinhardt, *The prevalence and treatment implications of cervical abrasion in the elderly*. Gerodontics, 1986. **2**(5): p. 167-70.
83. Gillette, W.B. and R.L. Van House, *Ill effects of improper oral hygiene procedure*. J Am Dent Assoc, 1980. **101**(3): p. 476-80.
84. Wiegand, A., et al., *Brushing force of manual and sonic toothbrushes affects dental hard tissue abrasion*. Clin Oral Investig, 2013. **17**(3): p. 815-22.
85. Harte, D.B. and R.S. Manly, *Effect of toothbrush variables on wear of dentin produced by four abrasives*. J Dent Res, 1975. **54**(5): p. 993-8.
86. Brandini, D.A., et al., *Noncarious cervical lesions and their association with toothbrushing practices: in vivo evaluation*. Oper Dent, 2011. **36**(6): p. 581-9.
87. Bass, C.C., *The optimum characteristics of toothbrushes for personal oral hygiene*. Dent Items Interest, 1948. **70**(7): p. 697-718.
88. Turssi, C.P., et al., *Brushing abrasion of dentin: effect of diluent and dilution rate of toothpaste*. Am J Dent, 2010. **23**(5): p. 247-50.
89. Franzò, D., et al., *The effect of toothpaste concentration on enamel and dentine wear in vitro*. J Dent, 2010. **38**(12): p. 974-9.
90. Wiegand, A., et al., *Impact of toothpaste slurry abrasivity and toothbrush filament stiffness on abrasion of eroded enamel - an in vitro study*. Acta Odontol Scand, 2008. **66**(4): p. 231-5.
91. Voronets, J., et al., *Controlled toothbrush abrasion of softened human enamel*. Caries Res, 2008. **42**(4): p. 286-90.
92. Tellefsen, G., et al., *The role of the toothbrush in the abrasion process*. Int J Dent Hyg, 2011. **9**(4): p. 284-90.

93. Turssi, C.P., et al., *Interplay between toothbrush stiffness and dentifrice abrasivity on the development of non-carious cervical lesions*. Clin Oral Investig, 2019. **23**(9): p. 3551-3556.
94. Hellwege, K.-D., ed. *Die Praxis der zahnmedizinischen Prophylaxe. Ein Leitfaden für die Individualprophylaxe, Gruppenprophylaxe und Initiale Parodontaltherapie*. 3 ed. 1994, Hüthig Buch Verlage Heidelberg: Heidelberg.
95. Sauerwein, E., *Traktat über die Zahnbürste*. Deutsche Zahnärztliche Zeitschrift, 1962. **17**(3): p. 121-134.
96. Koch, C.A., T.M. Ausschill, and N.B. Arweiler, *Wann sollte eine Zahnbürste ausgewechselt werden?* Oralprophylaxe Kinderzahnheilkd, 2007. **29**: p. 150-158.
97. Dr. Best. *Dr. Best Green Clean*. 2022 07.06.2022 [cited 2022 07.06. 2022]; Available from: <https://www.dr-best.de/zahnbuersten/green-clean/>.
98. drogerie markt GmbH + Co. KG. *Alverde NATURKOSMETIK Zahnbürste aus Holz*. 2022 07.06.2022 [cited 2022 07.06.2022]; Available from: https://www.dm.de/alverde-naturkosmetik-zahnbuerste-aus-holz-medium-p4058172627651.html?wt_mc=pla.google.Gesundheit.Zahnpflege.Zahnbuerste.alverde.NATURKOSMETIK.4058172627651&hc_tid=10231506C4751PPC&gclid=EAlaIqobChMIvf7xi-2b-AIVUQKLCh1V3QbKEAYASABEgly1_D_BwE.
99. Dirk Rossmann GmbH. *Prokudent Recycling Zahnbürste*. 2022 07.06.2022 [cited 2022 07.06.2022]; Available from: <https://www.rossmann.de/de/gesundheit-prokudent-recycling-zahnbuerste-mittel/p/4305615757230>.
100. American Dental Association. *Statement on Toothbrush Care*. 07.02.2022]; Available from: <https://www.ada.org/resources/research/science-and-research-institute/oral-health-topics/toothbrushes>.
101. Glaze, P.M. and A.B. Wade, *Toothbrush age and wear as it relates to plaque control*. J Clin Periodontol, 1986. **13**(1): p. 52-6.
102. Kreifeldt, J.G., P.H. Hill, and L.J. Calisti, *A systematic study of the plaque removal efficiency of worn toothbrushes*. J Dent Res, 1980. **59**(12): p. 2047-55.
103. Rawls, H.R., et al., *The measurement of toothbrush wear*. J Dent Res, 1989. **68**(12): p. 1781-5.
104. Conforti, N.J., et al., *An investigation into the effect of three months' clinical wear on toothbrush efficacy: results from two independent studies*. J Clin Dent, 2003. **14**(2): p. 29-33.
105. Van Leeuwen, M.P.C., et al., *Toothbrush wear in relation to toothbrushing effectiveness*. International Journal of Dental Hygiene, 2019. **17**(1): p. 77-84.
106. Muller-Bolla, M., et al., *Manual toothbrush wear and consequences on plaque removal*. J Clin Dent, 2007. **18**(3): p. 73-8.
107. Rawls, H., et al., *The Measurement of Toothbrush Wear*. Journal of dental research, 1990. **68**: p. 1781-5.
108. Ledder, R.G., et al., *Visualization and Quantification of the Oral Hygiene Effects of Brushing, Dentifrice Use, and Brush Wear Using a Tooth Brushing Simulator*. Front Public Health, 2019. **7**: p. 91.
109. Warren, P.R., et al., *A clinical investigation into the effect of toothbrush wear on efficacy*. J Clin Dent, 2002. **13**(3): p. 119-24.
110. Sforza, N.M., et al., *Plaque removal by worn toothbrush*. J Clin Periodontol, 2000. **27**(3): p. 212-6.
111. Tan, E. and C. Daly, *Comparison of new and 3-month-old toothbrushes in plaque removal*. J Clin Periodontol, 2002. **29**(7): p. 645-50.
112. Hogan, L.M., C.G. Daly, and B.H. Curtis, *Comparison of new and 3-month-old brush heads in the removal of plaque using a powered toothbrush*. J Clin Periodontol, 2007. **34**(2): p. 130-6.

113. Ziebolz, D., et al., *Eine Untersuchung gebrauchter Handzahnbürsten – Ergebnisse einer Umtauschaktion*. Oralprophylaxe Kinderzahnheilkd, 2006. **28**: p. 54-59.
114. Daly, C.G., C.C. Chapple, and A.C. Cameron, *Effect of toothbrush wear on plaque control*. J Clin Periodontol, 1996. **23**(1): p. 45-9.
115. Hegde, P.P., K.B. Ashok, and A.V. Ankola, *Toothbrush age, wear, and plaque control*. Indian J Dent Res, 2005. **16**(2): p. 61-4.
116. Zoller, M.J., et al., *Interplay Between the In-Vitro Cleaning Performance and Wear of Manual Toothbrushes*. Oral Health Prev Dent, 2022. **20**(1): p. 457-464.
117. Ankola, A.V., M. Hebbal, and S. Eshwar, *How clean is the toothbrush that cleans your tooth?* Int J Dent Hyg, 2009. **7**(4): p. 237-40.
118. Taji, S.S. and A.H. Rogers, *ADRF Trebitsch Scholarship. The microbial contamination of toothbrushes. A pilot study*. Aust Dent J, 1998. **43**(2): p. 128-30.
119. Morris, D.W., et al., *Microbial contamination of power toothbrushes: a comparison of solid-head versus hollow-head designs*. J Dent Hyg, 2014. **88**(4): p. 237-42.
120. Bunetel, L., et al., *In vitro evaluation of the retention of three species of pathogenic microorganisms by three different types of toothbrush*. Oral Microbiol Immunol, 2000. **15**(5): p. 313-6.
121. Mehta, A., P.S. Sequeira, and G. Bhat, *Bacterial contamination and decontamination of toothbrushes after use*. N Y State Dent J, 2007. **73**(3): p. 20-2.
122. Goldsmith, R.N., et al., *Toothbrush bristle wear and adherence of Streptococcus mutans*. Pediatr Dent, 2007. **29**(3): p. 243-7.
123. Peker, I., et al., *Knowledge and behavior of dentists in a dental school regarding toothbrush disinfection*. Braz Oral Res, 2015. **29**: p. 48.
124. B.R. Pugh, *Toothbrush wear, brushing forces and cleaning performance* J Soc Cosmet Chem, 1978. **29**(7): p. 423-431.
125. Massassati, A. and R.M. Frank, *Scanning electron microscopy of unused and used manual toothbrushes*. J Clin Periodontol, 1982. **9**(2): p. 148-61.
126. McLey, L., R.L. Boyd, and S. Sarker, *Clinical and laboratory evaluation of powered electric toothbrushes: relative degree of bristle end-rounding*. J Clin Dent, 1997. **8**(3 Spec No): p. 86-90.
127. Gundavarapu, K., R. Ss, and D. Dicksit, *An investigation into toothbrush wear related to months of use among university students*. 2015. **49**: p. 74-78.
128. Leeuwen, M., et al., *Toothbrush Wear in Relation to Tooth Brushing Effectiveness*. International Journal of Dental Hygiene, 2018. **17**.
129. Rawls, H.R., R. Casella, and N.J. Mkwai-Tulloch, *An in vitro and in vivo study of toothbrush bristle splaying*. J Dent Res, 1993. **72**(5): p. 947-52.
130. Turssi, C.P., B. De Moraes Purquerio, and M.C. Serra, *Wear of dental resin composites: insights into underlying processes and assessment methods--a review*. J Biomed Mater Res B Appl Biomater, 2003. **65**(2): p. 280-5.
131. De Gee, A.J., P. Pallav, and C.L. Davidson, *Effect of abrasion medium on wear of stress-bearing composites and amalgam in vitro*. J Dent Res, 1986. **65**(5): p. 654-8.
132. Pallav, P., C.L. Davidson, and A.J. de Gee, *Wear rates of composites, an amalgam, and enamel under stress-bearing conditions*. J Prosthet Dent, 1988. **59**(4): p. 426-9.
133. Gnauck Dr. med. dent., M., *Methodenkritische Untersuchung zur Abrasionssimulation von Kompositen*. 2005.
134. Krejci, I., et al., *[An in vitro test procedure for evaluating dental restoration systems. 1. A computer-controlled mastication simulator]*. Schweiz Monatsschr Zahnmed, 1990. **100**(8): p. 953-60.

135. Ramalho, A. and P.V. Antunes, *Reciprocating wear test of dental composites against human teeth and glass*. 2007. **263**(7-12): p. 1095-1104.
136. DeLong, R. and W.H. Douglas, *Development of an artificial oral environment for the testing of dental restoratives: bi-axial force and movement control*. J Dent Res, 1983. **62**(1): p. 32-6.
137. Lambrechts, P., et al., *How to simulate wear? Overview of existing methods*. Dent Mater, 2006. **22**(8): p. 693-701.
138. Bizhang, M., et al., *Toothbrush abrasivity in a long-term simulation on human dentin depends on brushing mode and bristle arrangement*. PLoS One, 2017. **12**(2): p. e0172060.
139. Volpenhein, D.W., et al., *A comparative evaluation of the in vitro penetration performance of the improved Crest complete toothbrush versus the Current Crest complete toothbrush, the Colgate Precision toothbrush and the Oral-B P40 toothbrush*. J Clin Dent, 1996. **7**(1): p. 21-5.
140. Heath, J.R. and H.J. Wilson, *Abrasion of restorative materials by toothpaste*. J Oral Rehabil, 1976. **3**(2): p. 121-38.
141. de Gee, A.J., H.C. ten Harkel-Hagenaar, and C.L. Davidson, *Structural and physical factors affecting the brush wear of dental composites*. J Dent, 1985. **13**(1): p. 60-70.
142. Momoi, Y., et al., *In vitro toothbrush-dentifrice abrasion of resin-modified glass ionomers*. Dent Mater, 1997. **13**(2): p. 82-8.
143. Wiegand, A., F. Lemmrich, and T. Attin, *Influence of rotating-oscillating, sonic and ultrasonic action of power toothbrushes on abrasion of sound and eroded dentine*. J Periodontal Res, 2006. **41**(3): p. 221-7.
144. Syndicad. *Bürstsimulation* 2015 04.02.2022]; Available from: <http://dentalforschung.de/Produkte/Forschungsgerate/Burstsimulation/burstsimulation.html>.
145. Bark, J., *Quantifizierung der Dentin-Abrasion am menschlichen Zahn - methodische Überlegungen und experimentelle In-vitro-Studien unter Verwendung von Zahnbürsten und einer "Zahnputz-Maschine"*, in Poliklinik für Zahnerhaltung und Parodontologie der Ludwig-Maximilians-Universität München. 2006.
146. Dehghan, M., et al., *Protocol for measurement of enamel loss from brushing with an anti-erosive toothpaste after an acidic episode*. Gen Dent, 2017. **65**(4): p. 63-68.
147. Fais, L.M., et al., *Titanium surface topography after brushing with fluoride and fluoride-free toothpaste simulating 10 years of use*. J Dent, 2012. **40**(4): p. 265-75.
148. Schneider, T.J., *In-vitro-Untersuchungen zum Verschleiß von Dentalkeramiken und Zahnhartsubstanz, in LMU München*. 2009.
149. Sorensen, J.A. and H.K. Nguyen, *Evaluation of toothbrush-induced dentin substrate wear using an in vitro ridged-configuration model*. Am J Dent, 2002. **15 Spec No**: p. 26b-32b.
150. Jang, Y., et al., *Dentin wear after simulated toothbrushing with water, a liquid dentifrice or a standard toothpaste*. Am J Dent, 2015. **28**(6): p. 333-6.
151. Wiegand, A., et al., *Abrasion of eroded dentin caused by toothpaste slurries of different abrasivity and toothbrushes of different filament diameter*. J Dent, 2009. **37**(6): p. 480-4.
152. Moore, C. and M. Addy, *Wear of dentine in vitro by toothpaste abrasives and detergents alone and combined*. J Clin Periodontol, 2005. **32**(12): p. 1242-6.
153. AlShehab, A., et al., *Effect of bristle stiffness of manual toothbrushes on normal and demineralized human enamel—An in vitro profilometric study*. International Journal of Dental Hygiene, 2018. **16**(2): p. e128-e132.
154. AlAli, M., N. Silikas, and J. Satterthwaite, *The Effects of Toothbrush Wear on the Surface Roughness and Gloss of Resin Composites with Various Types of Matrices*. Dent J (Basel), 2021. **9**(1).

155. Sulaiman, T.A., et al., *Time-lasting ceramic stains and glaze: A toothbrush simulation study*. J Esthet Restor Dent, 2020. **32**(6): p. 581-585.
156. Labban, N., et al., *Influence of Toothbrush Abrasion and Surface Treatments on Roughness and Gloss of Polymer-Infiltrated Ceramics*. Polymers (Basel), 2021. **13**(21).
157. Oliveira, L.V., et al., *The effect of brushing on surface roughness of denture lining materials*. J Prosthodont, 2007. **16**(3): p. 179-84.
158. Takahashi, R., et al., *Surface characterization of current composites after toothbrush abrasion*. Dent Mater J, 2013. **32**(1): p. 75-82.
159. Suzuki, T., et al., *Resistance of nanofill and nanohybrid resin composites to toothbrush abrasion with calcium carbonate slurry*. Dent Mater J, 2009. **28**(6): p. 708-16.
160. Silverstone, L.M. and M.J. Featherstone, *Examination of the end rounding pattern of toothbrush bristles using scanning electron microscopy: a comparison of eight toothbrush types*. Gerodontics, 1988. **4**(2): p. 45-62.
161. Meyer-Lueckel, H., et al., *Bristle end-rounding in toothbrushes: a comparison of different evaluation techniques, bristle position and viewing angle*. J Clin Dent, 2004. **15**(1): p. 22-7.
162. Mulry, C.A., et al., *A comparison of the end-rounding of nylon bristles in commercial toothbrushes: Crest Complete and Oral-B*. J Clin Dent, 1992. **3**(2): p. 47-50.
163. Checchi, L., et al., *Toothbrush filaments end-rounding: stereomicroscope analysis*. J Clin Periodontol, 2001. **28**(4): p. 360-4.
164. Checchi, L., et al., *The electric toothbrush: analysis of filaments under stereomicroscope*. J Clin Periodontol, 2004. **31**(8): p. 639-42.
165. Lee, H.S., et al., *Evaluation of the bristle end-rounding patterns of children's toothbrushes using scanning electron microscopy and stereomicroscopy*. Int J Dent Hyg, 2017. **15**(2): p. 120-127.
166. Dellerman, P.A., T.A. Burkett, and K.M. Kreyling, *A comparative evaluation of the percent acceptable end-rounded bristles: Butler G.U.M., Colgate Plus, Crest Complete, and Reach*. J Clin Dent, 1994. **5**(2): p. 38-45.
167. Thomas Imfeld, Beatrice Sener, and I. Simonovic, *In-Vitro-Untersuchung der mechanischen Wirkung von handelsüblichen Handzahnbürsten*. Acta Med Dent Helv 4 2000: p. 37-47.
168. Turgut, M.D., et al., *Number, length and end-rounding quality of bristles in manual child and adult toothbrushes*. Int J Paediatr Dent, 2011. **21**(3): p. 232-9.
169. Henschke, B., D.E. Lange, and J. Vahl, *[Comparative scanning electron microscopic studies on toothbrushes with plastic and natural bristles]*. Dtsch Zahnarzt Z, 1978. **33**(3): p. 220-2.
170. Reiter, C. and W.E. Wetzel, *[The finishing of the bristle ends in interdental brushes]*. Schweiz Monatsschr Zahnmed, 1991. **101**(4): p. 431-7.
171. Franchi, M. and L. Checchi, *Temperature dependence of toothbrush bristle morphology. An ultrastructural study*. J Clin Periodontol, 1995. **22**(8): p. 655-8.
172. Meyer-Lueckel, H., A.S. Rieben, and A.M. Kielbassa, *Filament end-rounding quality in electric toothbrushes*. J Clin Periodontol, 2005. **32**(1): p. 29-32.
173. Jung, M., C. Koçkapan, and W.E. Wetzel, *Bristle end rounding of manual toothbrushes and reproducibility of end rounding classification*. Am J Dent, 2003. **16**(5): p. 299-304.
174. Jung, M., et al., *Quality of bristle end-rounding on replaceable heads of powered toothbrushes*. J Clin Periodontol, 2005. **32**(6): p. 604-9.
175. Soydan, N., *Die Qualität der Borstenabrundung bei Wechselköpfen elektrischer Erwachsenen-Zahnbürsten*. 2008, Universitätsbibliothek: Gießen.
176. Voelker, M.A., et al., *Catalogue of tooth brush head designs*. J Dent Hyg, 2013. **87**(3): p. 118-33.

177. Althaus, D., C. Koçkapan, and W.E. Wetzel, [*Bristle end rounding and anchoring in children's toothbrushes*]. Schweiz Monatsschr Zahnmed, 1990. **100**(2): p. 159-64.
178. Adriaens, P.A., T.M. Seynhaeve, and J.A. De Boever, *A morphologic and SEM investigation of 58 toothbrushes*. Clin Prev Dent, 1985. **7**(5): p. 8-16.
179. Rehman, A., et al., *Analysis of bristle design of commercially available tooth brushes by using scanning electron microscope*. J Pak Med Assoc, 2020. **70**(2): p. 248-251.
180. Rawls, H.R., et al., *An electron microscopic comparison of bristle end-rounding of three commercial toothbrushes*. J Clin Dent, 1993. **4**(3): p. 96-100.
181. Rawls, H.R., et al., *Bristle end-rounding in children's toothbrushes: a comparative study*. J Clin Dent, 1993. **4**(2): p. 61-6.
182. Smith, B.G. and J.K. Knight, *An index for measuring the wear of teeth*. Br Dent J, 1984. **156**(12): p. 435-8.
183. Beleidy, M. and A. Ziada, *3D Surface Deviation Wear Analysis of Veneered PEEK Crowns and Its Correlation with Optical Digital Profilometry*. J Prosthodont, 2022.
184. Lambrechts, P., et al., *Quantitative in vivo wear of human enamel*. J Dent Res, 1989. **68**(12): p. 1752-4.
185. DeLong, R., R. Peterson, and W.H. Douglas, *A laser profiling system for measuring wear of dental materials*. J Dent Res, 1989. **68**: p. 907.
186. Jensen, O.E., F. Perez-Diez, and S.L. Handelman, *Occlusal wear of four pit and fissure sealants over two years*. Pediatr Dent, 1985. **7**(1): p. 23-9.
187. Vrijhoef, M.M., F.H. Hendriks, and H. Letzel, *Loss of substance of dental composite restorations*. Dent Mater, 1985. **1**(3): p. 101-5.
188. Leidal, T.I., H. Solem, and M. Rykke, *A clinical and scanning electron microscopic study of a new restorative material for use in posterior teeth*. Acta Odontol Scand, 1985. **43**(1): p. 1-8.
189. Kusy, R.P. and K.F. Leinfelder, *Pattern of wear in posterior composite restorations*. J Dent Res, 1977. **56**(5): p. 544.
190. DeLong, R., M. Pintado, and W.H. Douglas, *Measurement of change in surface contour by computer graphics*. Dent Mater, 1985. **1**(1): p. 27-30.
191. DeLong, R., et al., *The wear of dental amalgam in an artificial mouth: a clinical correlation*. Dent Mater, 1985. **1**(6): p. 238-42.
192. DeLong, R., et al., *The wear of enamel when opposed by ceramic systems*. Dent Mater, 1989. **5**(4): p. 266-71.
193. Pintado, M.R., J.P. Conry, and W.H. Douglas, *Fissure sealant wear at 30 months: new evaluation criteria*. J Dent, 1991. **19**(1): p. 33-8.
194. McDowell, G.C., et al., *In vivo wear. Part I: The Michigan computer-graphic measuring system*. The Journal of Prosthetic Dentistry, 1988. **60**(1): p. 112-120.
195. Lutz, F., T. Imfeld, and R.W. Phillips, *P-10--its potential as a posterior composite*. Dent Mater, 1985. **1**(2): p. 61-5.
196. Meier, C. and F. Lutz, [*Composites versus amalgam: comparative measurements of abrasion resistance in vivo: 1-year results*]. SSO Schweiz Monatsschr Zahnheilkd, 1979. **89**(3): p. 203-12.
197. Krejci, I., et al., [*A new method for 3-dimensional wear measurement*]. Schweiz Monatsschr Zahnmed, 1994. **104**(2): p. 160-9.
198. DeLong, R., *Intra-oral restorative materials wear: rethinking the current approaches: how to measure wear*. Dent Mater, 2006. **22**(8): p. 702-11.
199. Perry, R., et al., *Composite restoration wear analysis: conventional methods vs. three-dimensional laser digitizer*. J Am Dent Assoc, 2000. **131**(10): p. 1472-7.
200. Field, J., P. Waterhouse, and M. German, *Quantifying and qualifying surface changes on dental hard tissues in vitro*. J Dent, 2010. **38**(3): p. 182-90.

201. Vieira, A., et al., *Toothbrush abrasion, simulated tongue friction and attrition of eroded bovine enamel in vitro*. J Dent, 2006. **34**(5): p. 336-42.
202. Wiegand, A., S. Egert, and T. Attin, *Toothbrushing before or after an acidic challenge to minimize tooth wear? An in situ/ex vivo study*. Am J Dent, 2008. **21**(1): p. 13-6.
203. Rios, D., et al., *Influence of toothbrushing on enamel softening and abrasive wear of eroded bovine enamel: an in situ study*. Braz Oral Res, 2006. **20**(2): p. 148-54.
204. Attin, T., et al., *In situ evaluation of different remineralization periods to decrease brushing abrasion of demineralized enamel*. Caries Res, 2001. **35**(3): p. 216-22.
205. Hemingway, C.A., et al., *Erosion of enamel by non-carbonated soft drinks with and without toothbrushing abrasion*. Br Dent J, 2006. **201**(7): p. 447-50; discussion 439; quiz 466.
206. Barbour, M.E., et al., *The relationship between enamel softening and erosion caused by soft drinks at a range of temperatures*. J Dent, 2006. **34**(3): p. 207-13.
207. Huysmans, M.C., et al., *[Erosion effect of a newly developed soft drink]*. Ned Tijdschr Tandheelkd, 2006. **113**(2): p. 50-5.
208. Attin, T., et al., *Use of variable remineralization periods to improve the abrasion resistance of previously eroded enamel*. Caries Res, 2000. **34**(1): p. 48-52.
209. Attin, T., C. Zirkel, and E. Hellwig, *Brushing abrasion of eroded dentin after application of sodium fluoride solutions*. Caries Res, 1998. **32**(5): p. 344-50.
210. Moretto, M.J., et al., *Effect of different fluoride concentrations of experimental dentifrices on enamel erosion and abrasion*. Caries Res, 2010. **44**(2): p. 135-40.
211. Passos, V.F., et al., *In vitro effect of children's toothpaste on brushing abrasion of eroded primary enamel*. Eur Arch Paediatr Dent, 2021. **22**(2): p. 157-162.
212. West, N.X., et al., *A method to measure clinical erosion: the effect of orange juice consumption on erosion of enamel*. J Dent, 1998. **26**(4): p. 329-35.
213. Mehl, A., et al., *A new optical 3-D device for the detection of wear*. J Dent Res, 1997. **76**(11): p. 1799-807.
214. Heurich, E., et al., *Quantification of dental erosion--a comparison of stylus profilometry and confocal laser scanning microscopy (CLSM)*. Dent Mater, 2010. **26**(4): p. 326-36.
215. Williams, C.G., et al., *Laser scanning confocal microscopy coupled with hydraulic permeability measurements for elucidating fluid flow across porous materials: application to human dentine*. Anal Sci, 2008. **24**(4): p. 437-42.
216. Ishikiriama, S.K., et al., *Surface roughness and wear of resin cements after toothbrush abrasion*. Braz Oral Res, 2015. **29**: p. 1-5.
217. Sorg, H., *Buchbesprechungen*. Materials Testing, 1996. **38**(6): p. 259-259.
218. Heintze, S.D., et al., *A comparison of three different methods for the quantification of the in vitro wear of dental materials*. Dent Mater, 2006. **22**(11): p. 1051-62.
219. Bay, I., K.M. Kardel, and M.R. Skougard, *Quantitative evaluation of the plaque-removing ability of different types of toothbrushes*. J Periodontol, 1967. **38**(6): p. 526-33.
220. Hitz Lindenmüller, I. and J.T. Lambrecht, *Oral care*. Curr Probl Dermatol, 2011. **40**: p. 107-115.
221. Hine, M.K., *The use of the toothbrush in the treatment of periodontitis*. J Am Dent Assoc, 1950. **41**(2): p. 158-68.
222. Axelsson, P. and J. Lindhe, *Effect of controlled oral hygiene procedures on caries and periodontal disease in adults*. J Clin Periodontol, 1978. **5**(2): p. 133-51.
223. van der Weijden, F. and D.E. Slot, *Oral hygiene in the prevention of periodontal diseases: the evidence*. Periodontol 2000, 2011. **55**(1): p. 104-23.
224. Macgregor, I.D. and J.W. Balding, *Self-esteem as a predictor of toothbrushing behaviour in young adolescents*. J Clin Periodontol, 1991. **18**(5): p. 312-6.

225. Deutsches Institut für Normung e.V., ed. *DIN EN ISO 22254: 2005-11 Zahnbürsten - Handzahnbürsten - Biegefestigkeit der Besteckungsfläche* 2005, Beuth Verlag GmbH: Berlin.
226. Bergenholtz, A., et al., *Role of brushing technique and toothbrush design in plaque removal*. Scand J Dent Res, 1984. **92**(4): p. 344-51.
227. Panati, C., *Panati's extraordinary origins of everyday things / Charles Panati. Extraordinary origins of everyday things*. 1987: New York : Harper & Row.
228. Ramli, H., T.N. Mohd-Dom, and S. Mohd-Said, *Clinical benefits and adverse effects of siwak (S. persica) use on periodontal health: a scoping review of literature*. BMC Oral Health, 2021. **21**(1): p. 618.
229. Wu, C.D., I.A. Darout, and N. Skaug, *Chewing sticks: timeless natural toothbrushes for oral cleansing*. J Periodontal Res, 2001. **36**(5): p. 275-84.
230. Sammons, R., *Control of Dental Plaque*. 2005. p. 221-254.
231. Niazi, F., et al., *Role of Salvadora persica chewing stick (miswak): A natural toothbrush for holistic oral health*. European journal of dentistry, 2016. **10**(2): p. 301-308.
232. Li, Y., B. Zhang, and A.G. Christen, *The historical development of dentistry in China*. Bull Hist Dent, 1987. **35**(1): p. 21-8.
233. Library of Congress. *Who invented the toothbrush and when was it invented?* [cited 2022 20.09.2022]; Available from: <https://www.loc.gov/everyday-mysteries/technology/item/who-invented-the-toothbrush-and-when-was-it-invented/>.
234. Ng, C., et al., *Safety and Design Aspects of Powered Toothbrush-A Narrative Review*. Dent J (Basel), 2020. **8**(1).
235. Wisdom toothbrushes. *About us*. 20.09.2022]; Available from: <https://wisdom-toothbrushes.com/contact-us/about-us/>
236. Mc Cauley Hb, *Toothbrushes, toothbrush materials and design*. J Am Dent Assoc, 1946. **33**: p. 283-93.
237. Mintel, T.E. and J. Crawford, *The search for a superior toothbrush design technology*. J Clin Dent, 1992. **3**(Suppl C): p. C1-4.
238. Deutsches Institut für Normung e.V., ed. *DIN 13917-1: 1988-11 - Zahnheilkunde - Zahnbürsten - Begriffe, Maße, Anforderungen* 1988, Beuth Verlag GmbH: Berlin.
239. Norman O. Harris and F. Garcia-Godoy, *Primary Preventive Dentistry*. 6 ed. The Manual Toothbrush. 2004, Upper Saddle River, New Jersey 07458: Julie Levin Alexander.
240. Grover, D., et al., *Toothbrush'A key to mechanical plaque control'*. Indian J Oral Sci, 2012. **3**(2): p. 62-8.
241. Yankell, S.L., X. Shi, and R.C. Emling, *Laboratory evaluations of elmex inter X toothbrushes for interproximal access efficacy and posterior tooth surface cleaning*. J Clin Dent, 2002. **13**(6): p. 249-52.
242. Yankell, S.L., X. Shi, and C.M. Spigel, *Laboratory interproximal access efficacy of four elmex caries protection toothbrushes*. J Clin Dent, 2012. **23**(1): p. 27-31.
243. Bordas, A., et al., *Interproximal Access Efficacy of Manual Toothbrushes With Different Bristles Configurations*. 2010.
244. Stiller, S., et al., *Interproximal access efficacy of three manual toothbrushes with extended, x-angled or flat multitufted bristles*. Int J Dent Hyg, 2010. **8**(3): p. 244-8.
245. Terezhalmay, G.T., et al., *Plaque removal efficacy of a prototype manual toothbrush versus an ADA reference manual toothbrush with and without dental floss*. J Contemp Dent Pract, 2005. **6**(3): p. 1-13.
246. Biesbrock, A.R., R.D. Bartizek, and P.A. Walters, *Improved plaque removal efficacy with a new manual toothbrush*. J Contemp Dent Pract, 2008. **9**(4): p. 1-8.
247. Ghassemi, A., et al., *Comparative Plaque Removal Efficacy of Three Manual Toothbrushes*. J Clin Dent, 2016. **27**(3): p. 71-75.

248. Claydon, N. and M. Addy, *Comparative single-use plaque removal by toothbrushes of different designs*. J Clin Periodontol, 1996. **23**(12): p. 1112-6.
249. Claydon, N., et al., *Comparison of a double-textured prototype manual toothbrush with 3 branded products. A professional brushing study*. J Clin Periodontol, 2000. **27**(10): p. 744-8.
250. Claydon, N., et al., *Comparative professional plaque removal study using 8 branded toothbrushes*. J Clin Periodontol, 2002. **29**(4): p. 310-6.
251. Turssi, C.P., A.B. Kelly, and A.T. Hara, *Toothbrush bristle configuration and brushing load: Effect on the development of simulated non-carious cervical lesions*. J Dent, 2019. **86**: p. 75-80.
252. Imfeld, T., B. Sener, and I. Simonovic, *In-Vitro-Untersuchung der mechanischen Wirkung von handelsüblichen Handzahnbürsten*. Acta Med Dent Helv 2000. **5**: p. 37-47.
253. Cifcibasi, E., et al., *Comparison of manual toothbrushes with different bristle designs in terms of cleaning efficacy and potential role on gingival recession*. Eur J Dent, 2014. **8**(3): p. 395-401.
254. Macgregor, I.D. and A.J. Rugg-Gunn, *Toothbrushing duration in 60 uninstructed young adults*. Community Dent Oral Epidemiol, 1985. **13**(3): p. 121-2.
255. Cancro, L.P. and S.L. Fischman, *The expected effect on oral health of dental plaque control through mechanical removal*. Periodontol 2000, 1995. **8**: p. 60-74.
256. Emling, R.C., et al., *A comparison of estimated versus actual brushing time*. Pharmacol Ther Dent, 1981. **6**(3-4): p. 93-8.
257. Hansen, F. and P. Gjermo, *The plaque-removing effect of four toothbrushing methods*. Scand J Dent Res, 1971. **79**(7): p. 502-6.
258. Less, W., *Mechanics of teaching plaque control*. Dent Clin North Am, 1972. **16**(4): p. 647-59.
259. Slot, D.E., et al., *The efficacy of manual toothbrushes following a brushing exercise: a systematic review*. Int J Dent Hyg, 2012. **10**(3): p. 187-97.
260. Rosema, N., et al., *The efficacy of powered toothbrushes following a brushing exercise: a systematic review*. Int J Dent Hyg, 2016. **14**(1): p. 29-41.
261. van der Weijden, G.A., et al., *The plaque-removing efficacy of an oscillating/rotating toothbrush. A short-term study*. J Clin Periodontol, 1993. **20**(4): p. 273-8.
262. Van der Weijden, G.A., et al., *Comparison of an oscillating/rotating electric toothbrush and a 'sonic' toothbrush in plaque-removing ability. A professional toothbrushing and supervised brushing study*. J Clin Periodontol, 1996. **23**(4): p. 407-11.
263. Creeth, J.E., et al., *The effect of brushing time and dentifrice on dental plaque removal in vivo*. J Dent Hyg, 2009. **83**(3): p. 111-6.
264. Singh, M.S. and A.K. Tuli, *A comparative evaluation of oral hygiene practices, oral health status, and behavior between graduate and post-graduate dentists of North India: An epidemiological survey*. J Int Soc Prev Community Dent, 2013. **3**(1): p. 19-24.
265. dos Santos, A.P., P. Nadanovsky, and B.H. de Oliveira, *Inconsistencies in recommendations on oral hygiene practices for children by professional dental and paediatric organisations in ten countries*. Int J Paediatr Dent, 2011. **21**(3): p. 223-31.
266. Beltrán, V., et al., *Effects of Manual Toothbrushing on Gingival Recession in an Adult Population Sample in South of Chile*. International journal of odontostomatology, 2014. **8**: p. 461-467.
267. Zimmer, S. and L. Lieding, *Gewohnheiten und Kenntnisse zur Mund- hygiene in Deutschland – Ergebnisse einer bevölkerungsrepräsentativen Befragung*. Deutsche Zahnärztliche Zeitschrift, 2014. **10**: p. 584-593.
268. Hugoson, A., et al., *Oral health of individuals aged 3-80 years in Jönköping, Sweden in 1973 and 1983. I. A review of findings on dental care habits and knowledge of oral health*. Swed Dent J, 1986. **10**(3): p. 103-17.

269. Sheiham, A. and G.S. Netuveli, *Periodontal diseases in Europe*. Periodontol 2000, 2002. **29**: p. 104-21.
270. Saxer, U.P. and S.L. Yankell, *Impact of improved toothbrushes on dental diseases. I*. Quintessence Int, 1997. **28**(8): p. 513-25.
271. Saxer, U.P. and S.L. Yankell, *Impact of improved toothbrushes on dental diseases. II*. Quintessence Int, 1997. **28**(9): p. 573-93.
272. Attin, T. and E. Hornecker, *Tooth brushing and oral health: how frequently and when should tooth brushing be performed?* Oral Health Prev Dent, 2005. **3**(3): p. 135-40.
273. Echeverria, J.J. and M. Sanz, *Clinical Periodontology and Implant Dentistry*. 4 ed. Mechanical Supragingival Plaque Control, ed. J. Lindhe, T. Karring, and N.P. Lang. 2003, 9600 Garsington Road, Oxford OX4: Blackwell Munksgaard.
274. Frandsen, A.M., et al., *The effectiveness of the Charters', scrub and roll methods of toothbrushing by professionals in removing plaque*. Scand J Dent Res, 1970. **78**(6): p. 459-63.
275. DeVore, C.H., F.M. Beck, and J.E. Horton, *Plaque score changes based primarily on patient performance at specific time intervals*. J Periodontol, 1990. **61**(6): p. 343-6.
276. Graetz, C., et al., *Toothbrushing education via a smart software visualization system*. J Periodontol, 2013. **84**(2): p. 186-95.
277. Robinson, P.G., et al., *Manual versus powered toothbrushing for oral health*. Cochrane Database Syst Rev, 2005(2): p. Cd002281.
278. Yaacob, M., et al., *Powered versus manual toothbrushing for oral health*. Cochrane Database Syst Rev, 2014. **2014**(6): p. Cd002281.
279. Deacon, S.A., et al., *Different powered toothbrushes for plaque control and gingival health*. Cochrane Database Syst Rev, 2010. **2010**(12): p. Cd004971.
280. Nagy, P., et al., *[Evaluation of the efficacy of powered and manual toothbrushes in preventing oral diseases (Systematic review with meta-analysis)]*. Fogorv Sz, 2016. **109**(1): p. 3-22.
281. Warren, P.R. and B. Chater, *The role of the electric toothbrush in the control of plaque and gingivitis: a review of 5 years clinical experience with the Braun Oral-B Plaque Remover [D7]*. Am J Dent, 1996. **9 Spec No**: p. S5-11.
282. Williams, K., et al., *One- and 3-minute plaque removal by a battery-powered versus a manual toothbrush*. J Periodontol, 2004. **75**(8): p. 1107-13.
283. Ying, Y. and B. Nicolau, *Oscillating-rotating electric toothbrushes may have a better effect on gingivitis and plaque control than sonic and manual toothbrushes in adults*. J Evid Based Dent Pract, 2021. **21**(3): p. 101575.
284. Deery, C., et al., *The effectiveness of manual versus powered toothbrushes for dental health: a systematic review*. J Dent, 2004. **32**(3): p. 197-211.
285. Weyant, R.J., *Powered toothbrushes and manual toothbrushes are generally equally effective in plaque removal*. J Evid Based Dent Pract, 2005. **5**(1): p. 24-5.
286. Niemi, M.L., *Gingival abrasion and plaque removal after toothbrushing with an electric and a manual toothbrush*. Acta Odontol Scand, 1987. **45**(5): p. 367-70.
287. Walsh, M., et al., *Comparison of manual and power toothbrushing, with and without adjunctive oral irrigation, for controlling plaque and gingivitis*. J Clin Periodontol, 1989. **16**(7): p. 419-27.
288. Wilcoxon, D.B., et al., *The effectiveness of a counterrotational-action power toothbrush on plaque control in orthodontic patients*. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 1991. **99**(1): p. 7-14.
289. Francis, M., et al., *Comparative plaque removal efficacy of a new children's powered toothbrush and a manual toothbrush: Randomized, single use clinical study*. Am J Dent, 2021. **34**(6): p. 338-344.

290. Kambhu, P.P. and S.M. Levy, *Oral hygiene care levels in lowa intermediate care facilities*. Spec Care Dentist, 1993. **13**(5): p. 209-14.
291. Heintze, S.D., P.G. Jost-Brinkmann, and J. Loundos, *Effectiveness of three different types of electric toothbrushes compared with a manual technique in orthodontic patients*. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 1996. **110**(6): p. 630-8.
292. Januar, P., A. Susetyo, and R. Widyastuti, *The effectiveness of sharp end and rounded end bristle toothbrush*. Dental Journal: Majalah Kedokteran Gigi, 2010. **43**.
293. Zimmer, S., et al., *Cleaning Efficacy and Soft Tissue Trauma After Use of Manual Toothbrushes With Different Bristle Stiffness*. Journal of Periodontology, 2011. **82**(2): p. 267-271.
294. Deutsches Institut für Normung e.V., ed. *DIN EN ISO 20126: 2021-04 Zahnheilkunde - Handzahnbürsten - Allgemeine Anforderungen und Prüfverfahren 2021*, Beuth Verlag GmbH: Berlin.
295. Breitenmoser, J., W. Mörmann, and H.R. Mühlemann, *Damaging effects of toothbrush bristle end form on gingiva*. J Periodontol, 1979. **50**(4): p. 212-6.
296. Ranzan, N., F. Muniz, and C.K. Rösing, *Are bristle stiffness and bristle end-shape related to adverse effects on soft tissues during toothbrushing? A systematic review*. Int Dent J, 2019. **69**(3): p. 171-182.
297. Müller, P.J., C. Koçkapan, and W.E. Wetzel, *[Bristle anchoring and bristle end-rounding in adults' toothbrushes]*. Schweiz Monatschr Zahnmed, 1992. **102**(1): p. 38-46.
298. Macfarlane, D.W., *The dynamic stiffness of toothbrushes*. J Periodontal Res, 1971. **6**(3): p. 218-26.
299. Robertson, N.A. and A.B. Wade, *Effect of filament and density in toothbrushes*. J Periodontal Res, 1972. **7**(4): p. 346-50.
300. Nygaard-Ostby, P., B. Spydevold, and S. Edvardsen, *Suggestion for a definition, measuring method and classification system of bristle stiffness of toothbrushes*. Scand J Dent Res, 1979. **87**(3): p. 159-70.
301. Rawls, H.R., N.J. Mkwai-Tulloch, and M.E. Krull, *A mathematical model for predicting toothbrush stiffness*. Dent Mater, 1990. **6**(2): p. 111-7.
302. Yankell, S.L., et al., *Laboratory evaluations of a toothbrush with diamond-shaped filaments for stiffness and efficacy*. J Clin Dent, 2001. **12**(4): p. 112-5.
303. Deutsches Institut für Normung e.V., ed. *ISO 8627: 1987-10 Zahnheilkunde - Härte der Zahnbürste*. 1987, Beuth Verlag GmbH: Berlin.
304. Dirk Rossmann GmbH. *Alterra Bambus Zahnbürste*. 2022 07.06.2022 [cited 2022 07.06.2022]; Available from: <https://www.rossmann.de/de/gesundheit-alterra-naturkosmetik-bambus-zahnburste-mittel/p/4305615709291>.
305. wasserneutral GmbH. *Hydrophil Bambus-Zahnbürste*. 2022 [cited 2022 07.06.2022]; Available from: <https://hydrophil.com/zahnbursten/376/bambus-zahnburste-mittel-hellblau?c=76>.
306. Bark, J., *Quantifizierung der Dentin-Abrasion am menschlichen Zahn - methodische Überlegungen und experimentelle In-vitro-Studien unter Verwendung von Zahnbürsten und einer "Zahnputz-Maschine"*, in LMU München. 2006.
307. Yassen, G.H., J.A. Platt, and A.T. Hara, *Bovine teeth as substitute for human teeth in dental research: a review of literature*. J Oral Sci, 2011. **53**(3): p. 273-82.
308. Imfeld, T., *Comparison of the mechanical effects of a toothbrush and standard abrasive on human and bovine dentine in vitro*. J Clin Dent, 2001. **12**(4): p. 92-6.
309. Wegehaupt, F., et al., *Is bovine dentine an appropriate substitute for human dentine in erosion/abrasion tests?* J Oral Rehabil, 2008. **35**(5): p. 390-4.
310. Wegehaupt, F.J., R. Widmer, and T. Attin, *Is bovine dentine an appropriate substitute in abrasion studies?* Clin Oral Investig, 2010. **14**(2): p. 201-5.

311. McCracken, G.I., et al., *Effect of brushing force and time on plaque removal using a powered toothbrush*. J Clin Periodontol, 2003. **30**(5): p. 409-13.
312. Van der Weijden, G.A., et al., *High and low brushing force in relation to efficacy and gingival abrasion*. J Clin Periodontol, 2004. **31**(8): p. 620-4.
313. Schindelin, J., et al., *Fiji: an open-source platform for biological-image analysis*. Nat Methods, 2012. **9**(7): p. 676-82.
314. Kaisarly, D.A.M., *The effect of boundary conditions on the polymerization shrinkage vectors of light-cured dental resin composites*. 2014.
315. Keyence Deutschland GmbH. *Digitalmikroskop Modellreihe VHX-F*. [cited 2022 10.08.2022]; Available from: <https://www.keyence.de/products/microscope/digital-microscope/vhx-f/>.
316. Ametek, E. *Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS/EDX)* Available from: <https://www.edax.com/products/eds>.
317. Sakaguchi, R.L. and J.M. Powers, *Craig's Restorative Dental Materials*. 2012: Elsevier/Mosby.
318. Anusavice, K.J.P.R.W., *Phillips' science of dental materials*. 2003, St. Louis, Mo.: Saunders.
319. Martin, K., *Die In-vitro-Verschleißprüfung dentaler Befestigungskomposite im Zahnputzsimulator – eine Methodenanalyse*, in *Poliklinik für Zahnerhaltung und Parodontologie Ludwig-Maximilians-Universität München*. 2022.
320. Winer, B.J., D.R. Brown, and K.M. Michels, *Analysis of Variance Assumptions. Statistical Principles in Experimental Design*. 3 ed. 1991, New York. 1057.
321. Sivers, C.H.v. *Method for rounding the tip of bristles (US2587792A)*. 1947; Available from: <https://patents.google.com/patent/US2587792A/en>.
322. Boucherie, L.P. *Vorrichtung zum Abrunden der Borstenenden von Bürsten (EP0019944A1)*. 1980 [cited 2023; Available from: <https://patents.google.com/patent/EP0019944A1/de>.
323. Argembeau, E.D. *Perfectionnements aux brosses (LU83225A1)*. 1981; Available from: <https://patents.google.com/patent/LU83225A1/fr>.
324. Schmidt, J.C., et al., *Influence of time, toothpaste and saliva in the retention of Streptococcus mutans and Streptococcus sanguinis on different toothbrushes*. J Appl Oral Sci, 2014. **22**(3): p. 152-8.
325. Klima, J. and B. Rosswall, *[Shape of toothbrush bristles, scanning electronmicroscopic studies]*. Quintessenz, 1976. **27**(1): p. 113-119.
326. Wonglamsam, A., K. Kakuta, and H. Ogura, *Effects of occlusal and brushing cycles on wear of composite resins in combined wear test*. Dent Mater J, 2008. **27**(2): p. 243-50.
327. Martinelli, J., et al., *Abrasion resistance of composites polymerized by light-emitting diodes (LED) and halogen light-curing units*. Braz Dent J, 2006. **17**(1): p. 29-33.
328. Kanik, Ö., L.S. Turkun, and W. Dasch, *In vitro abrasion of resin-coated highly viscous glass ionomer cements: a confocal laser scanning microscopy study*. Clin Oral Investig, 2017. **21**(3): p. 821-829.
329. Asadian, F., Z. Shahidi, and Z. Moradi, *Evaluation of Wear Properties of Four Bulk-Fill Composites: Attrition, Erosion, and Abrasion*. Biomed Res Int, 2021. **2021**: p. 8649616.
330. Teske, F. *Prüfung der Anwendbarkeit des Laser-Scanning-Mikroskopes zur Bewertung der Abnutzung von Zahnbürstenborsten*. 2013 19.10.2022]; Available from: <http://dx.doi.org/10.53846/goediss-4146>.
331. Axe, A., et al., *Impact of manual toothbrush design on plaque removal efficacy*. BMC Oral Health, 2023. **23**(1): p. 796.
332. Lai, G., et al., *Surface properties and color stability of dental flowable composites influenced by simulated toothbrushing*. Dental Materials Journal, 2018. **37**(5): p. 717-724.

333. van der Weijden, G.A., et al., *Toothbrushing force in relation to plaque removal*. J Clin Periodontol, 1996. **23**(8): p. 724-9.
334. Van der Weijden, G.A., et al., *Relationship between the plaque removal efficacy of a manual toothbrush and brushing force*. J Clin Periodontol, 1998. **25**(5): p. 413-6.
335. Adam, R., *Introducing the Oral-B iO electric toothbrush: next generation oscillating-rotating technology*. Int Dent J, 2020. **70 Suppl 1**(Suppl 1): p. S1-s6.
336. Heintze, S.D. and M. Forjanic, *Surface roughness of different dental materials before and after simulated toothbrushing in vitro*. Oper Dent, 2005. **30**(5): p. 617-26.
337. Tawakoli, P.N., B. Sener, and T. Attin, *Mechanical effects of different Swiss market-leading dentifrices on dentin*. Swiss Dent J, 2015. **125**(11): p. 1210-9.
338. González-Cabezas, C., et al., *Abrasivity testing of dentifrices - challenges and current state of the art*. Monogr Oral Sci, 2013. **23**: p. 100-7.
339. Enax, J., et al., *Toothpaste Abrasion and Abrasive Particle Content: Correlating High-Resolution Profilometric Analysis with Relative Dentin Abrasivity (RDA)*. Dentistry Journal, 2023. **11**: p. 79.
340. Chang, Y.H., et al., *Effect of toothbrush/dentifrice abrasion on weight variation, surface roughness, surface morphology and hardness of conventional and CAD/CAM denture base materials*. Dent Mater J, 2021. **40**(1): p. 220-227.
341. Remizov, S.M. and L. Pruzhanskiĭ, *[The effect of toothbrushes on human dental enamel and dentin wear]*. Stomatologĭia (Mosk), 1990(4): p. 4-6.
342. IFAM, F.-I.f.F.u.A.M. *Akkreditiertes Prüflabor für Rasterelektronenmikroskopie (REM) in Verbindung mit EDX-Analysen*. Werkstoffprüfung und Materialuntersuchung mittels REM und EDX n.d.; Available from: <https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:7cjChlxUFWYJ:https://www.ifam.fraunhofer.de/de/technologien/akkreditiertes-prueflabor-rem-edx.html&cd=3&hl=de&ct=clnk&gl=de&client=firefox-b-d>.
343. Zankel, D.A. *Energiedispersive Röntgenspektroskopie*. Available from: https://wiki.polymerservice-merseburg.de/index.php/Energiedispersive_R%C3%B6ntgenspektroskopie.
344. Isenburg, D.T. *Bio, aber nicht um jeden Preis*. Roh- und Zusatzstoffe 2011 [cited 2022 12.10.2022]; Available from: <https://www.plastverarbeiter.de/roh-und-zusatzstoffe/bio-aber-nicht-um-jeden-preis.html>.
345. Materialarchiv. *Kunststoff. Polyamid 11*. n.d. 09.10.2022]; Available from: <https://hpp.arkema.com/en/product-families/rilsan-polyamide-11-resins/>.
346. Joe Schwarcz. *Plant-based toothbrush. Really?*. General Science 2017 09.08.2022]; Available from: file:///C:/Users/lilli/AppData/Local/Temp/Temp1_Recherchen-Biozahnb%C3%BCrsten.zip/Recherchen/B%E2%94%9C%E2%95%9Drsten-aus-Rhizinus-sind-dennoch-Nylon11.html.
347. contributors, W.C. *Ricinus communis (Euphorbiaceae), ricino o higuera.jpg*. 2024 [cited 2024 22.10.]; Available from: [https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Ricinus communis \(Euphorbiaceae\), ricino o higuera.jpg&oldid=863699090](https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Ricinus communis (Euphorbiaceae), ricino o higuera.jpg&oldid=863699090).
348. contributors, W.C. *Ricinus communis 008.JPG*. 2020 [cited 2024 22.10.]; Available from: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Ricinus communis 008.JPG&oldid=515588584>.
349. TePe Deutschland, Ö.u.S.G. *Nachhaltigkeit*. Nachhaltige Arbeitsweise 2024; Available from: <https://www.tepe.com/de/nachhaltigkeit/nachhaltige-arbeitsweise>.
350. SpecialChem. *Modulus of Elasticity. Stress, Strain & Young's Modulus*. n.d. [cited 2023 09.02.2023]; Available from: <https://omnexus.specialchem.com/polymer-properties/properties/young-modulus>.
351. Lang, T., et al., *Clinical validation of robot simulation of toothbrushing--comparative plaque removal efficacy*. BMC Oral Health, 2014. **14**: p. 82.

352. Acherkouk, A., et al., *Robot and mechanical testing of a specialist manual toothbrush for cleaning efficacy and improved force control*. BMC Oral Health, 2022. **22**(1): p. 225.
353. Danser, M.M., et al., *A laboratory and clinical investigation comparing 2 oscillating/rotating electric toothbrushes*. J Clin Periodontol, 2000. **27**(4): p. 277-83.
354. Mönnink, C., et al., *Dentronics: Tooth cleaning with a tactile, collaborative robot. An in vitro proof of concept*. Int J Comput Dent, 2023. **0**(0): p. 1-17.
355. Ernst, C.P., et al., *A robot system for evaluating plaque removal efficiency of toothbrushes in vitro*. Quintessence Int, 1997. **28**(7): p. 441-5.

8. Danksagung

Abschließend bedanke ich mich bei allen Menschen, die mich auf dem Weg meiner Dissertation begleitet haben.

Mein Dank gilt Herrn Professor Dr. Falk Schwendicke, dem Direktor der Poliklinik für Zahnerhaltung und Parodontologie der Ludwig-Maximilians-Universität München, für die Möglichkeit der Durchführung meiner Untersuchung an seiner Einrichtung sowie die finanzielle Unterstützung für bereitgestellte Materialien und Geräte. Ebenfalls unerlässlich für dieses Vorhaben war der wissenschaftliche Austausch in einigen anregenden Gesprächen mit Herrn Professor Dr. med. dent. Karl-Heinz Kunzelmann, der mit seinen besonderen Ideen die Entwicklung der Untersuchungsmethode fachlich sowie finanziell unterstützte.

Ich bedanke mich außerordentlich bei meiner Mentorin Frau PD Dr. med. dent. Dalia Kaisarly für die Ermöglichung eines spannenden Dissertationsprojektes. Die stets freundliche und kompetente Betreuung auch bei scheinbar unüberwindbaren Hürden sowie die fortwährende Zuversicht ihrerseits lassen mich auf eine sehr schöne Zeit zurückblicken. Sie konnte mir die entscheidenden Kenntnisse über selbstständiges wissenschaftliches Arbeiten in freundlicher Atmosphäre vermitteln. Mein tiefer Dank gilt auch meinen beiden weiteren Betreuern Frau Prof. Dr. med. dent. Miriam Draenert sowie Herrn Professor Moataz Elgezawi für die Bereitschaft zur fachlichen Diskussion und Förderung, die mich fortan motivierten meine Methoden stets kritisch zu hinterfragen und auszubauen.

Des Weiteren bin ich sehr dankbar für den regen Austausch und die große Unterstützung zur Umsetzung der makroskopischen und mikroskopischen Aufnahmen meiner Experimente durch die medizinisch technische Assistentin Gisela Dachs. Auch bei spontan auftretenden Problemen konnte ich mich darauf verlassen, dass sie mir mit Rat und Tat zur Seite stand. Mein Dank geht auch an die medizinisch technische Assistentin Evi Köbele für die Erstellung mikroskopischer Aufnahmen im Rahmen meiner Untersuchung. Ich danke den Mitarbeitern des zahntechnischen Labors sowie der Werkstatt der Zahnerhaltung für die kurzfristige Unterstützung zur Bewerkstelligung von technisch notwendigen Modifikationen an diversen Geräten.

Außerdem verdanke ich der hervorragenden, interdisziplinären Zusammenarbeit mit Frau Prof. Dr. med. dent. Anja Liebermann sowie Herrn Dr. rer. biol. hum. Dipl.-Ing. Kurt-Jürgen Erdelt aus der Poliklinik für zahnärztlichen Prothetik den Einsatz eines Digitalmikroskops. Auch die zahlreichen Diskussionen mit Po-Chun Tseng zu Softwarefragen schätze ich sehr und ich möchte mich recht herzlich dafür bedanken, da sie meine Untersuchung nachhaltig unterstützt haben.

Zuallerletzt bin ich sehr glücklich, dass meine Familie und Freunde unabhängig meiner Leistungen mir stets mit Unterstützung und Ermutigung zur Seite stehen und mich in meinem Leben begleiten.

9. Affidavit



Eidesstattliche Versicherung

Heusinger, Lilli

Name, Vorname

Ich erkläre hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Dissertation mit dem Titel:

*„Untersuchung von Handzahnbürstenborsten aus Rizinusöl
im Hinblick auf Verschleiß, mechanische und
chemische Eigenschaften“*

selbständig verfasst, mich außer der angegebenen keiner weiteren Hilfsmittel bedient und alle Erkenntnisse, die aus dem Schrifttum ganz oder annähernd übernommen sind, als solche kenntlich gemacht und nach ihrer Herkunft unter Bezeichnung der Fundstelle einzeln nachgewiesen habe.

Ich erkläre des Weiteren, dass die hier vorgelegte Dissertation nicht in gleicher oder in ähnlicher Form bei einer anderen Stelle zur Erlangung eines akademischen Grades eingereicht wurde.

München, 11.01.2025

Ort, Datum

Lilli Heusinger

Unterschrift Doktorandin

10. Publikationsliste

Dalia Kaisarly, Lilli Heusinger, Gisela Dachs, Moataz El Gezawi, Anja Liebermann, Kurt Erdelt, Ludwig Czibere, Falk Schwendicke, Katrin Heck, Miriam Draenert,

Wear, mechanical and chemical properties of castor oil toothbrush bristles,

Polymer Testing, Volume 148, 2025, 108839, ISSN 0142-9418,

<https://doi.org/10.1016/j.polymeresting.2025.108839>.

21-23.09.2023 Vortrag CED/NOF-IADR Oral Health Research Congress in Rhodes

„Wear, mechanical and chemical properties of castor oil toothbrush bristles“

Abstract Nr. 0326, Dalia Kaisarly, Lilli Heusinger, Moataz El Gezawi, Miriam Draenert