Aus den Zahnmedizinischen Kliniken der Universität Bern
Klinik für Zahnerhaltung, Präventiv- und Kinderzahnmedizin
Direktor: Prof. Dr. Hendrik Meyer-Lückel

Arbeit unter der Leitung von:
Dipl. El. Ing. ETHZ, MS Biomed. Ing. Walter Bürgin
Prof. em. Dr. med. dent.; Dipl. Chem. Ing. ETH Adrian Lussi

Analyse der Diskriminierung verschiedener Borstensysteme mit Hilfe eines automatisierten Putzeffizienzsystems

Inaugural-Dissertation

zur
Erlangung der Doktorwürde der Zahnmedizin
der Medizinischen Fakultät der Universität Bern

vorgelegt von
Joël Sascha Bauer
von Bolligen BE

Originaldokument gespeichert auf dem Webserver der Universitätsbibliothek Bern

Dieses Werk ist unter einem
Creative Commons Namensnennung-Keine kommerzielle Nutzung-Keine Bearbeitung 2.5 Schweiz Lizenzvertrag lizenziert. Um die Lizenz anzusehen, gehen Sie bitte zu http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.5/ch/ oder schicken Sie einen Brief an Creative Commons, 171 Second Street, Suite 300, San Francisco, California 94105, USA.

source: https://doi.org/10.24442/boristheses.801 | downloaded: 26.4.2024

Urheberrechtlicher Hinweis

Dieses Dokument steht unter einer Lizenz der Creative Commons Namensnennung-Keine kommerzielle Nutzung-Keine Bearbeitung 2.5 Schweiz.
http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.5/ch/

Sie dürfen:

dieses Werk vervielfältigen, verbreiten und öffentlich zugänglich machen

Zu den folgenden Bedingungen:

Namensnennung. Sie müssen den Namen des Autors/Rechteinhabers in der von ihm festgelegten Weise nennen (wodurch aber nicht der Eindruck entstehen darf, Sie oder die Nutzung des Werkes durch Sie würden entlohnt).

Keine kommerzielle Nutzung. Dieses Werk darf nicht für kommerzielle Zwecke verwendet werden.

Keine Bearbeitung. Dieses Werk darf nicht bearbeitet oder in anderer Weise verändert werden.

Im Falle einer Verbreitung müssen Sie anderen die Lizenzbedingungen, unter welche dieses Werk fällt, mitteilen.

Jede der vorgenannten Bedingungen kann aufgehoben werden, sofern Sie die Einwilligung des Rechteinhabers dazu erhalten.

Diese Lizenz lässt die Urheberpersönlichkeitsrechte nach Schweizer Recht unberührt.

Eine ausführliche Fassung des Lizenzvertrags befindet sich unter
http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.5/ch/legalcode.de

Von der Medizinischen Fakultät der Universität Bern auf Antrag der Dissertationskommission als Dissertation genehmigt.

Promotionsdatum:

Der Dekan der Medizinischen Fakultät:

Inhaltsverzeichnis

INHALTSVERZEICHNIS 4

1. EINLEITUNG 6

2. MATERIAL UND METHODE 8

2.1 DAS MESSSYSTEM 8
2.2 DIE BILDANALYSE 12
2.3 DER MESSABLAUF 14
2.3.1 Die Bewegungsmuster 16
2.3.2 Die Messreihen-Borstenfelder 17
2.4 STATISTISCHE AUSWERTUNG 18
2.4.1 Statistische Begriffe 18
2.4.2 SAS®-Jobs 18
2.4.3 R-Jobs 19

3. RESULTATE 20

3.1 ERFASSUNG DER MESSGENAUIGKEIT / GENAUIGKEITSANALYSE 20
3.1.1 Boxplots 20
3.1.2 Einfluss von Bürste, Bewegung auf die Genauigkeit der Messung 23
3.2 PUTZLEISTUNG 30
3.2.1 Einfluss des Borstensytems 30
3.2.2 Einfluss der Bürsten-Bewegungsmuster 31
3.2.3 Interaktion Bewegung und Bürste 32

4. DISKUSSION 34

5. SCHLUSSFOLGERUNG 37

6. ZUSAMMENFASSUNG 38

7. VERDANKUNG 40

8. LITERATURVERZEICHNIS 41

9. BILDERVERZEICHNIS 43

10. ANHANG 44

10.1 BERECHNUNGSANSATZ 44

10.1.1 Der klassische Mann Whitney U-Test 44
10.1.2 Der stratifizierte Mann Whitney U-Test 44
11. SELBSTSTÄNDIGKEITSERKLÄRUNG 46

1. Einleitung

Es gibt viele verschiedene Studien, welche sich mit dem Vergleich verschiedener Borstensysteme befassen. Der Fokus der bisher veröffentlichten Arbeiten richtet sich hauptsächlich auf die Beschaffenheit (Borsten-Design) und auf die Art (maschinell versus manuell) des Borstensystems. Schon früh erkannte man in in-vitro Arbeiten die Vorteile von Borstensystemen mit weichen Borsten oder von Borstensystemen mit unterschiedlich langen Borsten ("V-Shape") [Nygaard-Ostby et al., 1979]. Es wurde aufgezeigt, dass die unterschiedliche Beschaffenheit von Borstensystemen in-vivo keine Rolle auf die Effizienz der Plaqueentfernung spielt, sondern die Putzgewohnheiten des Anwenders viel stärker ins Gewicht fallen [Claydon et al., 2002]. Wie die Art des Borstensystems auf die Plaqueentfernung wirkt, ist am Beispiel der Übersichtsarbeit "Powered versus manual toothbrushing for oral health" zu entnehmen [Yaacob et al., 2014]: Maschinelle Borstensysteme reduzieren auf kurze wie auf lange Zeit Plaque und Gingivitis besser als manuelle Borstensysteme. Dabei spielt es keine Rolle, ob es oszillierende oder vibrieren de Borstensysteme sind. Eine neuere Übersichtsarbeit bestätigt dieses Resultat, dass in Bezug auf die Reduktion von Plaque und Gingivitis die maschinellen Systeme den manuellen Borstensystemen überlegen sind [Nagy et al., 2016].

Es werden immer mehr Arbeiten über automatisierte Putzeffizienzsysteme (Roboter) veröffentlicht, um unter immer gleichen Bedingungen Borstensysteme in ihrer Reinigungseffizienz miteinander vergleichen zu können. Die ersten solche Vergleichsversuche (Diskriminierungsversuche) mit Hilfe einer einfachen Putzeffizienzmaschine erfolgten bereits 1972. Dabei wurde unter Wasser ein mit Farbe bestrichenes Kunststoffmodell mit Kurz- bzw. Langkopfzahnbürsten gereinigt, wobei die Kurzkopfzahnbürsten den Langkopfzahnbürsten überlegen waren [Arnold und Trost, 1972]. Eine weitere Arbeit zeigte, wie das elektrische Borstensystem BRAUN Oral-B EB9 mit seinen längeren Filamenten Plaque mit einer grösseren Effizienz entfernt als ihr elektrisches Vorgängermodell (BRAUN Oral-B EB5). Hierzu wurde ein automatisiertes Putzeffizienzsystem verwendet, welches die künstlichen Zähne mit drei verschiedenen Bewegungsmuster reinigte [Ernst et al., 1997]. In einer weiteren Studie wurden Zähne mit zwei verschiedenen Borstensystemen von instruierten Studierenden und von einem modernen Roboter gereinigt, um eine Aussage machen zu können wie die in vitro Plaqueentfernung sich von der Plaqueentfernung in vivo unterscheidet [Lang et al., 2014]. Die Resultate dieser Arbeit zeigten, dass der Roboter mit einer höheren Effizienz Plaque entfernte im Vergleich zur klinischen Messung (in vivo). Dabei wurden die gleichen Testbürsten, die gleichen Bewegungsmuster sowie der gleiche Druck mit dem die Zähne gereinigt wurden verwendet. In vivo bestand in der Reinigungseffizienz kein signifikanter

Unterschied zwischen den beiden Testbürsten, während in vitro sich die Bürsten messbar voneinander unterschieden.

Die Klinik für Zahnerhaltung, Präventiv & Kinderzahnmedizin der Zahnmedizinischen Kliniken der Universität Bern entwickelte zusammen mit einer Industriefirma, welche nicht genannt werden möchte, ein Messsystem, um die Putzeffizienz von unterschiedlichen Borstensystemen ermitteln zu können. Die Zusammenarbeit der Universität Bern mit dieser Industriefirma hatte die Einschätzung der Genauigkeit eines solchen Systems zum Ziel, um reproduzierbare und verlässliche Werte zu erhalten. Aspekte der Genauigkeit wurde in der Masterarbeit, "Analyse der Messgenauigkeit eines automatisierten Putzeffizienzsystems", untersucht [Bauer, 2015]. Weiterhin stand die Verbesserung und Weiterentwicklung dieses Messsystems, wie in der Masterarbeit beschrieben, im gemeinsamen Interesse. Verschiedene Borstensysteme kombiniert mit verschiedenen Bewegungsmustern wurden nach unserer Erkenntnis bis jetzt nicht untersucht.

Ziel dieser Doktorarbeit war es, die aus den Versuchen eines automatisierten Messsystems erhaltenen Daten zu analysieren und daraus die Diskriminierung der verschiedenen Borstensysteme mit statistischen Grössen zu beschreiben. Einfluss auf die Daten dieser Arbeit hatten verschiedene Parameter wie Bewegungsmuster, Borstensystem, Zähne & Zahnflächen.

Die Nullhypothese war, dass zwischen den gemessenen Werten der unterschiedlichen Borstensysteme keinen signifikanten Unterschied besteht und somit keine messbare Diskriminierung der verschiedenen Borstensysteme vorliegt.

2. Material und Methode

2.1 Das Messsystem

In dieser Dissertation steht der Vergleich der Reinigungsleistung von verschiedenen Borstensystemen mit Hilfe dieses vollautomatisierten Putzeffizienzsystems im Vordergrund. Wir untersuchten, ob ein Unterschied in der prozentualen Reinigungsleitung der Borstenfelder einer elektrischen Zahnbürste im "ON- bzw. im "OFF-Modus" besteht und wenn ja, wie gross dieser Unterschied ist. Wir untersuchten die Reinigungsleistung des Standardborstensystems (konventionelle Handzahnbürste) der "American Dental Association"(ADA) mit der Reinigungsleistung des elektrischen Borstenfeldes im "OFF-Modus" vergleichen. Weiter zu untersuchen war, ob die Bewegung des Putzeffizienzsystems eine Rolle spielt und wie sich die Putzleistung bei elektrischen Borstenfeldern gegenüber nicht-elektrischen Borstenfeldern verhält. Damit die Diskriminierung von verschiedenen Borstenfeldern untersucht werden konnte, brauchte es statistische Verfahren. Diese dienten dazu, die bei diesen Versuchen gewonnenen Daten aussagekräftig und richtig interpretieren und darstellen zu können. Unter Diskriminierung verstehen wir, dass unter gleichen Messbedingungen anhand der ausgewerteten Daten zwei Bürsten sich voneinander unterscheiden. Es braucht ein Messsystem, das bei jedem Messdurchgang minimalste Veränderungen erfassen kann und reproduzierbar ist, um die Diskriminierung von Borstenfeldern beurteilen zu können. Diese Anforderungen können in der Regel nur automatisierte Messsysteme erfüllen, da diese jeden Messungsdurchlauf mit einer sehr hohen Präzision und mit minimalsten Abweichungen durchführen. Bei diesem Messsystem wurde die Genauigkeit mit Hilfe eines Roboters erreicht.

Das Messsystem bestand aus einem einarmigen Roboter IR 120 der Firma ABB (ABB Robotics, Zürich, Zürich, Schweiz). Der Roboterarm wies fünf Freiheitsgrade auf, sodass der Greifarm jeden beliebigen Punkt im Raum erreichen konnte. Die Unterkiefermodelle wurden aus Aluminium gefräst. Auch die herausnehmbaren Zähne bestanden aus Aluminium, um eine optimale, reproduzierbare und beständige Oberfläche garantieren zu können. Gesamthaft wurden sechs identische Unterkiefermodelle und sechs komplette Zahnsätze des dritten Quadranten (31 bis 37) hergestellt, welche mehrmals für sämtliche Durchläufe des Roboters verwendet wurden. In diversen Vorversuchen wurde eruiert, dass Zähne von Hand mit Farbe bepinselt genauere Farbverteilungen auf der Zahnoberfläche ergeben, als ein maschinelles Eintauchen in Farbe. Die Farbe ist auf Basis eines Alkohol- (89 Gew. %), Glycerin- (10 Gew. %) & Farbpigmentgemisches

(1 Gew. %) aufgebaut. Neben der Kalibrationskamera HD-5000 (Microsoft, Redmund, Washington, USA) für die Borstenpositionierung wurde eine Übersichtskamera installiert (Go Pro Hero, San Mateo, Kalifornien, USA) welche nach der Zahnreinigung und vor der Einzelzahnauswertung eine Übersichtsaufnahme vom gesamten bestückten Gebiss machte. Abb. 1 und 2 zeigen ein Beispiel der Reinigung des gesamten Gebisses mit der Bürste 1 (ADA) mit der Bewegung 1 (Schrubben) bei Halter 6. Zusätzlich wurden die in der Masterarbeit mittels Poweranalyse ermittelten sechs Borstensystemhalter in Betrieb genommen.

Die Aluminiumzähne wurden in einer externen Halterungsvorrichtung von Hand mit der Farbe bepinselt und nach dem Antrocknen in das Unterkiefermodell eingelegt.

Alle Borstensystemhalter waren mit einer zusätzlichen Halterung bestückbar, damit auch die elektrischen Borstensysteme einspannbar waren. Auch wurden alle Zähne (31-37) in den Versuch aufgenommen.

Abb. 1: *Übersichtsaufnahme von bukkal nach der Reinigung mit der ADA-Bürste und der Bewegung Schrubben.*

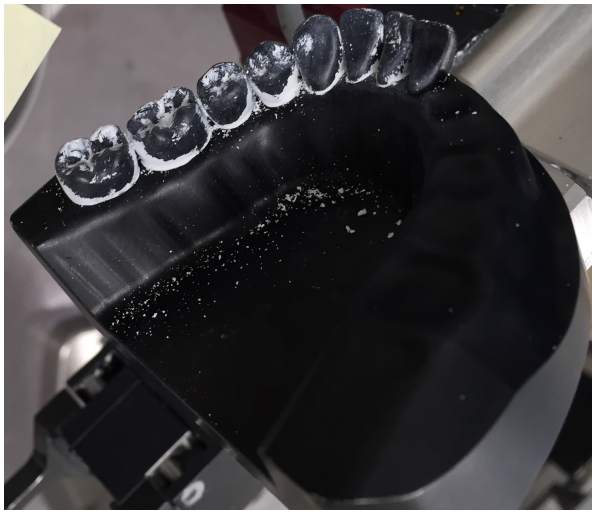


Abb. 2: *Übersichtsaufnahme von lingual nach der Reinigung mit der ADA-Bürste und der Bewegung Schrubben.*

Der Greifarm des Roboters holte sich ein zu reinigendes UK-Modell und legte dies im Reinigungshalter des Roboters ein. Anschliessend wurde ein zu testendes Borstenfeld vom Greifarm geholt und damit zur Kalibrationskamera geschwenkt. Nachdem am Roboter die richtige Position des Borstenfeldes eingestellt wurde, stellte das anschliessende Wiegesystem (KD, Transmetra, Flurlingen, Zürich, Schweiz) die optimale Kraft von 2 Newton ein, mit dem das Borstenfeld später die Aluminiumzähne reinigte. Während der Messung wurde der Anpressdruck nicht weiter überwacht. Anschliessend schwenkte der Roboterarm mit dem eingespannten Borstenfeld zum Unterkiefermodell und putzte mit einer der drei Bewegungsmuster Schrubben, Kreisen

und Rot-Weiss die angefärbten Aluminiumzähne. Die Bewegungsmuster werden in Abschnitt 2.3.1 genauer erläutert.

Nach der Zahnreinigung legte der Roboter das Borstenfeld wieder an der ursprünglichen Position ab. Der Roboterarm holte sich vor der Einzelzahnauswertung das gesamte Gebiss und hielt es vor die Übersichtskamera, um eine Gesamtaufnahme zu machen. Anschliessend wurden die einzelnen Zähne ausgeworfen und mit dem Umgreifarm so umgespannt, dass die Flächen zum Fotografieren zugänglich waren. Über dem Fotosystem (Vision-System FZ, Omron, Shimogyo, Kyoto, Japan) wurden von allen Seiten pro gereinigten Zahn je sieben Bilder geschossen. Die Bilder wurden wie in Abschnitt 2.2 beschrieben, auf dem Vision-System (Software FZ, Omron, Shimogyo, Kyoto, Japan) analysiert, indem die Anzahl nicht gereinigter, noch angefärbter Pixel ermittelt wurde. Danach wurde diese auf einen Computer (Windows PC) übertragen und dort abgespeichert. Die abfotografierten Zähne wurden anschliessend in den Entsorgungsbehälter abgelegt und zur Wiederverwendung gereinigt.

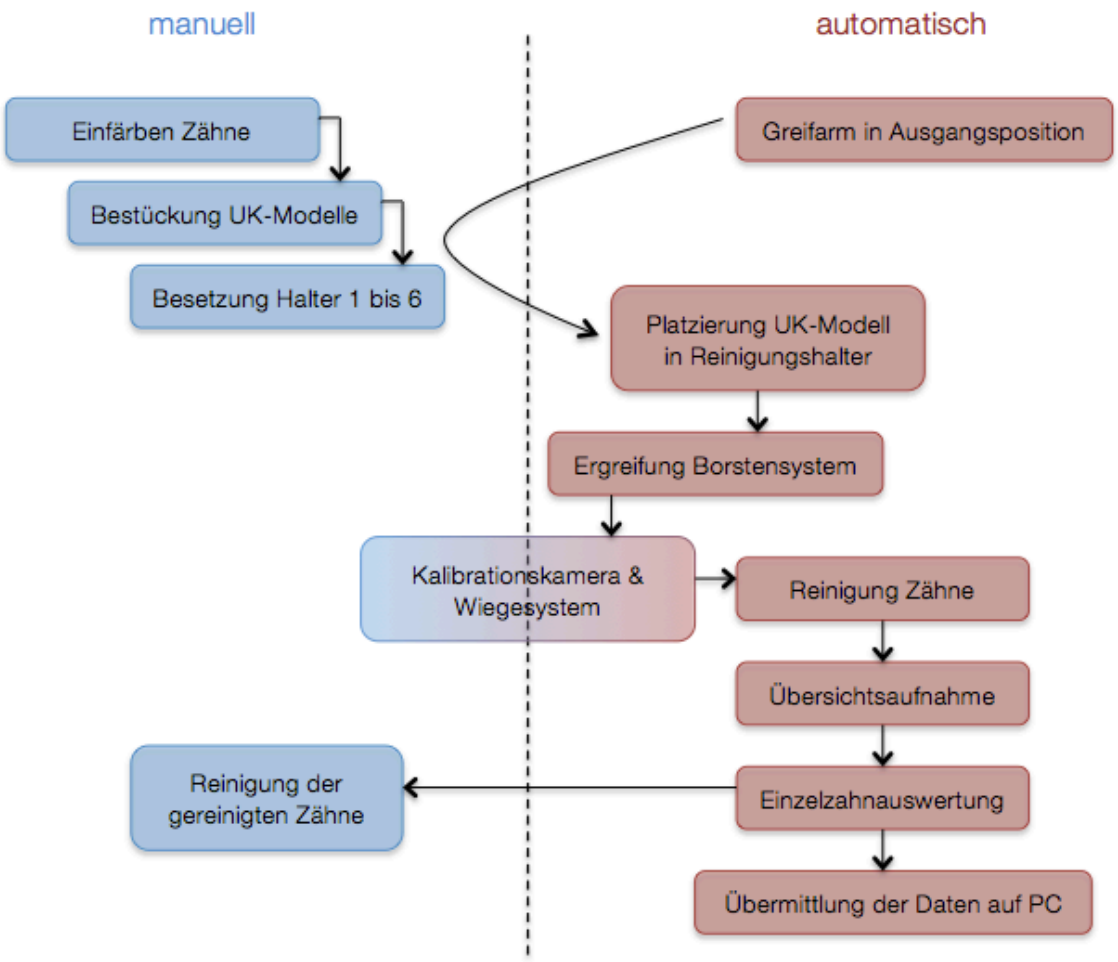


Abb. 3: *Workflow eines kompletten Durchlaufs bzw. einer kompletten Teilmessung. Die blauen Kästchen zeigen, welche Schritte manuell, die roten welche vom Greifarm des Roboters automatisch durchgeführt wurden.*

Ein Durchlauf (Teilmessung) war nun zu Ende und so fuhr der Roboterarm den nächsten Halter mit einem neuen eingefärbten Gebiss an. Nach einer kompletten Messung mit einer Bewegung (nach 6 Teilmessungen) folgte analog die nächste Messung mit einer anderen Bewegung. Die ausgeworfenen Zähne wurden mit Hilfe eines Ultraschallbades gereinigt und mit Druckluft getrocknet, sodass diese für einen neuen Durchlauf (Teilmessung) wiederverwendet werden können. Wie bereits beschrieben mussten nach jeder Messung die Unterkiefermodelle mit neu bepinselten Aluminiumzähnen bestückt werden, bevor eine neue Messung durchgeführt werden konnte. In Abb. 3 ist so ein kompletter Durchlauf graphisch dargestellt.

2.2 Die Bildanalyse

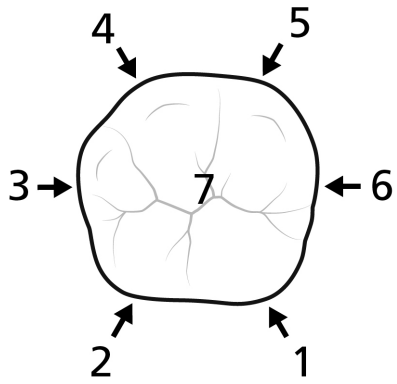


Abb. 4: *Die 7 Aufnahmerichtungen eines Zahnes (hier Zahn 36).*

Pro Zahn wurden sieben Bilder aus standardisierten Richtungen aufgenommen (siehe Abb. 4). Jedem dieser Bilder wurden vordefinierte Masken (Teilflächen) überlagert, welche die ausgewerteten Flächen darstellten (100%). Die Anzahl in den einzelnen vordefinierten Masken noch vorhandenen Farbreste wurden vom Vision-System mittels eines Farb-Thresholdings-Algorithmus erfasst und in Pixel angegeben. 60 Pixel entsprachen einer Länge von 1mm. Da in jeder Teilfläche eine definierte Anzahl an Pixel Platz hatte (GANZ), konnte man so pro Teilfläche den nicht geputzten Anteil (PLAQUE) als Prozentwert ermitteln (PLAQUE PERCENT). Für die Berechnung der nominalen Flächen wurden in dieser Arbeit alle vorhandenen angefärbten Pixel zusammengezogen und durch die Summe der zusammengezogenen GANZ-Flächen dividiert.

$$PLAQUE\ PERCENT\ = \frac{gepoolt\ PLAQUE}{gepoolt\ GANZ}$$

Die Grösse der Teilflächen (Abb. 5) rangierte zwischen 7360 Pixel (Zahn 32 lingual, mesiozervikale Flächen) und 182785 Pixel (Zahn 36, okklusal). Die Werte wurden in Anzahl Pixel auf dem Computer angegeben.

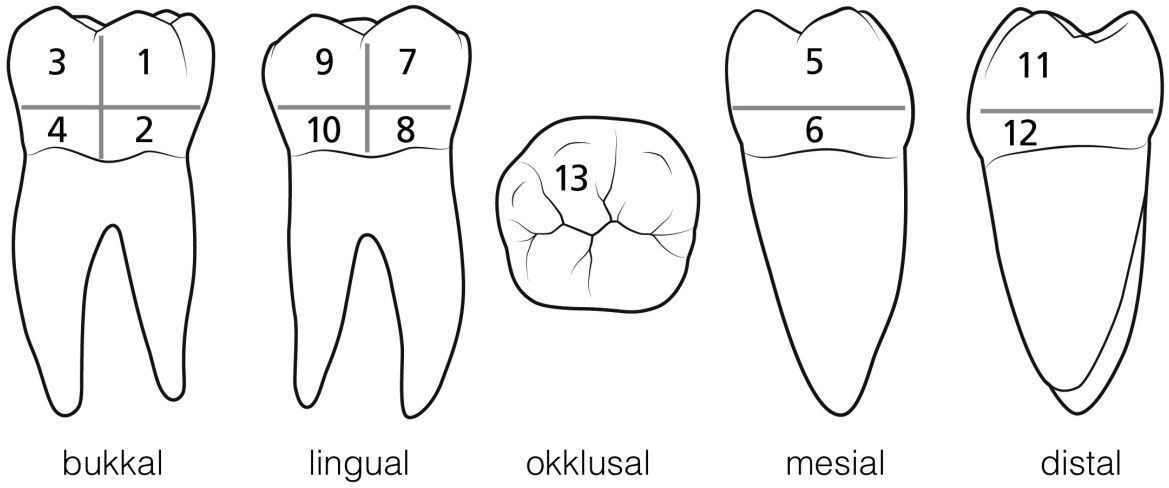


Abb. 5: *Die 13 Flächen auf den Zahn verteilt (hier bei Zahn 36 dargestellt).*

Die bukkale und die linguale Fläche des Zahnes beinhalteten je vier Teilflächen, die interdentalen Flächen beinhalteten je zwei Teilflächen, die okklusale Fläche beinhaltete eine Teilfläche. Die zervikalen Teilflächen reichten nur 2 mm über den Zahnsaum hinaus und stellten daher sehr viel kleinere Teilflächen dar als die koronalen (auf Abb. 5 vereinfacht und nicht massstabsgetreu abgebildet). Aus diesen 13 Teilflächen hat man noch 12 nominale Flächen (Fläche 14 bis Fläche 25) zusammengezogen, um eine übersichtlichere Statistik machen zu können. Die Flächen 21 bis 25 dienten für zusätzliche statistische Aspekte. Sie führten ebenfalls zu wichtigen Aussagen in dieser Dissertation und wurden daher ergänzend zu den Flächen 1 bis 20 mit «zusätzliche Aspekte*» benannt. Wir hatten also schlussendlich folgende Flächenlokalisationen:

Tab. 1: *Übersicht aller 25 Flächenlokalisationen*

Flächen	Teilflächen	Flächen	Nominale Flächen
Fläche 1	bukkal, distokoronal	Fläche 14	alle koronalen Flächen (1+3+5+7+9+11)
Fläche 2	bukkal, distozervikal	Fläche 15	alle zervikalen Flächen (2+4+6+8+10+12)
Fläche 3	bukkal, mesiokoronal	Fläche 16	alle bukkalen Flächen (1+2+3+4)
Fläche 4	bukkal, mesiozervikal	Fläche 17	alle lingualen Flächen (7+8+9+10)
Fläche 5	mesial interdental, koronal	Fläche 18	alle interdentalen Flächen (5+6+11+12)
Fläche 6	mesial interdental, zervikal	Fläche 19	alle Flächen ohne okklusal (1 bis 12)
Fläche 7	lingual, mesiokoronal	Fläche 20	alle Flächen inkl. okklusal (1 bis 13)
Fläche 8	lingual, mesiozervikal	Fläche 21	Glattflächen* (1+3+7+9)
Fläche 9	lingual, distokoronal	Fläche 22	Approximalflächen* (5+11)
Fläche 10	lingual, distozervikal	Fläche 23	Zervikalflächen* (2+4+6+8+10+12)
Fläche 11	distal interdental, koronal	Fläche 24	Okklusalfläche* (13)
Fläche 12	distal interdental, zervikal	Fläche 25	alle Flächen inkl. okklusal* (1 bis 13)
Fläche 13	okklusale Fläche	*zusätzliche Aspekte	

2.3 Der Messablauf

Wie in Abb. 6 dargestellt wurden drei Messreihen gemessen. Jede Messreihe wurde mit einem anderen Borstenfeld durchgeführt (Bürste 1, 2 & 3). Eine Messreihe bestand aus drei Messungen, die jeweils für ein Bewegungsmuster standen (1=Schrubben, 2=Kreisen, 3=Rot-Weiss). Die Messung eines Bewegungsmusters wurde als Teilmessung sechs Mal (=Anzahl Halter) wiederholt. Eine Teilmessung stellte einen Durchlauf des Roboters dar. Sie beschrieb also den gesamten Vorgang an einem Gebiss mit eingefärbten Zähnen, von der Reinigung durch eine der drei Bewegungsmuster, der Fotografie des gesamten Gebisses und der geputzten Flächen und der finalen Analyse durch das Vision-System. Solcherart wurden mit drei Borstenfeldern und jeweils drei Bewegungsmustern auf 6 Halter mit je sieben Zähnen mit je 13 Flächen total 4914 unabhängige Flächenwerte generiert. Dies zusammen mit den 12 gerechneten nominalen Flächen ergab total 9450 Messwerte. Alle Daten stammen aus den Versuchen, die nach einem strengen Protokoll ausgeführt wurden. Ebenfalls wurden alle Versuche von der gleichen Person durchgeführt.

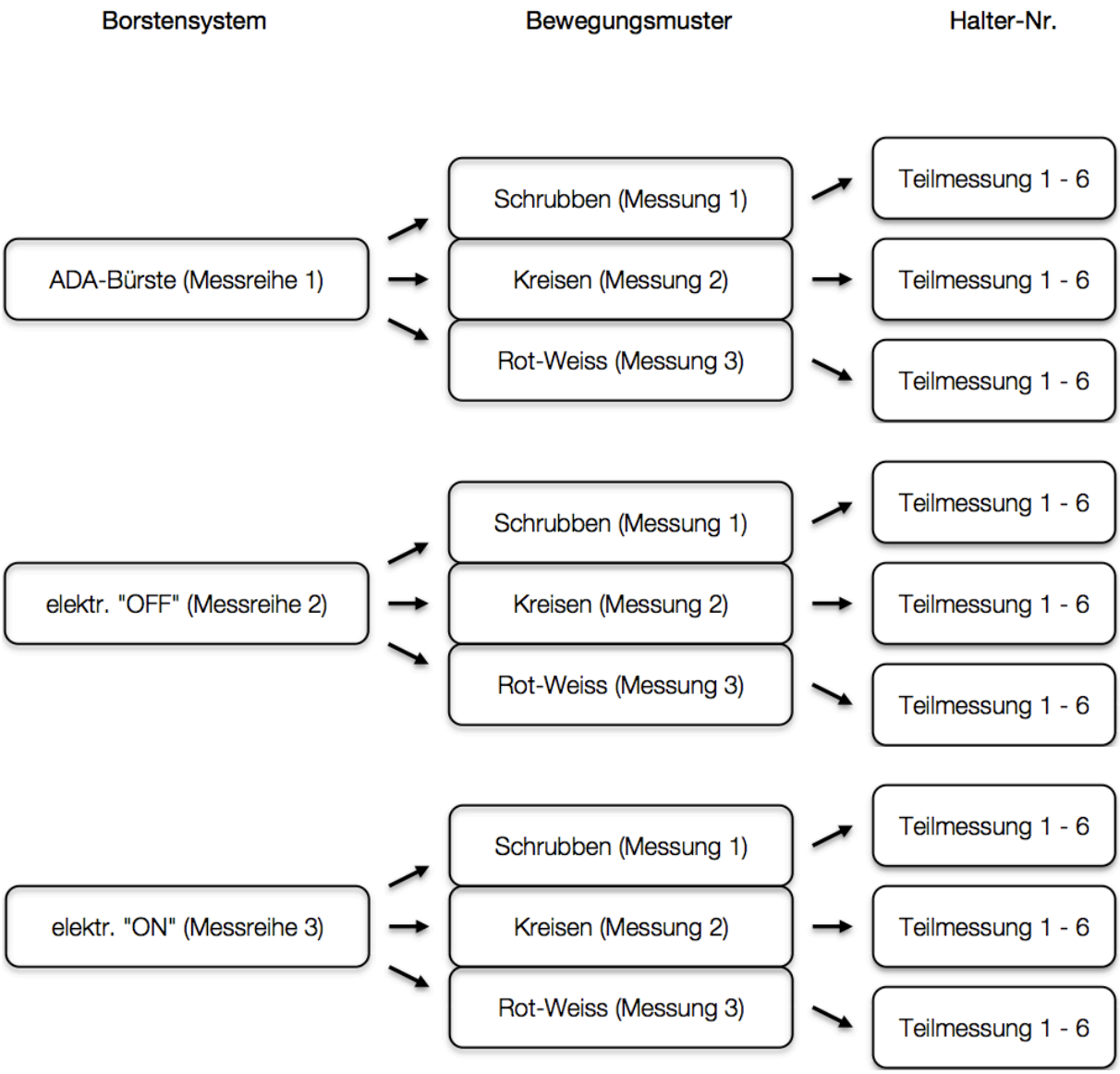


Abb. 6: *Workflow des kompletten Messablaufs. Mit 3 Bürsten wurden je 3 verschiedene Bewegungsmuster ausgeführt. Mit jedem dieser 3 Bewegungsmuster wurde je 6 Mal gemessen.*

2.3.1 Die Bewegungsmuster

Die drei Bewegungsmuster Schrubben, Kreisen und Rot-Weiss wurden ausgewählt, da sie die häufigsten Putztechniken beinhalten [Winterfeld et al., 2014]. Die verschiedenen Putztechniken sind im Detail im Paper "Relationship between plaque score and video-monitored brushing performance after repeated instruction—a controlled, randomised clinical trial" und in seinen Referenzen beschrieben [Schlueter et al., 2013].

Schrubben gilt als eine weit verbreitete Putzmethode, die auch als die "Horizontale Technik" bekannt ist. Trotzdem werden im Durchschnitt kreisende Bewegungen beim Zähne putzen häufiger und länger durchgeführt als horizontale Reinigungsbewegungen [Harnacke et al., 2015]. Kreisen soll eine stark vereinfachte und primitive Form der "Bass-Technik" darstellen, die heute beim gesunden Patienten ohne motorische Schwierigkeiten idealerweise instruiert wird. Allerdings zeigt sich, dass die Bass-Technik sehr schwierig zu erlernen ist und dass Menschen mit der Kreisen-Technik nach Fones instruiert, besser Plaque entfernen als Menschen, welche mit der Bass-Technik instruiert werden [Harnacke et al., 2012]. Das Bewegungsmuster Rot-Weiss imitiert die "Rot-Weiss-Technik" nach Leonard, wobei die Bürste von der marginalen Gingiva mit einer Rollbewegung auf den Zahn bewegt wird. Ein neuer Putzzyklus beginnt mit einem erneuten Ansetzen der Bürste am Gingivarand [Schiffner, 2011]. Diese Zahnreinigungstechnik wird in der Zahnmedizin häufig bei Patienten mit geschädigtem Parodont instruiert, da diese Technik schonend für das Zahnfleisch ist. Auf den Kauflächen wendete man bei jedem Bewegungsmuster die "Horizontale Technik" an [Weber, 2010].

Bei allen Bewegungsmustern wurde die Bewegung pro Zahn drei Mal von der gleichen Stelle aus wiederholt, bevor die Bürste zum nächsten Zahn wechselte. Dabei wurde beim Bewegungsmuster Schrubben eine Bewegungslänge von 5mm, bei Kreisen ein Kreisradius von 5mm und bei Rot-Weiss ein Winkel von 30° über 5mm gefahren. Die Reinigungsdauer eines Gebisses betrug bei Schrubben 23 Sekunden, bei Kreisen 41 Sekunden und bei Rot-Weiss 56 Sekunden. Das Zentrum der Borstenbewegungen lag bei den drei Bewegungsmustern jeweils am Zahnfleischrand jedes Zahnes.

2.3.2 Die Messreihen-Borstenfelder

Für Messreihe 1 wurde die ADA-Bürste (Borstenfeld der Bürste 1), ersichtlich auf Abb. 7, eingesetzt. Dieses Borstenfeld entspricht den Anforderungen an eine normale Zahnbürste nach den Richtlinien der American Dental Association (ADA) und wies abgerundete Filamente mit einem Durchmesser von 0.175mm auf. Das Borstenfeld bestand aus 47 Borstenbündeln, welche alle eine Höhe von 11mm aufwiesen.

Für Messreihe 2 und 3 wurde das Borstenfeld der Trisa Sonic Power Pro Interdental für die Bürsten 2 & 3 (elektrisch "OFF" & elektrisch "ON"), ersichtlich auf Abb. 8, eingesetzt. Dabei bedeutet "OFF", dass die elektrische Zahnbürste ausgeschaltet war, "ON" bedeutet, dass die elektrische Zahnbürste eingeschaltet war. Dieses Borstenfeld bestand aus T&R-Filamenten, welche einerseits zugespitzt (tapered) und anderseits abgerundet (rounded) waren. Der Durchmesser eines Filaments betrug 0.18mm. Der Lochdurchmesser betrug 1.7mm. Das Borstenfeld bestand aus 35 Borstenbündeln mit zwei unterschiedlichen Borstenlängen (9mm und 12mm).

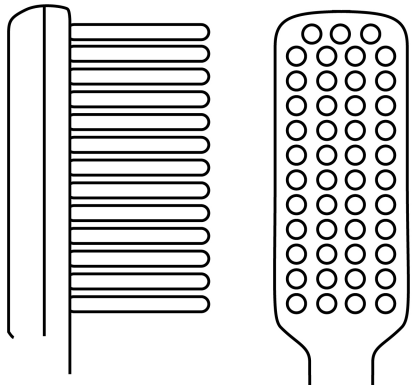


Abb. 7: *Borstenfeld der Bürste 1 der American Dental Association (ADA).*

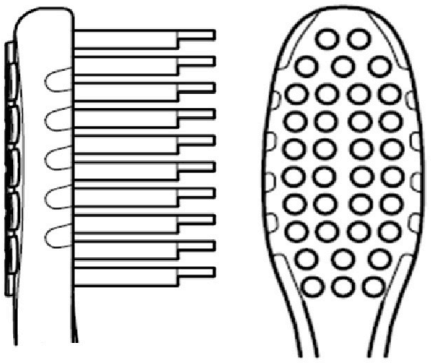


Abb. 8: *Borstenfeld der Bürste 2 & 3 (Trisa Sonic Power Pro Interdental).*

2.4 Statistische Auswertung

Die erhaltenen Daten dieser Arbeit, angegeben in Anzahl Pixel wurden in einem Excel-File abgespeichert. Aus verschlüsselten ID-Codes generierte die Excelmaske alle GANZ- und PLAQUE-Werte für alle 4914 Messwerte. Diese neu generierten Daten im Excel-File wurden ins SAS® bzw. ins Statistikprogram R importiert, die Prozentwerte und nominalen Flächen gerechnet und mit Hilfe von statistischen Verfahren ausgewertet.

2.4.1 Statistische Begriffe

Das Konfidenzintervall bedeutet ein aus Stichprobenwerten berechnetes Intervall, das den unbekannten wahren Parameter, in dieser Arbeit den Mittelwert, mit einer definierten Wahrscheinlichkeit überdeckt [Sachs, 1992]. Je kleiner das Konfidenzintervall, desto grösser ist auch die Genauigkeit der Teilmessungen. Eine Daten-Transformation wird oft angewendet, wenn die Statistik es mit Anteilen oder mit Prozentzahlen zu tun hat und die gewonnenen Daten nicht normal verteilt sind [Sokal, 1995]. Die Arcus Sinus Transformation zieht die Zahlen nahe 0 und 100 auseinander, während sie die mittleren Werte bewahrt, damit die Konfidenzintervalle der PLAQUE PERCENT-Werte an den Randbereichen nicht in den negativen Bereich wandern oder Werte über 100% ergeben. Auch ermöglicht dies Aussagen mit parametrischen Verfahren.

2.4.2 SAS®-Jobs

Mit SAS PROC MEANS wurden alle Mittelwerte dieser Arbeit ermittelt. Mit SAS PROC GLM liessen sich unterschiedliche Regressionen zur Varianzanalyse durchführen [SAS Institute Inc., 2013]. Die in dieser Arbeit erstellten Boxplots wurden im SAS® mit PROC GLM erzeugt. Damit wurden in dieser Arbeit unterschiedliche Datengruppen miteinander verglichen. SAS PROC UNIVARIATE ermöglichte in dieser Arbeit die Erstellung von Diagrammen (Boxplots).
Mit Hilfe von SAS®-Makroprogrammen hat man Mittelwerte, Standardabweichungen und transformierte ArcSin-Konfidenzintervalle nach verschiedenen Kriterien erzeugt und als Boxplot und Forestplot-ähnliche Graphiken übersichtlich dargestellt.

2.4.3 R-Jobs

Das Statistikprogram R wurde verwendet, um den Einfluss von Interaktionen wie Bürste, Bewegung und Zahn auf die Putzleistung statistisch wiederzugeben [R Core Team, 2014]. Mit Hilfe von PLAQUE PERCENT-Werten konnte dieser Einfluss der jeweiligen Interaktion auf die Putzleistung ermittelt werden. So wurde herausgefunden, welche Interaktion einen grossen oder keinen Einfluss auf die Reinigungsleistung des Zahnes hatte. Auch konnte eine klassische Rangierung der jeweiligen Interaktionen mittels stratifizierten Mann Whitney U-Test aufgezeigt werden, indem das R-Programm wiedergab, wie häufig ein gewisser Zahn durch ein gewisses Bewegungsmuster oder durch ein bestimmtes Borstensystem besser gereinigt wurde als mit einem anderen Bewegungsmuster oder durch ein anderes Borstensystem.

3. Resultate

3.1 Erfassung der Messgenauigkeit / Genauigkeitsanalyse

Ausgewertet wurde in dieser Studie die Variable PLAQUE PERCENT. Je höher der PLAQUE PERCENT-Wert pro Fläche, desto schlechter wurde diese Fläche gereinigt.

3.1.1 Boxplots

Die nachfolgenden drei Boxplots zeigen eine Übersicht aller PLAQUE PERCENT-Werte der jeweiligen Flächen 1 bis 25 bei den Bürsten 1 bis 3. Je grösser die Box einer Fläche ist, desto ungenauer war die Reproduzierbarkeit mit welcher diese Fläche gereinigt wurde. Desto tiefer der Mittelwert, desto besser wurde eine Fläche gereinigt und desto besser war die Putzeffizienz einer Bürste.

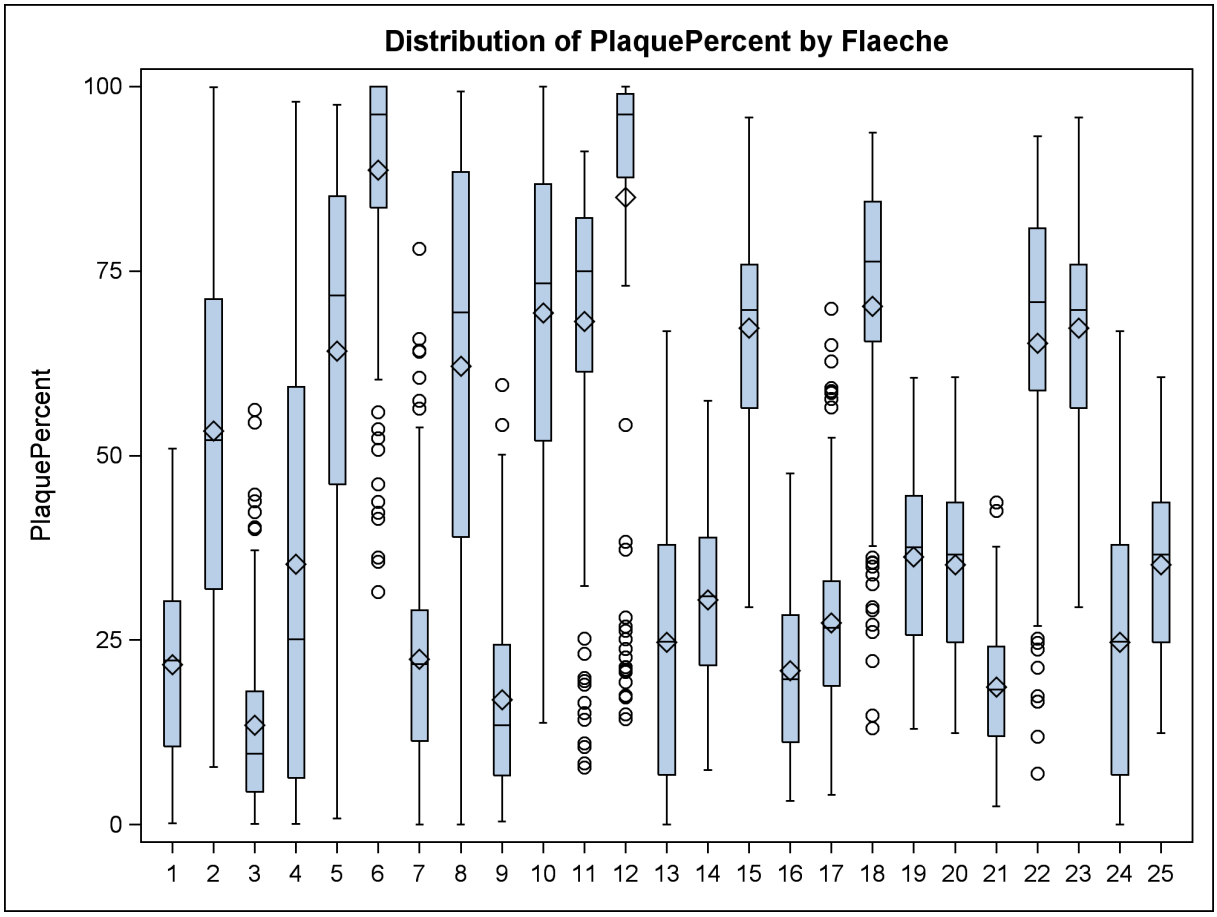


Abb. 9: *Verteilung aller PLAQUE PERCENT-Messwerte aller 25 Flächen der Bürste 1 (ADA),*

$N_{Fläche}$= 126, N_{total} = 3150. Der Diamant in der Box beschreibt den Mittelwert, der Strich in der Box den Median. Die einzelnen Kreise die Ausreisser.

Es ist gut zu erkennen, dass die koronalen Flächen (1, 3, 7 & 9 oder Fläche 14) besser und mit einer genaueren Reproduzierbarkeit gereinigt wurden als die zervikalen (2, 4, 8 & 10 oder Fläche 15). Zusätzlich wurden die beiden mesiozervikalen Flächen 4 & 8 (bukkal & lingual) mit einer schlechten Reproduzierbarkeit gemessen.

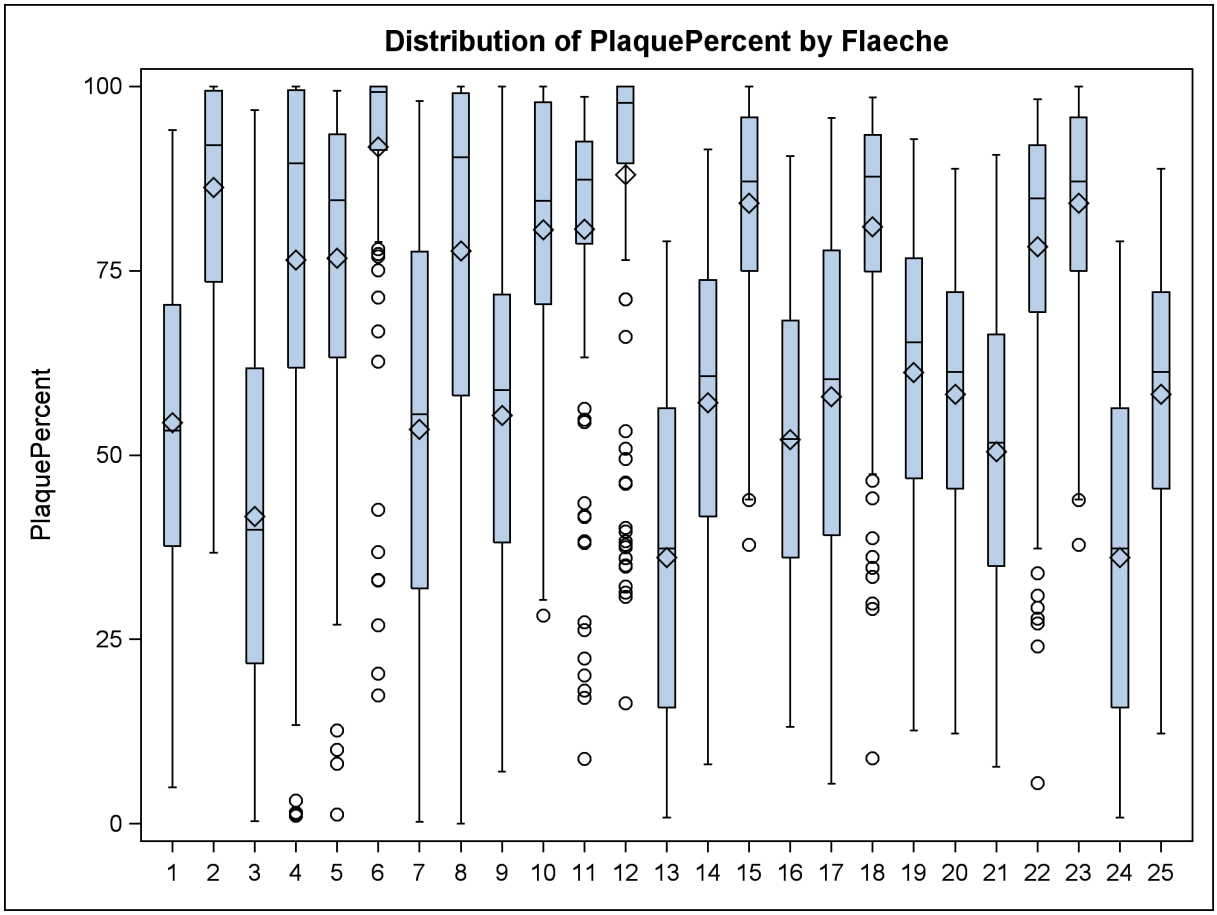


Abb. 10: *Verteilung aller PLAQUE PERCENT-Messwerte aller 25 Flächen der Bürste 2 (Trisa Sonic Power Pro Interdental, elektrisch "OFF"), $N_{Fläche}$= 126, N_{total} = 3150. Der Diamant in der Box beschreibt den Mittelwert, der Strich in der Box den Median. Die einzelnen Kreise die Ausreisser.*

Bei der Bürste 2, Trisa Sonic Power Pro Interdental elektrisch "OFF", wurden zwar die koronalen Flächen (14) ebenfalls besser gereinigt als die zervikalen (15), doch im Gegensatz zur Bürste 1 in Abb. 9 wurden hier die zervikalen Flächen mit einer grösseren Genauigkeit, sprich mit einer besseren Reproduzierbarkeit, gereinigt als die koronalen. Wenn man die einzelnen Flächen in

Abb.9 und Abb. 10 vergleicht, ist zu erkennen, dass Bürste 2 mit einer schlechteren Putzeffizienz und mit einer schlechteren Reproduzierbarkeit reinigte als Bürste 1.

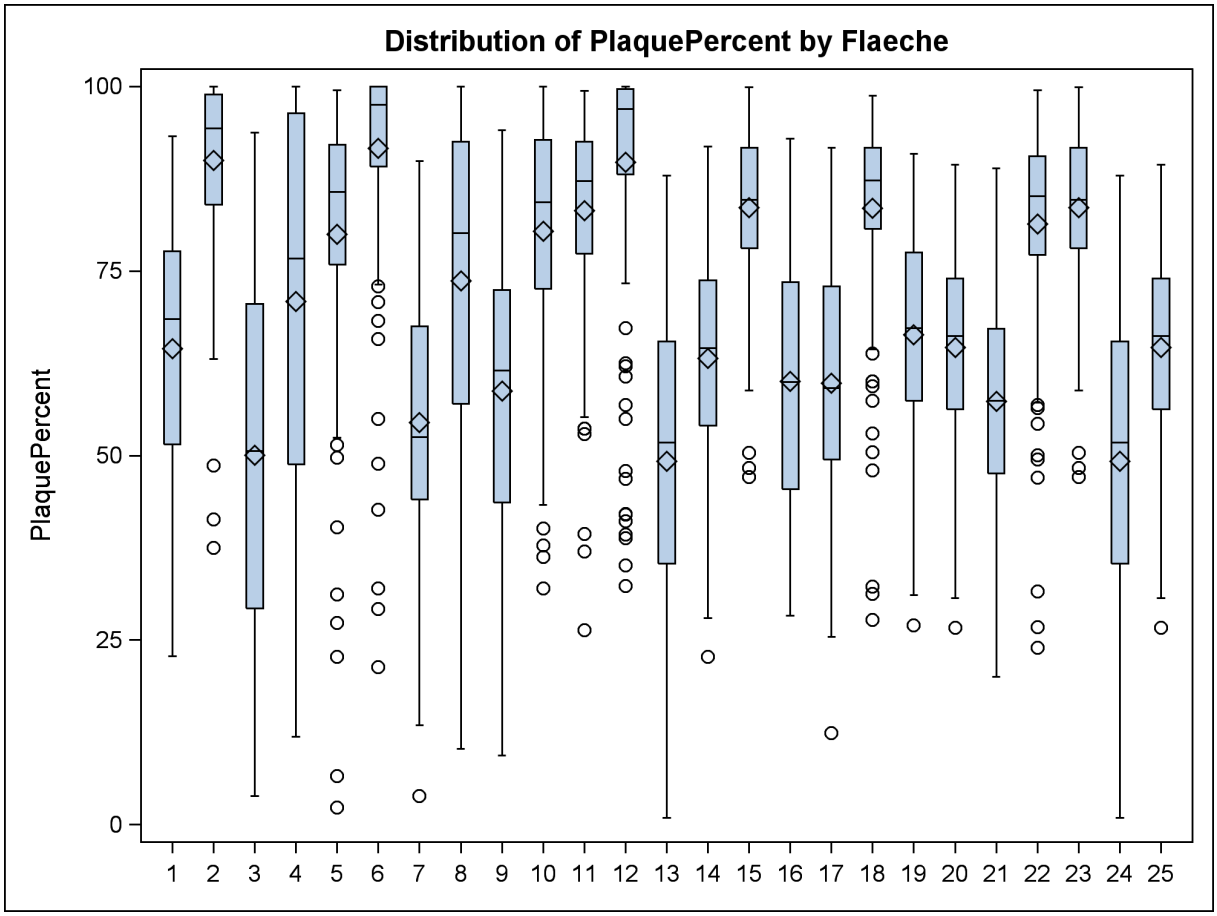


Abb. 11: *Verteilung aller PLAQUE PERCENT-Messwerte aller 25 Flächen der Bürste 3 (Trisa Sonic Power Pro Interdental, elektrisch "ON"),* $N_{Fläche}$*= 126,* N_{total} *= 3150. Der Diamant in der Box beschreibt den Mittelwert, der Strich in der Box den Median. Die einzelnen Kreise die Ausreisser.*

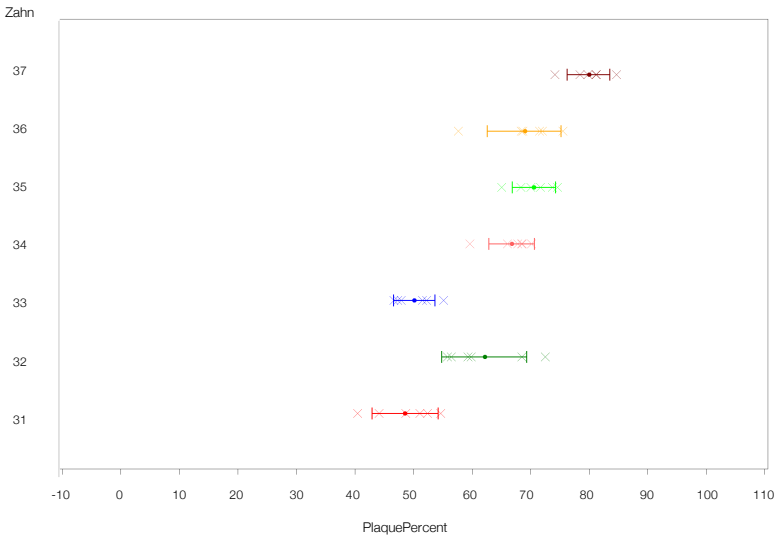
Was die Reinigung der koronalen Flächen (14) im Gegensatz zu den zervikalen (15) betrifft, reinigte Bürste 3 in Abb. 11 anlog zu Bürste 2 die koronalen besser aber mit einer schlechteren Reproduzierbarkeit als die zervikalen Flächen. Werden die Mittelwerte der Flächen 21 bis 25 betrachtet, so fällt auf, dass die Reinigung bei Bürste 3 schlechter als bei Bürste 1 & 2 war, diese aber genauer in der Reproduzierbarkeit war als bei Bürste 2.

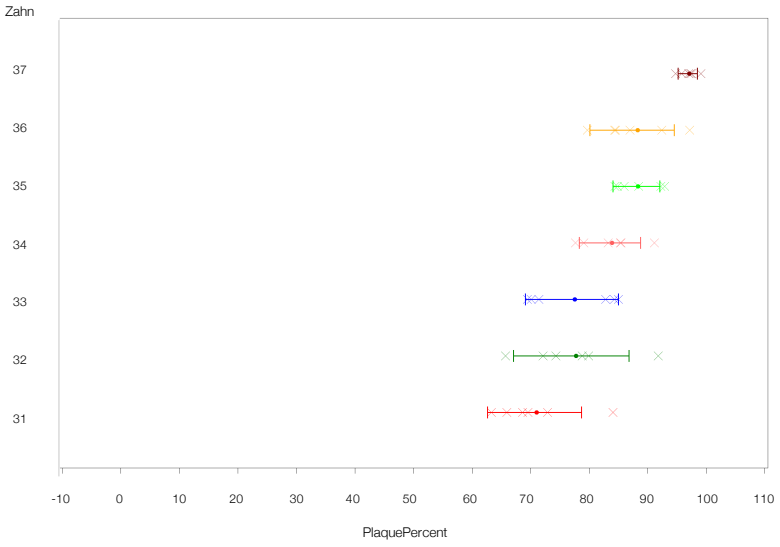
Auf den Abbildungen 9 bis 11 wurden oft eine relativ grosse Anzahl von Ausreissern gefunden. Dabei waren hauptsächlich die zervikalen Flächen und die Flächen der Interdentalräume davon betroffen (Flächen 5, 6, 11 & 12). Vor allem die distalen Anteile (Flächen 11 und 12) wiesen ein-

zelne stark abweichende Daten auf, obwohl diese Flächen einen relativ kleinen Interquartilsabstand haben.

3.1.2 Einfluss von Bürste, Bewegung auf die Genauigkeit der Messung

Die berechneten Konfidenzintervalle zeigen die Verteilung der Wiederholungen nach verschiedenen Auswahlkriterien und Sortierungen. In den nachfolgenden Abb. 12 bis Abb. 20 werden jeweils Werte der sechs Repetitionen einer Teilmessung (Bürste 1, 2, 3 und Bewegung Schrubben, Kreisen, Rot-Weiss) dargestellt, wobei auf einer Seite jeweils die Resultate einer Bewegung miteinander verglichen werden. In der Y-Achse wird jeweils das Kriterium BewegungZahnBürste und in der x-Achse das Kriterium PLAQUE PERCENT angegeben. Jede Zeile stellt einen Zahn (Zähne 31 bis 37) dar, wobei die Kreuze die unterschiedlichen PLAQUE PERCENT-Werte der 6 Teilmessungen pro Zahn wiedergeben und die Punkte den Mittelwert anzeigen. Hier wurde ein 95%-Vertrauensintervall verwendet. Je grösser dieses 95%-Vertrauensintervall ist, desto schlechter war die Reproduzierbarkeit an diesem Zahn und desto schlechter die Genauigkeit, mit welcher die Zähne gereinigt wurden. Die Graphiken in Abb. 12-20 wurden mittels eines eigens programmierten SAS® Macros erzeugt, welches eine grosse Anzahl Diagramme erstellte. Wir zeigen hier alle Resultate am Beispiel der zervikalen Flächen (Fläche 23).





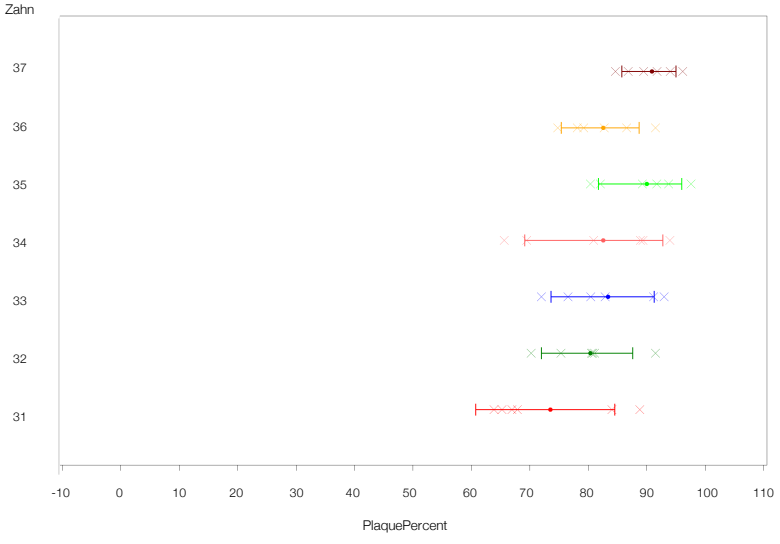


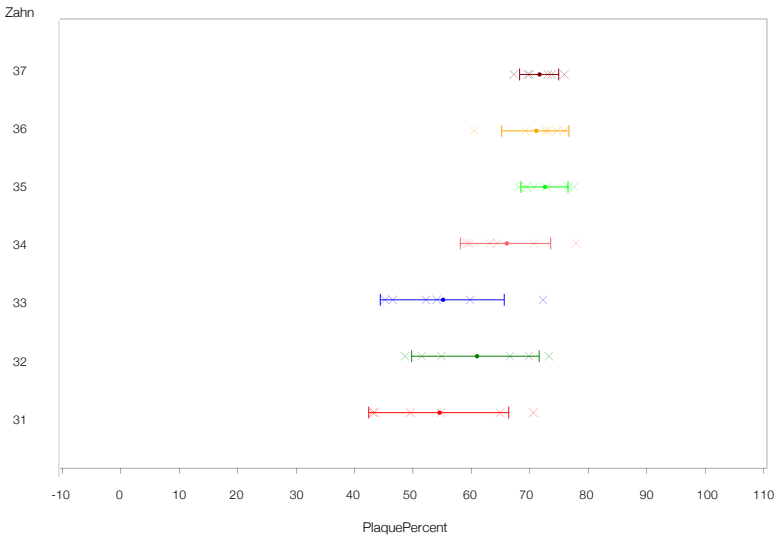
Abb. 12 - 14: *Die dargestellten Konfidenzintervalle stellen die Verteilung der Wiederholungen der PLAQUE-PERCENT Messwerte der Bürste 1 (ADA-Bürste), der Bürste 2 (Trisa Sonic Power Pro Interdental elektrisch "OFF") und der Bürste 3 (Trisa Sonic Power Pro Interdental elektrisch "ON") bei der Bewegung* ***Schrubben*** *an den Zervikalflächen der Zähne 31 - 37 dar. Die Kreuze beschreiben die Werte der sechs Teilmessungen eines Durchgangs.*

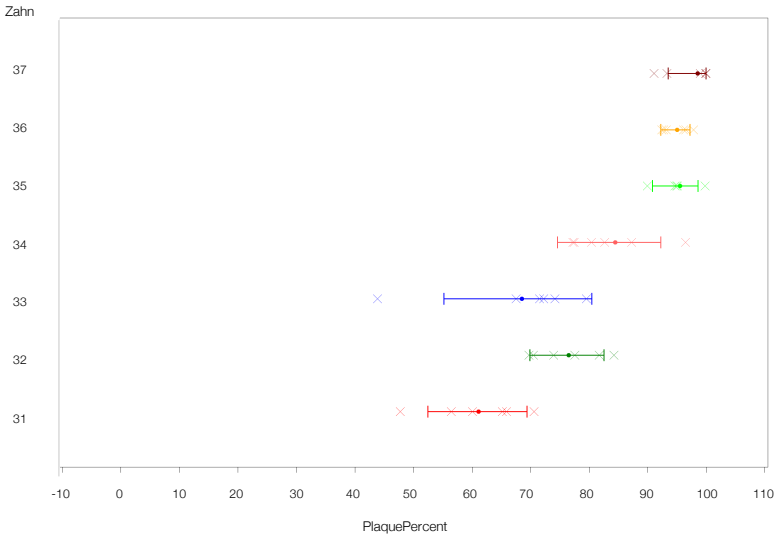
Bei Bürste 1 in Abb. 12 ist klar zu erkennen, dass die Zähne 33, 34, 35 & 37 mit der Bewegung Schrubben mit einer höheren Genauigkeit gereinigt wurden als die Zähne 31, 32 & 36. Auffällig ist hier auch, dass bei allen Zähnen ausser bei Zahn 37 nur eine Teilmessung ausserhalb des 95%-Vertrauensintervalls zu liegen kam.

Bei Bürste 2 in Abb. 13 wurde mit der Bewegung Schrubben nur der Zahn 37 mit einer hohen Reproduzierbarkeit, die Zähne 34 & 35 mit einer besseren Reproduzierbarkeit gereinigt als die restlichen Zähne (31, 32, 33 & 36).

Bei Bürste 3 in Abb. 14 war das Konfidenzintervall mit der Bewegung Schrubben wie bei Bürste 2 Zahn 37 am kleinsten, trotzdem war die Genauigkeit nicht sehr hoch im Vergleich zu Bürste 2 in Abb. 13. Die restlichen Zähne wiesen eher eine schlechte Reproduzierbarkeit auf. Ausser bei Zahn 31 gab es bei allen anderen Zähnen zwei Teilmessungen, welche sich ausserhalb des 95%-Vertrauensintervall befanden.

Werden die Messreihen in Abb. 12 bis 14 untereinander verglichen, so ist klar zu erkennen, dass bei der Bewegung Schrubben die Zervikalflächen der Messreihe 1 mit der höchsten Genauigkeit gereinigt wurden, da die Intervallgrössen dort am kleinsten sind.





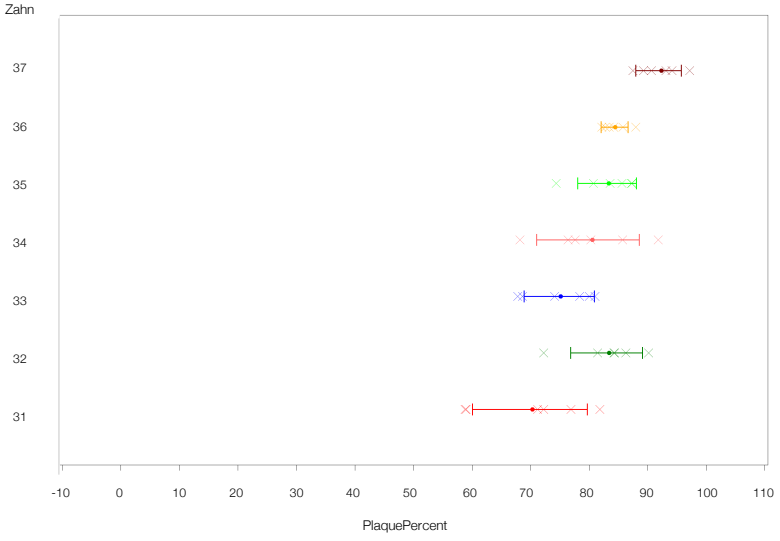


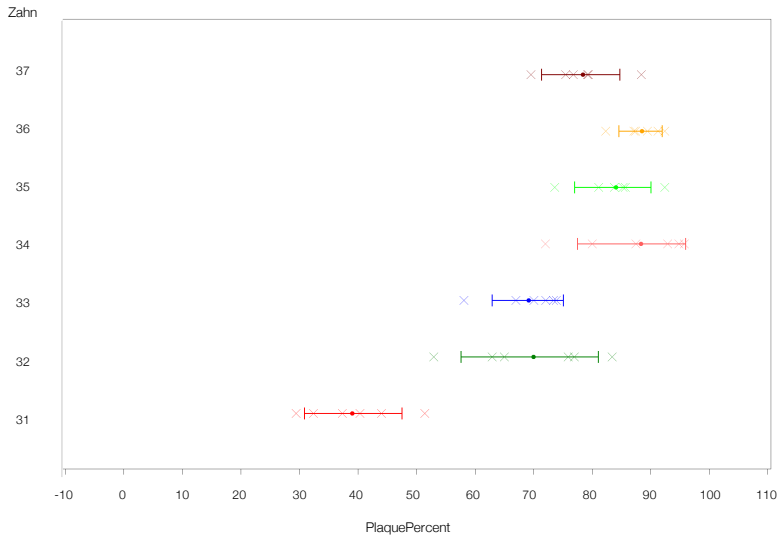
Abb. 15 - 17: *Die dargestellten Konfidenzintervalle stellen die Verteilung der Wiederholungen der PLAQUE-PERCENT Messwerte der Bürste 1 (ADA-Bürste), der Bürste 2 (Trisa Sonic Power Pro Interdental elektrisch "OFF") und der Bürste 3 (Trisa Sonic Power Pro Interdental elektrisch "ON") bei der Bewegung* ***Kreisen*** *an den Zervikalflächen der Zähne 31 - 37 dar. Die Kreuze beschreiben die Werte der sechs Teilmessungen eines Durchgangs.*

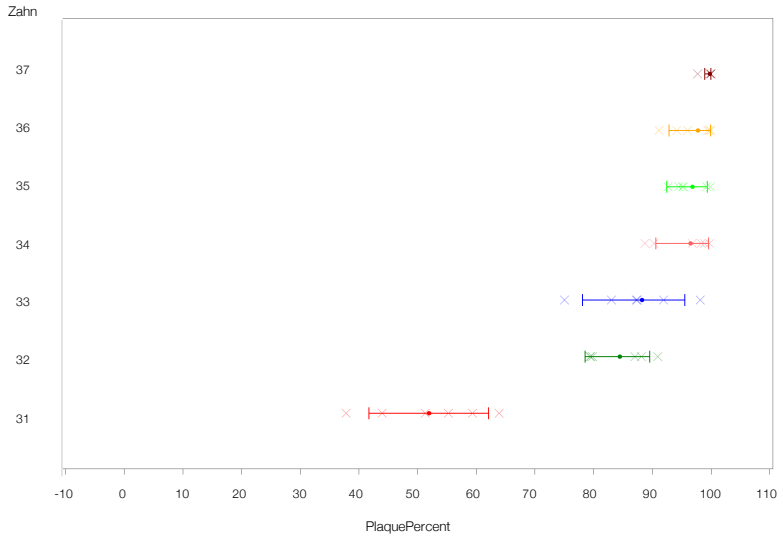
Bei Bürste 1 in Abb. 15 ist klar zu erkennen, dass die anterioren Zähne 31 bis 33 mit der Bewegung Kreisen mit einer schlechteren Reproduzierbarkeit gereinigt wurden als die posterioren Zähne 34 bis 37.

Auch bei Bürste 2 in Abb. 16 wurden die posterioren Zähne mit einer höheren Genauigkeit gereinigt als die anterioren Zähne, obwohl die Zähne 31 & 32 im Gegensatz zu Bürste 1 in Abb. 15 dieses Mal genauer, bzw. mit einer höheren Reproduzierbarkeit gereinigt wurden.

Bei Bürste 3 in Abb. 17 wurden wie bei den Bürsten 1 und 2 die anterioren Zähne mit einer schlechteren Reproduzierbarkeit gereinigt als die posterioren. Im Gegensatz zu Bürste 1 und Bürste 2 wurde der Zahn 33 mit einer besseren Genauigkeit gereinigt, da das 95%-Vertrauensintervall kleiner ist.

Werden die Messreihen in Abb. 15 bis 17 untereinander verglichen, so ist zu erkennen, dass bei der Bewegung Kreisen die Zervikalflächen der Messreihen 2 und 3 mit einer höheren Genauigkeit gereinigt wurden, als diejenigen der Messreihe 1. Die Intervallgrössen sind dort am grössten.





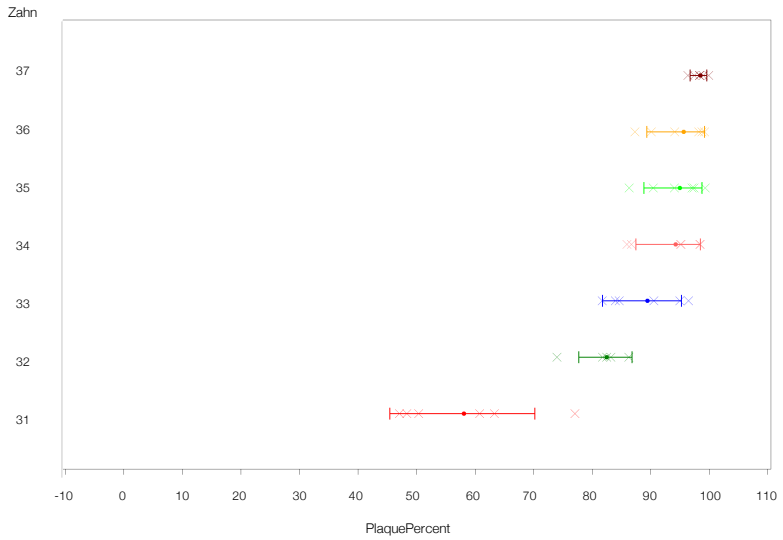


Abb. 18 - 20: *Die dargestellten Konfidenzintervalle stellen die Verteilung der Wiederholungen der PLAQUE-PERCENT Messwerte der Bürste 1 (ADA-Bürste), der Bürste 2 (Trisa Sonic Power Pro Interdental elektrisch "OFF") und der Bürste 3 (Trisa Sonic Power Pro Interdental elektrisch "ON") bei der Bewegung* ***Rot-Weiss*** *an den Zervikalflächen der Zähne 31 - 37 dar. Die Kreuze beschreiben die Werte der sechs Teilmessungen eines Durchgangs.*

Bei Bürste 1 in Abb. 18 ist mit der Bewegung Rot-Weiss zu erkennen, dass die einzelnen Zähne mit einer unterschiedlichen Genauigkeit gereinigt wurden. Zahn 36 wurde mit einer hohen Reproduzierbarkeit, die Zähne 31, 33 & 35 wurden mit einer mittleren und die Zähne 32 & 34 wurden mit einer schlechteren Reproduzierbarkeit gereinigt.

Bürste 2 in Abb. 19 reinigte mit dem Bewegungsmuster Rot-Weiss den Zahn 37 mit einer sehr hohen Genauigkeit. Zahn 31 wurde mit einer schlechten Genauigkeit gereinigt.

Bei Bürste 3 in Abb. 20 wurde mit der Bewegung Rot-Weiss wie bei Bürste 2 der Zahn 37 mit einer sehr hohen, Zahn 31 mit einer sehr schlechten Genauigkeit gereinigt.

Werden die Messreihen in Abb. 18 bis 20 untereinander verglichen, können beim Bewegungsmuster Rot-Weiss nicht eindeutige Unterschiede zur Genauigkeit gemacht werden. Es fällt auf, dass bei Messreihe 2 und 3 der Zahn 37 mit einer deutlich höheren Reproduzierbarkeit, der Zahn 31 mit einer schlechten Reproduzierbarkeit gereinigt wurde als bei Messreihe 1.

Einfluss der Zähne auf die Genauigkeit:
Wurden alle Zähne von den verschiedenen Borstensystemen bei allen Bewegungsmustern betrachtet, war zu erkennen, dass die Zervikalflächen des Zahnes 37 im Allgemeinen mit einer hohen Genauigkeit, die Zervikalflächen der Zähne 31-33 eher mit einer geringeren Genauigkeit gereinigt wurden. Frontzähne wurden im Allgemeinen ungenauer gemessen als die hinteren Zähne.

Einfluss der Bürsten auf die Genauigkeit:
Vergleicht man aber die drei Messreihen untereinander ist ersichtlich, dass Bürste 1 beim Bewegungsmuster Schrubben genauer reinigte als die anderen Bürsten. Bei den Bewegungsmustern Kreisen und Rot-Weiss kann keine einheitliche Aussage darüber gemacht werden, welches Borstensystem mit einer besseren, welches mit einer schlechteren Reproduzierbarkeit reinigte.

Einfluss der Bewegung auf die Genauigkeit:
Vergleicht man die einzelnen Bewegungsmuster in der Genauigkeit der Reinigung der Zähne kann ebenfalls nicht eine einheitliche Aussage gemacht werden, welche Bewegung eine bessere Reproduzierbarkeit aufweist als eine andere.

3.2 Putzleistung

Neben der Genauigkeitsanalyse in Abschnitt 3.1 interessierten vor allem die Einflüsse von Bürste und Bewegung auf die Putzleistung. Wie unterschiedlich war die Reinigung der verschiedenen Borstenfelder und wie verhielt sich das gleiche Borstenfeld im "ON"- bzw. "OFF"-Modus der elektrischen Zahnbürste? Wie gross unterschieden sich die einzelnen Bewegungen in der Reinigungsleistung der Zähne und welche Zahnflächen wurden besser, welche weniger gut gereinigt? Da in den Versuchen zur Ermittlung der Putzleistung die Zähne 31 & 37 zu einer grossen Anzahl an Ausreissern führten, wurden die Zähne 31 & 37 zur Verbesserung der Genauigkeit nicht in dieser Statistik berücksichtigt.

3.2.1 Einfluss des Borstensytems

Der im Anhang im Detail beschriebene, von Professor Dümbgen entwickelte stratifizierte Mann Whitney U-Test erlaubte die Verteilung zweier Variablen zu testen. Für die folgenden Tabellen, Tab. 2 bis Tab. 6, wurden 540 Messwerte (6 Halter x 5 Zähne x 3 Bürsten x 3 Bewegungen x 2 identische Vergleichsgruppen) verwendet. Tab. 3 gibt eine Übersicht der Resultate in der Putzleistung der verschiedenen Borstensysteme bei den Teilflächen 21 bis 24 wieder. Die Gesamtfläche 25 wird mit Hilfe von Tab. 2 genauer erläutert.

Tab. 2: *Tabellarische Darstellung der Putzleistung der jeweiligen Borstensysteme aller Flächen (Fläche 25), N = 540. Beispiel: Die ADA-Bürste reinigt in 525 Fällen von total 540 Fällen besser und nur in 15 Fällen schlechter als das elektrisch "OFF"-Borstensystem.*

	ADA	elektrisch "OFF"	elektrisch "ON"
ADA	NA	15	3
elektrisch "OFF"	525	NA	210
elektrisch "ON"	537	330	NA

Bei Fläche 25 (alle Flächen) wurden alle 13 Messwerte gepoolt und ausgewertet. Hier reinigte das ADA-Borstensystem in 525 Fällen von total 540 Fällen besser als das elektrisch "OFF"-Borstensystem und in 537 Fällen von total 540 Fällen besser als elektrisch "ON". Borstensystem elektrisch "OFF" reinigte in 330 von insgesamt 540 Fällen besser als Borstensystem elektrisch "ON". Dies zeigte schön, dass in diesem Versuch das ADA-Borstensystem um ein Vielfaches besser reinigte als Borstenfelder elektrisch "OFF" und elektrisch "ON". Modell P-Wert: < 0.001.

Tab. 3: *Tabellarische Darstellung der Putzleistung der jeweiligen Borstensysteme an den Flächen 21 bis 24 (für die Flächenlokalisationen siehe Seite 12), N = 540. Beispiel: Die ADA-Bürste reinigt an den Zervikalflächen (Fläche 23) in 513 Fällen von total 540 Fällen besser und nur in 27 Fällen schlechter als das elektrisch "OFF"-Borstenfeld.*

		ADA				elektrisch "OFF"				elektrisch "ON"			
	Flächen	**21**	**22**	**23**	**24**	**21**	**22**	**23**	**24**	**21**	**22**	**23**	**24**
ADA	**21**	NA				21				3			
	22		NA				58				75		
	23			NA				27				41	
	24				NA				115				44
elektrisch "OFF"	**21**	519				NA				205			
	22		482				NA				265		
	23			513				NA				308	
	24				425				NA				136
elektrisch "ON"	**21**	537				335				NA			
	22		465				275				NA		
	23			499				232				NA	
	24				496				404				NA

In Tab. 3: ist zu erkennen, dass das ADA-Borstensystem bei allen Flächen häufiger besser reinigte als elektrisch "OFF" (519, 482, 513 & 425 von 540 Messungen) und elektrisch "ON" (537, 465, 499 & 496 von 540 Messungen). Auch ist gut zu erkennen, dass das Borstensystem elektrisch "OFF" in Fläche 21 (335) und in Fläche 24 (404) öfters, in Fläche 22 (275) ähnlich oft und in Fläche 23 (232) seltener besser reinigte als elektronisch "ON". Modell P-Wert: < 0.001.

3.2.2 Einfluss der Bürsten-Bewegungsmuster

Auch bei der Bürsten-Bewegung gibt Tab. 5 eine Übersicht der Varianz in der Putzleistung bei Flächen 21 bis 24 wieder. Fläche 25 wird mit Hilfe von Tab. 4 genauer erläutert.

Tab. 4: *Tabellarische Darstellung der Putzleistung der jeweiligen Bürsten-Bewegungsmuster aller Flächen (Fläche 25), N = 540. Beispiel: Das Bewegungsmuster Schrubben reinigt nur in 124 Fällen von total 540 Fällen besser und in 416 Fällen schlechter als das Bewegungsmuster Kreisen.*

	Schrubben	Kreisen	Rot-Weiss
Schrubben	NA	416	261
Kreisen	124	NA	159
Rot-Weiss	279	381	NA

Bei Fläche 25 (alle Flächen) reinigte Bewegungsmuster Kreisen in 416 besser und nur in 124 von insgesamt 540 Fällen schlechter als Bewegungsmuster Schrubben. Kreisen reinigte auch in mehr Fällen besser (381 versus 159) als Bewegungsmuster Rot-Weiss. Daher erzielte Kreisen die beste Reinigungsleistung bei Fläche 25 während die Reinigungsleistung bei Schrubben und Rot-Weiss sich kaum unterschieden hat. Modell P-Wert: < 0.001.

Tab. 5: *Tabellarische Darstellung der Putzleistung der jeweiligen Bürsten-Bewegungsmuster an den Flächen 21 bis 24 (für die Flächenlokalisationen siehe Seite 12), N = 540. Beispiel: Das Bewegungsmuster Schrubben reinigt an den Zervikalflächen (Fläche 23) in 289 Fällen von total 540 Fällen besser und in 251 Fällen schlechter als das Bewegungsmuster Kreisen.*

		Schrubben				**Kreisen**				**Rot-Weiss**			
	Flächen	**21**	**22**	**23**	**24**	**21**	**22**	**23**	**24**	**21**	**22**	**23**	**24**
Schrubben	**21**	NA				390				244			
	22		NA				351				347		
	23			NA				251				70	
	24				NA				314				285
Kreisen	**21**	150				NA				158			
	22		189				NA				277		
	23			289				NA				76	
	24				225				NA				257
Rot-Weiss	**21**	296				382				NA			
	22		193				263				NA		
	23			470				464				NA	
	24				255				283				NA

Tab. 5 zeigt auf, dass es nicht einfach eine Bürstenbewegung gab welche bei allen Flächen häufiger besser reinigte als die Anderen. Kreisen reinigte bei den Flächen 21 (390, 382) & 25 (416, 381) häufiger besser als die anderen Bewegungsmuster. Bei den Flächen 22 (351, 347) & 24 (314, 285) reinigten Kreisen und Rot-Weiss ähnlich häufig besser als Schrubben. Schrubben reinigte aber häufiger besser bei Fläche 23 (289, 470) als die anderen zwei Bürsten-Bewegungen.

Als Fazit konnte schlussendlich davon ausgegangen werden, dass die Bürstenbewegung Kreisen am häufigsten besser reinigte als die Bürstenbewegungen Schrubben und Rot-Weiss, diese aber über alle Flächen betrachtet mit einer ähnlichen Putzleistung reinigten.

Modell P-Wert: < 0.001

3.2.3 Interaktion Bewegung und Bürste

Tab. 6: *Tabellarische Darstellung der Interaktionen zwischen Bürsten-Bewegungsmuster und Borstensystemen an den Flächen 21 bis 24 (für die Flächenlokalisationen siehe Seite 12), N = 540. Die hier dargestellten Resultate stehen im Vergleich zu den mit der ADA-Bürste mit der Bewegung Schrubben erhaltenen Resultate. Beispiel:* Bei der Interaktion Bewegung Rot-Weiss

mit Bürste elektrisch "ON" wurden alle Flächen (Fläche 25) im Schnitt zu 13.27% besser, bzw. mit 13.27% weniger PLAQUE PERCENT gereinigt als bei Bewegung Schrubben mit der ADA-Bürste.

		Kreisen					Rot-Weiss				
	Fläche	21	22	23	24	25	21	22	23	24	25
elektrisch "OFF"	21	-10.76					-5.52				
	22		-7.65					-0.29			
	23			-0.50					-6.66		
	24				-16.18					-11.03	
	25					-11.16					-3.59
elektrisch "ON"	21	-5.69					-11.12				
	22		0.27					4.49			
	23			-3.22					-8.26		
	24				-8.89					-19.92	
	25					-6.54					-13.27

Wurde aber die Interaktionen zwischen Bewegung und Bürste (Level 2-Interaktionen) in Tab. 6 betrachtet, so war gut zu erkennen, dass im Vergleich zur ADA-Bürste (Bürste 1) mit Bewegung Schrubben (Bewegung 1) fast alle Kombinationen leicht besser reinigten bzw. leicht weniger PLAQUE PERCENT nach der Reinigung vorhanden war. Bei der Interaktion Bewegung Rot-Weiss mit Bürste elektrisch "ON" wurde Fläche 21 im Schnitt zu 11.12% besser, bzw. mit 11.12% weniger PLAQUE PERCENT gereinigt als bei Bewegung Schrubben mit der ADA-Bürste.

Fazit:

Das ADA-Borstensystem war, wie bereits in Abschnitt 3.2.1 erläutert, den anderen Borstensystemen in der Reinigungsleistung überlegen. Ebenso reinigte das Bewegungsmuster Kreisen, wie in Abschnitt 3.2.2 erläutert, häufig besser als die anderen Bewegungsmuster. Da aber bei der Interaktion zwischen Bewegung und Bürste fast jede Kombination besser reinigte als das ADA-Borstensystem mit Bewegung Schrubben, zeigte dies, dass das Bewegungsmuster (Kreisen oder Schrubben) einen leicht grösseren Einfluss auf die Putzleistung der Zähne hatte, als die Wahl des Borstensystems.

Aufgrund von vielen Ausreissern und für die Verbesserung der Genauigkeit wurden die Daten der Zähne 31 und 37 bei der Untersuchung der Putzleistung in Abschnitt 3.2 nicht in der Statistik berücksichtigt (N=5). In der Erfassung der Messgenauigkeit in Abschnitt 3.1 und für die Boxplots wurden alle Zähne, inklusive 31 und 37, dargestellt.

4. Diskussion

Das Ziel dieser Arbeit war die Analyse der Diskriminierung verschiedener Borstensysteme mit Hilfe eines automatisierten Putzeffizienzsystems und damit statistische Unterschiede bei der Auswertung der Daten zu finden. In dieser Arbeit konnte aufgezeigt werden, dass die verschieden Borstensysteme gut voneinander diskriminierten. Detailliert wurde wiedergegeben, wie die Wahl der Bürste und die Wahl der Bewegung auf die Putzleistung der verschiedenen Flächen der unterschiedlichen Zähne Einfluss nehmen. Zusätzlich wurde auch wie in der Masterarbeit "Analyse der Messgenauigkeit eines automatisierten Putzeffizienzsystems" [Bauer, 2015] die Messgenauigkeit des verbesserten automatisierten Putzeffizienzsystems aufgezeigt.

Das in dieser Arbeit verwendete Putzeffizienzsystem ähnelte in gewisser Weise dem Roboter aus der Arbeit von Lang et al. [2014]. Es wurde ebenfalls ein einarmiges Robotersystem verwendet und auch die drei Bewegungsmuster stimmten in der Art der Reinigungsausführung mehr oder weniger überein. In der Arbeit von Lang et al. wurden die Zähne aber nicht von Hand mit künstlicher Plaque bepinselt, sondern ein weiterer Roboter überzog diese gleichmässig mit der künstlichen Plaque. Auch wurden die Zähne mit mehr Anpressdruck (3.5 N anstelle von 2 N) und beim Bewegungsmuster Rot-Weiss mit einem steileren Winkel (45° anstelle von 30°) gereinigt.

Es war gut zu erkennen, dass nicht alle Flächen eines Zahnes gleich gut gereinigt wurden und dass die Borstenfelder meistens unterschiedliche Rangordnungen in der Reinigungsleistung einnahmen. Wider Erwarten reinigte in dieser Arbeit das Standard-Borstensystem nach der American Dental Association (ADA-Bürste) im Allgemeinen besser als das elektrische "OFF"-Borstenfeld und dieses besser als das elektrisch "ON"-Borstenfeld. Dies widerspricht der in der Literatur meistens beschriebenen Aussage, dass elektrische Zahnbürsten den manuellen in der Entfernung von Plaque überlegen sind [Yaacob et al., 2014], [Nagy et al., 2016]. Es können viele verschiedene Gründe zu den Ergebnissen in dieser Arbeit geführt haben. Es könnte damit erklärt werden, dass einerseits die Härte der Borsten bei der ADA-Bürste deutlich höher waren als die Borsten der Trisa Sonic Power Pro Interdental Bürste. Daher könnte der Anpressdruck des Roboters bei zu weichen Borstensystemen anders gewesen sein. In der Literatur findet man viele Studien, die belegen, dass mittel-harte und harte Borstensysteme besser Plaque entfernen als weiche Borstensysteme, jedoch auch mehr Schäden an der Gingiva verursachen als weiche Bürsten [Zanatta et al., 2011], [Zimmer et al., 2011]. Zusätzlich wird auch in der Literatur

wie zum Beispiel von Caporossi et al. [2016] beschrieben, dass abgerundete Borstensysteme wie sie bei der ADA-Bürste vorkommen, Plaque besser entfernen als zugespitzte Borstensysteme wie bei der Trisa Sonic Power Pro Interdental Bürste. Auch könnten die Schwingungen der elektrischen Zahnbürste die ölige Komponente der Farbe auf der Zahnoberfläche eher noch verteilt haben, als dass die Farbe "weggewischt" wurde.

Allgemein könnten die beschriebenen Ausreisser die Analyse der Messgenauigkeit erschwert haben, was zur Folge gehabt haben könnte, dass die Richtigkeit und die Präzision der Resultate schlechter geworden sind. Mögliche Faktoren könnten die Genauigkeit beeinflusst haben:

- Wie bereits im Abschnitt 2.3.1 - Die Bewegungsmuster erläutert, wurden die einzelnen Gebisse je nach Bewegungsmuster bei der Reinigung unterschiedlich lange gereinigt. Obwohl an jedem Zahn die jeweiligen Bewegungsmuster drei Mal durchgeführt wurde, dauerte die Reinigung eines Gebisses bei Kreisen fast doppelt, bei Rot-Weiss mehr als doppelt so lange wie beim Bewegungsmuster Schrubben. Diese massiven Unterschiede in der Reinigungszeit könnten zu unterschiedlicher Gründlichkeit der Reinigung geführt haben.

- Vor dem Start der Messung jeder Messreihe mit dem automatisierten Putzeffizienzsystem wurde die Farbe mit einem Pinsel von Hand auf die Zähne aufgetragen. Dies führte in diversen Vorversuchen zu verbesserten Ergebnissen, doch dies könnte auch unweigerlich zu unterschiedlichen Farbkonzentrationen und Inhomogenitäten auf den einzelnen Zahnflächen geführt haben.

- Durch diesen Farbauftrag von Hand auf alle zu messenden Zähne, hatte die Farbe unterschiedlich lange Zeit auf den verschiedenen Gebissmodellen einzutrocknen. Auf einigen Bildern der Auswertung war zu erkennen, dass die Farbe auf manchen Zähnen schneller eintrocknete als auf anderen. Gut eingetrocknete Farbe führte eher zu einer homogeneren Reinigung, während noch feuchte Farbareale eher verschmiert wurden (siehe Abb. 21 & Abb. 22).

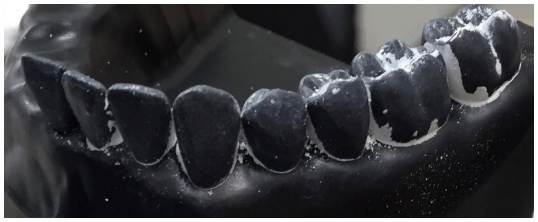


Abb. 21: *gut getrocknete Farbe*

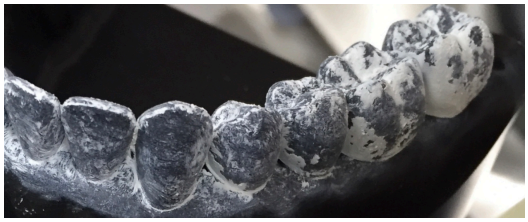


Abb. 22: *schlecht getrocknete Farbe*

- Die Genauigkeit könnte auch durch das für diese Auswertungen verwendete Thresholding-System beeinflusst worden sein. Falls dies zu sensitiv eingestellt worden war und dadurch viele eigentlich gereinigte Stellen in die PLAQUE PERCENT-Statistik aufgenommen wurden.

- Beim Umgreifen der Zähne könnte es zu Unregelmässigkeiten gekommen sein, so dass die vordefinierten Masken nicht immer identisch vom Computer auf die Zahnfotos projiziert wurden.

Es gibt noch eine grosse Anzahl an Möglichkeiten, das automatisierte Putzeffizienzsystem weiter zu perfektionieren und dieses besser zu erforschen. Es wäre interessant, die Farbe weiter zu entwickeln und der physiologischen Plaque so gut wie möglich nachzuempfinden, da in dieser Komponente die grösste Fehlerquelle stecken könnte. Volpenhein et al. beschreiben bereits 1994 eine künstliche Plaque aus Ethylester und einem Copolymer, welche einer 12-Stunden Plaque ähnlich ist. Auch werden schwarze Kunstzähne mit weisser Farbe aus Titanoxid in Ethanol eingefärbt [Schätzle et al., 2009 & 2010]. Bei neueren Versuchen künstliche Plaque der physiologischen nachzuempfinden werden die Zähne durch ein 3D-Laser-Scan System mit einer künstlichen Plaque gleichmässig überzogen [Kaiser et al., 2012]. Ein Ziel ist es, das System so weit zu perfektionieren, dass es mit der natürlichen oralen Reinigung verglichen werden könnte. Allerdings sind bis zu diesem Zeitpunkt noch viele Weiterentwicklungen und Untersuchungen des Roboters nötig.

5. Schlussfolgerung

In dieser Arbeit wird aufgezeigt, dass man die Diskriminierung verschiedener Borstensysteme eines automatisierten Putzeffizienzsystems analysieren und aufzeigen kann. Die Versuchsanordnung am Roboter erfolgte aufbauend auf die zuvor durchgeführte Masterarbeit nach einem klaren Schema. Die Versuche haben eine grosse Anzahl an Messwerten geliefert (N = 9450). Da dies zu einer Vielfalt von Ergebnissen führte, wurden hier nur die wichtigsten Ergebnisse für diese Arbeit aufgezeigt.

Folgende Punkte wurden durch diese Arbeit herausgefunden:

1. Die Messgenauigkeit des Systems ermöglicht eine adäquate Diskriminierung.
2. Die Borstenfelder der jeweiligen Zahnbürsten diskriminierten voneinander.
3. Die ADA-Zahnbürste reinigte die Zähne am besten.
4. Der Einfluss der Bürsten-Bewegung zeigte, dass meistens ein Bewegungsmuster (Kreisen) den anderen in der Reinigungsleistung überlegen war.
5. Die verschiedenen Bewegungsmuster hatten einen leicht grösseren Einfluss auf die Reinigungsleistung als die unterschiedlichen Borstenfelder.
6. Die einzelnen Flächen wurden unterschiedlich gut gereinigt.

6. Zusammenfassung

Zielsetzung: Ziel dieser Doktorarbeit war, die aus den Versuchen eines automatisierten Messsystems erhaltenen Daten zu analysieren und daraus die Diskriminierung von drei verschiedenen Borstensystemen mit statistischen Grössen zu beschreiben.
Material und Methode: Von Hand wurden Aluminiumzähne aus dem 3. Quadranten (Zähne 31-37) in einem UK-Modell mit einer Farbe gleichmässig bepinselt und in eine Halterungsvorrichtung des automatisierten Messsystems gelegt. Der Greifarm des Roboters reinigte mit einem von drei verschiedenen Borstensystemen (ADA-Bürste, Trisa Sonicpower Pro Interdental elektrisch "OFF" & Trisa Sonicpower Pro Interdental elektrisch "ON") und mit einer von drei Bewegungsmustern (Schrubben, Kreisen, Rot-Weiss) die Zähne. Aus dem gereinigten Gebiss wurde die Zähne einzeln ausgeworfen und über einem Fotosystem von allen Seiten fotografiert (sieben Bilder pro Zahn). Diese Bilder wurden mit Hilfe des Vision-Systems analysiert, indem die Anzahl nicht gereinigter, noch angefärbter Pixel ermittelt wurde. Gemessen wurden drei Messreihen (Bürste 1, 2 & 3) zu drei Messungen (Schrubben, Kreisen, Rot-Weiss) mit je sechs Teilmessungen (ein Durchlauf des Roboters). Mit SAS® wurden alle Mittelwerte, Boxplots & Diagramme erstellt. R ermittelte den Einfluss von Interaktionen wie Bürste, Bewegung und Zahn auf die Putzleistung. Mittels stratifizierten Mann Whitney U-Test konnte eine klassische Rangierung dieser jeweiligen Interaktionen aufgezeigt werden.
Resultate: Die Genauigkeitsanalyse zeigte, dass bei der Bürste 1, ADA-Bürste, die koronalen Flächen besser und genauer gereinigt wurden, als die zervikalen. Bürste 2, Trisa Sonic Power Pro Interdental elektrisch "OFF", reinigte die koronalen Flächen ebenfalls besser als die zervikalen, jedoch wurden die zervikalen Flächen im Gegensatz zur ADA-Bürste mit einer grösseren Genauigkeit gereinigt als die koronalen. Über alle Flächen gemittelt reinigte Bürste 2 schlechter und ungenauer als Bürste 1. Die Reinigung der koronalen Flächen war bei Bürste 3, Trisa Sonic Power Pro Interdental elektrisch "OFF", ebenfalls besser aber ungenauer als die zervikalen Flächen. Über alle Flächen gemittelt reinigte Bürste 3 schlechter als die Bürsten 1 & 2, aber genauer als Bürste 2. Die Analyse der Putzleistung zeigte, dass über alle Flächen gemittelt die ADA-Bürste um ein Vielfaches besser als Bürste 2 und diese besser als Bürste 3 reinigte. Modell P-Wert: < 0.001. Das Bewegungsmuster Kreisen erzielte die beste Reinigungsleistung über alle Flächen gemittelt, während die Reinigungsleistung bei Schrubben und Rot/Weiss sich kaum unterschieden hat. Modell P-Wert: < 0.001. Wurde die Interaktion zwischen Bewegung und Bürste betrachtet, reinigte aber fast jede Kombination besser als das ADA-Borstensystem mit Bewegung Schrubben. Dies zeigte, dass das Bewegungsmuster (Kreisen oder Schrubben) ei-

nen leicht grösseren Einfluss auf die Putzleistung der Zähne hatte, als die Wahl des Borstensystems.

Schlussfolgerung: Basierend auf den Resultaten kann gesagt werden, dass die Diskriminierung verschiedener Borstensysteme eines automatisierten Putzeffizienzsystems analysiert und aufzeigt werden kann. Die Messgenauigkeit konnte definiert und mit statistischen Grössen dargestellt werden. Einzelne Flächen der Zähne wurden unterschiedlich gut gereinigt. Das ADA-Borstenfeld war in der Reinigungsleistung den anderen Borstenfeldern, Trisa Sonicpower Pro Interdental elektrisch "OFF" & elektrisch "ON", klar überlegen. Auch zeigte sich, dass meistens ein Bewegungsmuster (Kreisen) den anderen in der Reinigungsleistung überlegen war. Jedoch hatte die Wahl des Bewegungsmusters einen grösseren Einfluss auf die Reinigungsleistung als die Wahl des Borstenfeldes.

7. Verdankung

Ein grosses Dankeschön richte ich an Prof. Dr. med. dent. A. Lussi. Er war massgeblich am Entstehen dieses Projektes beteiligt und leistete sehr viel wertvolle Vorarbeit. Durch die Vergabe dieser Arbeit an mich ermöglichte er mir einen tiefen und spannenden Einblick in die Forschung der Zahnmedizin.

An dieser Stelle möchte ich mich sehr herzlich bei meinem Betreuer Walter Bürgin bedanken, der mir während dem Entstehen der Arbeit jederzeit mit viel Geduld und mit viel Herzblut zur Seite stand. Er opferte sehr viel Zeit und Energie, um mir die Grundlagen des Statistikprogrammes SAS® näher zu bringen und er hat mir die erwähnten Statistik-Programme und diverse Auswertungen zur Verfügung gestellt. Mit seinen kreativen Ideen und mit seinen Fachkenntnissen im Bereich der Statistik hat er einen bedeutenden Anteil am Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Auch ein grosses Dankeschön möchte ich an Peter Gross, Verena Köppen und Herbert Fischer richten, die mir stets grosses Vertrauen entgegen gebracht haben. Sie gewährten mir bei meiner Arbeit am Roboter viele Freiheiten und stellten mir die benötigten Materialien und Räumlichkeiten zur Verfügung.

Ebenfalls bedanke ich mich bei Prof. Dr. Lutz Dümbgen, der mich in die vertiefende Statistik begleitete und mir wertvolle Quellen zum stratifizierten Mann Whitney U-Test lieferte.

8. Literaturverzeichnis

ARNOLD M, TROST G: Über die Abhängigkeit des Putzeffektes von verschiedenen Formen des Bürstenkopfes. Dtsch Stomatol 1972; 22: 46-53.

BAUER J: Analyse der Messgenauigkeit eines automatisierten Putzeffizienzsystems, Masterarbeit, 2015.

CAPOROSSI LS, DUTRA DA, MARTINS MR, PROCHNOW EP, MOREIRA CH, KANTORSKI KZ: Combined effect of end-rounded versus tapered bristles and a dentifrice on plaque removal and gingival abrasion. Braz Oral Res. 2016; 30.

CLAYDON N, ADDY M, SCRATCHER C, LEY F, NEWCOMBE R: Comparative professional plaque removal study using 8 branded toothbrushes. J Clin Periodontol. 2002 Apr; 29(4): 310-316.

ERNST CP, WILLERSHAUSEN B, DRIESEN G, WARREN PR, HILFINGER P: A robot system for evaluation plaque removal efficiency of toothbrushes in vitro. Quintessence Int. 1997 Jul; 28(7): 441-445.

HARNACKE D, MITTER S, LEHNER M, MUNZERT J, DEINZER R: Improving oral hygiene skills by computer-based training: A randomized controlled comparison of the modified Bass and the Fones techniques. PLoS ONE 2012; 7: e37072.

HARNACKE D, WINTERFELD T, ERHARDT J, SCHLUETER N, GANSS C, MARGRAF-STIKSRUD J, DEINZER R: What is the Best Predictor for Oral Cleanliness After Brushing? Results From an Observational Cohort Study. J Periodontol. 2015 Jan; 86(1): 101-107.

KAISER E, THURNAY S, MARKGRAF D, PACK S, GRENDER J, HENGENHOLD D, WARREN PR, WEHRBEIN H, ERBE C: Brush head wear, subject-perceived and laboratory cleaning performance of two oscillating-rotating electric toothbrush heads over 3 months. Am J Dent. 2012 Apr; 25(2): 84-90.

LANG T, STAUFER S, JENNES B, GAENGLER P: Clinical Validation of robot simulation of toothbrushing - comparative plaque removal efficacy. BMC Oral Health. 2014 Jul 4; 14: 82.

NAGY P, KÖVÉR K, GERA I, HORVÁTH A: Evaluation of the efficacy of powered and manual toothbrushes in preventing oral diseases (Systematic review with meta-analysis). Fogorv Sz. 2016 Mar; 109(1): 3-22.

NYGAARD-OSTBY P, EDVARDSEN S, SPYDEVOLD B: Access to interproximal tooth surfaces by different bristle designs and stiffnesses of toothbrushes. Scand J Dent Res. 1979 Dec; 87(6): 424-430.

R CORE TEAM, 2014. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL http://www.R-project.org/.

SACHS L. Angewandte Statistik, Springer, Berlin 1992: p.328ff.

SACHS L. Angewandte Statistik, Springer, Berlin 1992: p.380ff.

SAS INSTITUTE INC., SAS/STAT® User`s Guide, Version 9.4, Cary, NC: SAS Institute Inc., 2013.

SCHAETZLE M, IMFELD T, SENER B, SCHMIDLIN PR: In vitro tooth cleaning efficacy of manual toothbrushes around brackets. Eur J Orthod. 2009 Feb; 31(1): 103-107.

SCHAETZLE M, SENER B, SCHMIDLIN PR, IMFELD T, ATTIN T: In vitro tooth cleaning efficacy of electric toothbrushes around brackets. Eur J Orthod. 2010 Oct; 32(5): 481-489.

SCHIFFNER U: Prävention, Curriculum Kinder- und Jugendzahnheilkunde der APW (Akademie für Praxis und Wissenschaft) der DGZMK (Deutsche Gesellschaft für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde), 2011.

SCHLUETER N., KLIMEK J. & GANSS C: Relationship between plaque score and video-monitored brushing performance after repeated instruction - A controlled, randomised clinical trial. Clin Oral Invest 2013; 17: 659–667.

SOKAL R. Biometry: the principles and practice of statistics in biological research, Freeman and company, 3ed., New York 1995: 13.6 Transformations

VOLPENHEIN DW, WALSH MD, DELLERMANN PA, BURKETT TA: A new method for in vitro evaluation of the interproximal penetration of manual toothbrushes. J Clin Dent. 1994; 5(1): 27-33.

WEBER T. Memorix Zahnmedizin, Thieme, Stuttgart 2010: p.51f.

WINTERFELD T, SCHLUETER N, HARNACKE D, ILLIG J, MARGRAF-STIKSRUD J, DEINZER R, GANSS C: Toothbrushing and flossing behaviour in young adults - A video observation [published online:September 4, 2014]. Clin Oral Invest (2015) 19: 851-858.

YAACOB M, WORTHINGTON HV, DEACON SA, DEERY C, WALMSLEY AD, ROBINSON PG, GLENNY AM: Powered versus manual toothbrushing for oral health. Cochrane Database Syst Rev. 2014 Jun 17; (6): CD002281.

ZANATTA FB, BERGOLI AD, WERLE SB, ANTONIAZZI RP: Biofilm removal and gingival abrasion with medium and soft toothbrushes. Oral Health Prev Dent. 2011; 9(2): 177-183.

ZIMMER S, ÖZTÜRK M, BARTHEL CR, BIZHANG M, JORDAN RA: Cleaning efficacy and soft tissue trauma after use of manual toothbrushes with different bristle stiffness. J Periodontol. 2011 Feb; 82(2); 267-271.

9. Bilderverzeichnis

Alle in dieser Arbeit vorhanden Bilder, Tabellen und Graphiken wurden entweder von der Klinik für Zahnerhaltung, Präventiv & Kinderzahnmedizin der Zahnmedizinischen Kliniken der Universität Bern zur Verfügung gestellt oder wurden selbst durch den Autor dieser Arbeit erstellt.

10. Anhang

10.1 Berechnungsansatz

Bei den Berechnungen in dieser Arbeit wurde folgende Formel verwendet:

$$\text{PLAQUE PERCENT}_{\text{AS}} = \text{ArcSin}\left(2 * \left(\frac{\text{PLAQUE PERCENT}-50}{100}\right)\right)$$

10.1.1 Der klassische Mann Whitney U-Test

Der klassische Mann Whitney U-Test wird angewendet, um die Übereinstimmung verschiedener Messungen $(X_1, X_2, \ldots, X_m \;\&\; Y_1, Y_2, \ldots, Y_n)$ zweier Variablen (X und Y) mit Stichprobenwerten $m + n$ zu vergleichen [7, Sachs 1992]. Der Test zählt die Anzahl Indexpaare (j, k) mit $1 \leq j \leq m, 1 \leq k \leq n$ und $X_j > Y_k$. Das Ergebnis T_u liegt zwischen 0 und mn. Wenn es keinen Unterschied zwischen den X-Werten und Y-Werten gibt, ist der erwartete Wert $mn/2$.

T_u ist folgerndermassen definiert:

$$T_u = \sum_{j=1}^{m}\sum_{k=1}^{n} h(X_j, Y_k) \;\; mit \; h(x,y) = \begin{cases} 0 & wenn\, x < y, \\ 1/2 & wenn\, x = y\,, \\ 1 & wenn\, x > y. \end{cases}$$

wobei $\bar{T}_u = \frac{T_u}{mn}$ eine Zahl zwischen 0 und 1 darstellt. Wenn $\bar{T}_u > 1/2$ ist, zeigt dies, dass die X-Werte dazu neigen grösser zu sein als die Y-Werte. Um zu beurteilen, ob T_u signifikant gross ist, wird der p-Wert $G_{m,n}(T_u)$ berechnet, wobei $G_{m,n}(t) = P(S_{m,n} \geq t)\; ist.\; S_{m,n}$ wird als T_u brechnet, nachdem $(X_1, X_2, \ldots, X_m \;\&\; Y_1, Y_2, \ldots, Y_n)$ mit zufälligen Permutationen $(1,2, \ldots, m + n)$ ersetzt worden sind.

10.1.2 Der stratifizierte Mann Whitney U-Test

Der stratifizierte Mann Whitney U-Test ist ein Test im Statistikprogram R programmiert, welches vom Institut für Mathematische Statistik und Versicherungslehre (IMSV) der Universität Bern zur Verfügung gestellt wurde.
Der stratifizierte Mann-Whitney-U-Test berücksichtigt mehr als zwei Versuchsbedingungen

$I \geq 2$ und untersucht dessen Beeinflussung auf X und Y. Dies bedeutet für $i = 1,2,\ldots,I$ Untermessungen bekommt man:

$X_{i,j,}$ $\quad 1 \leq j \leq m(i)$, und

$Y_{i,k,}$ $\quad 1 \leq k \leq n(i)$.

Die Nullhypothese besagt, dass es zwischen den einzelnen Untermessungen keinen Unterschied zwischen den X-Werten und den Y-Werten gibt. Dies führt zum Stratifizierten Mann-Whitney-U-Test:

$$T_u = \sum_{i=1}^{I} \sum_{j=1}^{m(i)} \sum_{k=1}^{n(i)} h(X_{i,j}, Y_{i,k})$$

11. Selbstständigkeitserklärung

Name/Vorname: .....

Matrikelnummer: .....

Ich erkläre hiermit, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen benutzt habe. Alle Ko-Autorenschaften sowie alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäss aus Quellen entnommen wurden, habe ich als solche gekennzeichnet. Mir ist bekannt, dass andernfalls der Senat gemäss Artikel 36 Absatz 1 Buchstabe r des Gesetzes vom 5. September 1996 über die Universität zum Entzug des auf Grund dieser Arbeit verliehenen Titels berechtigt ist.

Ort / Datum: .....

Unterschrift: .....