

Klinische Validierung einer robotergestützten Methode zur Beurteilung der Reinigungseffizienz von Handzahnbürsten

Dissertation

zur Erlangung des Grades eines Doktors der Zahnmedizin

der

Universität Witten/Herdecke

Fakultät für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde

vorgelegt von

Sebastian Stauer

aus Essen

2010

Dekan: Prof. Dr. med. dent. Stefan Zimmer
Mentor: Prof. Dr. med. dent. Dr. h.c. Peter Gängler
Tutor: Dr. med. dent. Tomas Lang

Tag der Disputation:

Meinen Eltern

Inhaltsverzeichnis

1 EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG	1
2 LITERATURÜBERSICHT	3
3 MATERIAL UND METHODE	19
3.1 Verwendete Zahnbürsten	19
3.2 Probandengut	21
3.3 Dokumentation	23
3.4 Ablauf der klinischen Untersuchung	23
3.5 Kalibrierung des Untersuchers	25
3.6 Indexierung der klinischen Untersuchung	27
3.7 Ablauf der Labortests	28
3.8 Indexierung der Labordaten	28
4 VERSUCHSANORDNUNG, ANFORDERUNGEN AN DIE DATENBASIS UND VERWENDETE VERFAHREN	29
5 ANALYSE DER DURCH PLANIMETRIE ERHOBENEN DATEN	32
5.1 Vergleich von Probanden und Roboter	32
5.2 Vergleich der verwendeten Zahnbürsten hinsichtlich ihrer Reinigungseffizienz	36
5.3 Vergleich der Putztechnik	40
5.4 Bedeutung des Zahnfleischsaumes für die Qualität des Robotermodelles	43
5.5 Untersuchung der Differenzen zwischen Probandenstudie und Roboterdaten	45
6 VERGLEICH MIT DEN ÜBLICHEN ROBOTERDATEN	53
6.1 Aufbereitung der erhobenen Daten	53
6.2 Vergleich der üblichen Roboterdaten mit den Daten aus der Planimetrie	55
6.3 Möglichkeiten und Defizite der durchgeführten Untersuchung	59

6.4 Multivariate Analyse	62
7 DISKUSSION	67
8 SCHLUSSFOLGERUNG	68
9 ZUSAMMENFASSUNG	68
10 LITERATURVERZEICHNIS	73
11 ANHANG.....	78

1 Einleitung und Zielsetzung

Die Notwendigkeit von Zahnbürsten in der Mundhygiene ist unumstritten und in der Literatur belegt (Fejerskov et al. 2003, Roulet et al. 2000). Aus diesem Grund bemüht sich die Industrie um die Weiterentwicklung und Effizienzsteigerung von Zahnbürsten.

Es gibt kein Zahnbürstenkopf – Design gibt, welches sich in der Effizienz der Putzleistung signifikant von anderen Designs abhebt und dadurch mit wesentlich besseren Putzergebnissen besticht. Dies belegen beispielsweise Arbeiten von Frandsen (1986), Claydon und Addy (1996) oder Claydon et al. (2002).

Um Forschungen zu beschleunigen und auf organisatorisch aufwendige klinische Studien verzichten zu können, werden seit über 25 Jahren Methoden entwickelt, mit denen Zahnbürstenkopf - Designs in einem standardisierten Verfahren auf ihre Wirksamkeit untersucht werden können.

In der Literatur der letzten Jahre finden sich mehrere unterschiedliche Ansätze, die Reinigungswirkung von Zahnbürsten im Labor zu untersuchen. Die Untersuchungsmethodik weist hierbei unterschiedliche Komplexitätsstufen hinsichtlich der Simulation der Putzbewegung, der Zahnoberfläche und des Biofilms auf.

Angefangen mit einfachsten Apparaturen nach Nygaard-Østby (1979), welche nur den Anspruch erheben die Eindringtiefe der Borsten auf einem gewellten Farbband zu ermitteln, über die Apparatur nach Volpenhein (1994), welche in der Lage war drei verschiedene Putztechniken zu simulieren, ging die Entwicklung bis hin zu dem in dieser Arbeit verwendeten 6-Achs Roboter, welcher beliebig programmierbare Putzbewegungen ermöglicht und an einem anatomisch korrekten Zahnmodell arbeitet.

Ein kritischer Punkt bei allen Labor-Modellen ist das Zusammenspiel aller Faktoren. Diese können zu Übervorteilung oder Benachteiligung von bestimmten Zahnbürstentypen führen.

Ein Rückschluss auf das tatsächliche Reinigungsverhalten einer bestimmten Zahnbürste „in vivo“ war bisher nicht möglich.

Demgegenüber steht die Schwierigkeit reiner klinischer Studien, die Einflussfaktoren konstant zu halten, um dadurch Unterschiede der verschiedenen Zahnbürsten herauszuarbeiten.

Ziel dieser Studie war es, zu überprüfen, ob sich die durch das Robotermodell ermittelte Reinigungseffizienz von zwei verschiedenen Handzahnbürsten in einer klinischen Studie mit Probanden abbilden lässt. Damit sollte die klinische Validierung der robotergestützten Putzvorgänge an anatomisch korrekten Modellzähnen erreicht werden

Anhand der statistischen Auswertung wird evaluiert, ob ein Vergleich zwischen klinischer und labortechnischer Reinigungseffizienz zu ziehen ist.

Sollte dies erfolgreich sein, könnte durch die Ergebnisse die Erforschung der Effektivität von Zahnbürstenkopf – Designs beschleunigt werden, da dann keine aufwendigen klinischen Studien zur Prüfung von Zahnbürstenkopf – Designs mehr nötig wären.

2 Literaturübersicht

Die Notwendigkeit der Mundhygiene wird seit Jahrzehnten durch Wissenschaftler und Gelehrte erforscht und taucht in der Literatur der Neuzeit beispielsweise 1921 in einer Arbeit von Millberry auf, in der er die Mundhygiene als unbedingt notwendig beschreibt (Millberry 1921).

Die häusliche Mundhygiene ist eine wichtige Voraussetzung für die langfristige Gesunderhaltung der Zähne und des Zahnhalteapparates (Fath 2000), denn sie dient der mechanischen Plaqueentfernung.

Die Zahnplaque bildet mit vielen weiteren Bakterien der Mundhöhle einen lebenswichtigen Biofilm (Gängler et al. 2005). Dieser Biofilm ist zäher, verfilzter Zahnbelag, der strukturiert ist und aus bakteriellen Stoffwechselprodukten, Speichelbestandteilen, Nahrungsresten und lebenden sowie abgestorbenen Bakterienzellen besteht. Auf den Zähnen in der Mundhöhle kann sich ein supra- und ein subgingivaler Biofilm befinden. Je nach Entwicklung dieses Biofilms herrschen andere Bedingungen und Voraussetzungen für verschiedenste Bakterientypen (Hellwig et al. 2003).

Eine große Zahl der Mikroorganismen in der Mundhöhle übernimmt weitestgehend Schutzfunktionen. Als Beispiel sei hier die Besiedlung des Magen-Darm-Trakts, Auslösen von Immunreaktionen, Stimulation der Wundheilung sowie die Bildung einer Kolonisationsbarriere gegenüber pathogenen Transitkeimen durch Besetzung von Retentionsräumen, Verbrauch des essentiellen Nahrungsangebots, Schaffung von Biofilmbedingungen und Produktion von Hemmfaktoren wie Bakteriozinen, Wasserstoffperoxid oder Säuren genannt (Gängler et al. 2005).

Veränderungen innerhalb des ökologischen Gleichgewichtes im Biofilm können zur Bildung von ökologischen Nischen führen, in welchen sich dann Fremdbakterien vermehren können oder in denen körpereigene eigentlich nicht pathogene Bakterien überhand nehmen und somit pathogen für den Zahn und das Parodontium werden können (Gängler et al. 2005).

Über den Stoffwechsel der Bakterien im Biofilm entstehen nun durch Milchsäuregärung Säure, welche das Gleichgewicht von De- und Remineralisation der Zahnhartsubstanz in Richtung der Demineralisation verschiebt und somit zu Karies führen kann (Gängler et al. 2005).

Die Mundhygiene, insbesondere die mechanische Plaquekontrolle, dient also unter anderem der Gesunderhaltung der Zahnhartsubstanz, denn die reife Plaque verfügt über eine

stabilisierende Matrix, deren Ausprägung sich an den tatsächlichen Belastungen durch die Umgebung, sprich physiologischem Abrieb durch Zunge, Wangen, Lippen, Abrasion etc., orientiert und daher an Stellen mangelnder physiologischer Reinigung einer mechanischen Reinigung bedarf (Roulet 2000). Daher kommt der mechanischen Zahnreinigung eine große Bedeutung zu. Sie wirkt aber nur kariesprohylaktisch, wenn die Plaqueentfernung vollständig ist (Bellini 1981). Dies lässt sich auf auch den von König 1971 ergänzten Kariesursachenkomplex zurückführen. Er beschreibt vier Faktoren die zur Entstehung von Karies führen. Diese sind die Wirtsfaktoren, Mikroorganismen, Substrat und Zeit. Bereits beim Fehlen eines dieser Faktoren kommt es nicht zur Entstehung einer kariösen Läsion (König 1971). Das Ziel der häuslichen Mundhygiene (...) besteht also darin, (...) die Plaque optimal zu entfernen und dadurch die Mikroorganismen maximal zu reduzieren (Zimmer 2003). Eine optimale Mundhygiene hat über den präventiven Effekt hinaus auch eine begrenzt regenerative bzw. heilende Wirkung, da initiale kariöse Läsionen, welche durch Demineralisationsprozesse entstanden sind, durch Remineralisationsprozesse, die durch eine gute Mundhygiene gefördert werden, remineralisieren bzw. „ausheilen“ (Imfeld 2008).

Die Schaffung einer relativ plaquefreien Mundhöhle ist nur durch das Zusammenwirken von Zahnarzt und Patient zu erreichen (Lehmann und Hellwig 2002). Aus diesem Grund werden Patienten unter anderem die Systematik des Zähneputzens, Zahnputztechniken, Möglichkeiten der Interdentalhygiene und Hilfsmittel zur Durchführung der Mundhygiene erklärt (Hellwig et al. 2003), um durch diese Instruktionen eine optimale häusliche Mundhygiene zu erreichen.

Das gebräuchlichste und wohl wichtigste Hilfsmittel zur Mundhygiene ist die Zahnbürste (Ketterl 1993) und nimmt innerhalb der zahnmedizinischen Präventivmedizin eine Schlüsselrolle ein. Zahnbürsten sind die Standardausstattung für eine gute häusliche Mundhygiene (Zimmer 2003).

Die Verwendung von Zahnbürsten bzw. Zahnbürsten-ähnlichen Gebilden sind durch archäologische Funde mehrere Jahrtausende zurückzuverfolgen. Die prähistorisch-archäologischen Funde umfassen Kaustöcke, Zweige, Federn, Tierknochen und Mundspülungen (Jardim 2009). Solche Kauzweige, auch Miwak genannt, werden noch heute vor allem in afrikanischen und muslimischen Ländern verwendet. Der Zweig stammt vom sogenannten Zahnbürstenbaum, dem *Salvadora persica*, ab, der in Afrika und im Mittleren Osten wächst. Wird ein solcher Zweig zunächst gekaut, fasert er sich allmählich auf und kann so als natürliche Zahnbürste verwendet werden (Neiburger 2009). Zudem enthält das Holz zahnmedizinische wirksame Stoffe wie Fluoride, Tannine, Saponine und Flavonoide die eine

antimikrobielle Konzentration im Holz aufweisen (Almas 2005). Die allgemeine Wirksamkeit des Miswak wird durch vielen Studien belegt und stellt den Vorläufer der Zahnbürste dar (Younes 1982, Yarde 1996, Al Otaibi 2003).

Erste Erwähnungen von Zahnbürsten finden sich in über 2000 Jahre alten Funden des alten China (Zhao 2009).

Erste Entwicklungen von Zahnbürsten auf dem europäischen Kontinent sind auf das 17. bis 18. Jahrhundert zurückzuführen (Hyson 2003). Es gibt Berichte darüber, dass die erste Zahnbürste bereits 1570 vorgestellt wurde, fest steht jedoch, dass die erste moderne Handzahnbürste 1780 von dem Engländer William Addis entworfen und hergestellt wurde. Sie bestand aus einem handgefertigten Holzgriff, der vorn perforiert war, um die Schweineborsten aufzunehmen, die mit verknoteten Fäden befestigt wurden (Simon 2005). Von diesem Zeitpunkt an beginnt endgültig die Erfolgsgeschichte der Zahnbürste. Bereits Mitte des 19. Jahrhunderts war die Zahnbürste für jedermann zugänglich und gebräuchlich. Auch die Variationen der Zahnbürsten im Design nahmen zu und gab es Mitte des 19. Jahrhunderts bereits mehrere tausend Zahnbürstendesigns (Simon 2005). Die heute klassischen Zahnbürsten sind die Kurzkopfzahnbürsten mit planem Borstenfeld und dichtem Besatz mit parallel angeordneten, ebenen, mittelharten und endgerundeten Nylonfilamenten, da sie universell einsetzbar sind (Dörfer 2005). Diese Zahnbürstenkonfiguration war jedoch durch konventionelle Fertigungstechniken bedingt, die nur ein solches Design zu ließen. Die heutigen Techniken ermöglichen hingegen, Bürstenköpfe mit Einzelborsten zu bestecken, auch die Borstenenden nichtplaner Borstenfelder abzurunden sowie nahezu jede denkbare Borstenkonfiguration (Zimmer 2003). Diese neuen Bürstenkopfdesigns müssen jedoch nicht automatisch überlegen sein. Daher gilt es entsprechende wissenschaftliche Untersuchungen für fundierte Bewertungen durchzuführen. Bei diesen Untersuchungen gilt es besonders die Reinigungsleistung der Zahnbürsten an den Prädilektionsstellen der Karies zu untersuchen.

Die Prädilektionsstellen der Karies sind identisch mit den für das Plaquewachstum günstigen geschützten Zonen (Roulet 2000). Diese geschützten Zonen sind die habituell unsauberen Bereiche des Zahnes. Dies sind besonders die Zahnfissuren- und Grübchen, die Approximalflächen der Zähne und das zervikale Drittel der sichtbaren Zahnkrone (Lehmann und Hellwig 2002). Ebenfalls hinzugezogen werden müssen frei liegende Wurzeloberflächen (Hellwig et al. 2003). Besondere Aufmerksamkeit erfordern, in Hinblick auf die Reinigungsleistung der Zahnbürste die Approximalflächen und die zervikalen Glattflächen. Die zervikalen Flächen im marginalen labialen und bukkalen Bereich sind an der Schmelz-

Zement-Grenze besonders Karies gefährdet, da sich die Karies im Zement und dem darunter liegenden Dentin ausbreiten kann (Schug-Kösters 1951, Ketterl 1992). Subgingivale Areale und Plaques sind für die Kariesentstehung nicht verantwortlich, weil die relative Reduktion von Streptokokken bei Überwiegen von gramnegativen Anaerobiern und motilen Stäbchen keine pathologische Zement- und Dentindemineralisation zu lässt (Gängler 2005). Auch die Approximalflächen bzw. Interdentalflächen erfordern besondere Aufmerksamkeit bei der Untersuchung der Reinigungsleistung von Zahnbürsten, da diese besonders schwierig zu erreichen sind (Stejskalová 1973). Die Fissuren und Grübchen der Zähne sind jedoch bei der Untersuchung der Reinigungsleistung zu vernachlässigen, da auf Grund des Durchmessers der Zahnbürstenborsten, diese den Boden einer Fissur nicht erreichen können (Zimmer 2003).

Zur optimalen Reinigung der Zähne und besonders der Prädilektionsstellen wurden diverse Zahnputztechniken entwickelt. Das horizontale Schrubben folgt individuellen Bewegungsmustern, wobei eine horizontale Hin- und Herbewegung ausgeführt wird, bei der das Bürstenfeld senkrecht auf die Zahnflächen gerichtet ist. Diese Technik ist international vor allem als Einstieg für Kinder in die Zahnpflege akzeptiert (Mierau 1989, Unkel 1995). Bei der modifizierten Stillman-Technik wird die Zahnbürste zunächst mit den Borsten parallel zur Zahnreihe gelegt und dann unter leichten Andruck und rüttelnden Bewegungen koronalwärts gedreht (Stillman 1932, Fath 2000). Bei der Putztechnik nach Bass muss die Zahnbürste im 45° Winkel auf die Zahnreihe gesetzt werden und unter Druck das Zahnfleisch so erreichen, dass es leicht Blutleer wird. Durch kurze horizontale Rüttelbewegungen sollen so auch die Approximalräume gereinigt werden (Bass 1954). Weitere weit verbreitete Techniken sind die Rotationsmethode nach Fones und die Rot-nach-Weiß-Methode nach Leonard (Fones 1934, Leonard 1949). In ihrer Effizienz stellen sich die Putztechnik nach Bass und die modifizierte Technik nach Stillman am überlegensten dar. Sie setzen jedoch auch einige Geschicklichkeit voraus und werden nicht von einem Großteil der Bevölkerung angewendet.

Es lässt sich festhalten, dass sich das zahnmedizinische Wissen, seit der Entwicklung der ersten modernen Zahnbürsten im 17. Jahrhundert, enorm entwickelt hat. Viele Ursachenkomplexe wie z.B. die Entstehung der Karies, der Plaquebildung, aber auch Erkenntnisse in den Mundhygienemaßnahmen haben die Mundgesundheit voran getrieben.

In diesem Zusammenhang streben die Industrie und Zahnmediziner nach ständiger Verbesserung der Mundhygiene durch Neuerungen in der mechanischen Plaquekontrolle in dem z.B. neue Zahnbürstenkopfdesigns erforscht werden.

Zur wissenschaftlichen Erforschung bedarf es verschiedene Methoden. Es muss zwischen klinischer – in vivo – und labortechnischer – in vitro – Forschung unterschieden werden. Beide Forschungsmethoden benötigen unterschiedliche Verfahren und Techniken, Zahnbürstenkopfdesigns zu erforschen.

Für in vivo Studien ist es notwendig die Zahnplaque besser sichtbar zu machen, das Ausmaß der Zahnplaque zu klassifizieren und nachhaltig zu dokumentieren.

Das Anfärben der Plaque erfolgt durch einen Plaquerevelator (lat. revelare = enthüllen). 1914 empfahl Skinner erstmals durch das Anfärben der eine ästhetische befriedigende Säuberung der Zähne zu erreichen (Skinner 1914). Plaquerelevatoren enthalten in der Regel Lebensmittelfarbstoffe die als ungiftig gelten (Roulet et al. 2000). Es gibt derzeit fünf gängige Plaquerelevatoren. Das Erythrosin enthält ein Tetrajod-fluorescein-Natrium und birgt daher die Gefahr einer Jodallergie besteht. Es ist in unter anderem in sehr verbreiteten Mundhygiene-Kontroll-Tabletten enthalten (Roulet 2003). Das basische Fuchsin ist in Wasser wenig, in Alkohol gut löslich. Als Anfärbelösung verwandt ist es nicht toxisch und nicht kanzerogen. Es birgt jedoch ein kanzerogenes Risiko beim Dauergebrauch und soll daher nicht mehr verwendet werden (Schäfer 2002). Malachitgrün ist dem basischen Fuchsin chemisch verwandt. Es werden Pinselungen mit 1,0-2,5% iger Lösung vertrieben, die eine gute Plaqueanfärbung ergeben und eine gute Kontrastwirkung mit dem roten Zahnfleisch liefert. Es setzt sich aber infolge seiner höheren Toxizität (die orale LD50 beim Kaninchen beträgt 75 mg / kg KG) nicht durch, obwohl bei klinischen Anwendungen weit geringere Dosen zum Einsatz kommen (Roulet 2003). Fluoreszierende Farbstoffe umgehen zwar kosmetische Nachteile anderer Revelatoren, indem sie bei normalen Lichtverhältnissen nicht sichtbar sind, haben aber den Nachteil, dass ihre Anwendung an das Vorhandensein einer speziellen UV-Lampe gebunden ist (Lang 1973). Die Differenzialfärbungen sind Plaquefärbemittel bzw. Kombinationsprodukte und wurden erstmals 1972 von Block beschrieben. Ihre Basis sind Lebensmittelfarbstoffe und enthält Pantenblau V und Phloxin B und färben die Plaque je nach Alter rot (junge Plaque) bis blau (reife Plaque) (Block 1972). Diese Triphenylmethanfarbstoffe gehen als einzige aus der Literaturübersicht als insgesamt gesundheitlich unbedenklich hervor (Schäfer 2002). Das entsprechende Präparat ist Mira-Tone-2® der Firma Hager & Werken und wurde auch in dieser Untersuchung verwendet.

Das Ausmaß der Plaque lässt sich durch Indizes erfassen. Laut Definition ist ein Index ein numerischer Wert, der das Vorkommen und das Verhältnis definierter diagnostischer Kriterien in einer Population oder an einem Individuum beschreibt. Indizes werden in

epidemiologischen Studien, zur klinischen Beurteilung der Mundgesundheit einzelner Personen sowie der Kontrolle von Therapieerfolgen angewendet. Durch Indizes kann dem Patienten demonstriert werden in welchen Bereichen er zum Beispiel die häusliche Mundhygiene verbessern kann. Dem Untersucher liefert ein Index Informationen über die Problemzonen der Mundhygiene und die Schwächen der Mundhygieneinstrumente. Unabhängig von der Verwendung eines Indexsystems gibt es allgemeine Anforderungen an Indizes. Ein Index sollte eine quantitative und/oder eine qualitative Aussage haben. Außerdem sollte er eine hohe Sensitivität und Spezifität besitzen. Einfachheit der Anwendung und eine gute Reproduzierbarkeit müssen gegeben sein um das Indexsystem rasch praktisch anwenden zu können, sowohl in der Forschung, als auch in Zahnärztlichen Praxis von geschultem Personal, und von nicht speziell geschulten Zahnärzten und zahnärztlichem Fachpersonal. (Hellwig et al. 2003).

Für die beschreibende Epidemiologie ist die quantitative Aussage bedeutsam, für die analytische Epidemiologie die Einfachheit, für die experimentelle Epidemiologie bzw. für klinisch kontrollierte Studien kommt als allgemeine Anforderung noch die Möglichkeit einer statistischen Auswertung hinzu. Indizes werden meist an allen Zähnen des Gebisses erhoben. In Ausnahmefällen kann die Untersuchung auch nur an den sog. Ramfjord-Zähnen (Zähne 16, 21, 24, 36, 41 und 44) welche repräsentativ für das ganze Gebiss angesehen werden können, erfolgen (Rams 1993). Der jeweilige Index für den einzelnen Patienten oder Probanden wird meistens errechnet, indem die Summe der erhobenen Messwerte oder Ja-/Nein-Entscheidungen durch die Anzahl der Messorte dividiert wird (Hellwig et al. 2003).

Es werden drei unterschiedliche Verfahren zur Befundung von Plaque verwendet. Neben planimetrischen Verfahren, das die Bestimmung der plaquebedeckten Zahnflächen mithilfe von Fotografien ermöglicht, werden gravimetrische Verfahren, in denen das Nass- oder Trockengewicht der Plaque bestimmt wird, und visuelle Verfahren bei denen die oberflächliche Ausdehnung des Biofilms in Grade eingeteilt wird verwendet (Hellwig et al. 2003).

Die Auswahl der Indizes zur Plaqueuntersuchung sollte Zielorientiert erfolgen. Hierbei spielen zum Beispiel die Anzahl der Probanden, die Studiendauer sowie Typ und Größenordnung der zu erwartenden Änderungen eine Rolle. Vor der Eigentlichen Auswahl des entsprechenden Indexes ist es also wichtig die Fragestellung, welche durch die Erhebung beantwortet oder untersucht werden soll, zu beurteilen und dann je nach Anforderung einen passenden Index auszuwählen (Fischman 1986).

Ein einfacher und sinnvoller Index ist der Silness und Loe Plaqueindex. Dieser Index wird ohne Anfärben der Plaque erhoben, kann daher rasch angewendet werden. Er dient der sondenunterstützten Bewertung der Plaque im Zahnhalsbereich unter Berücksichtigung des Sulkus, der Zahnoberfläche und des Gingivarandes. Vor der Untersuchung mit Sonde und Spiegel sollten die Zähne sorgfältig getrocknet werden. Der Plaqueindex nach Silness und Loe wird in 4 Grade eingeteilt. Grad 0 liegt vor, wenn keine Plaque durch Inspektion und Sondierung sichtbar ist. Sollte die Plaque mit bloßem Auge nicht sichtbar sein aber durch Abschaben mit der Sonde zum Vorschein kommen liegt Grad 1 vor. Grad 2 charakterisiert sich durch mäßige Plaqueansammlung entlang des Gingivarandes welche mit dem bloßen Auge zu erkennen ist. Zu beachten ist noch, dass der Interdentalraum frei von Plaque ist. Sollten die Interdentalräume zusätzlich mit Plaque ausgefüllt sein spricht man von Grad 3. Erhoben werden diese Grade an 4 Messstellen (vestibulär: distal, median, mesial, oral). Der Plaqueindex nach Silness und Loe ist insgesamt ein akzeptabler Index, besonders um das Erreichen der Sauberkeit in einer Studie mit Mundhygieneprodukten oder um den klinischen Verlauf der Mundhygiene eines Patienten zu evaluieren. Als nachteilig könnte angesehen werden, dass bei diesem Index keine Betrachtung der koronalen Plaqueausbreitung erfolgt. Da die Besiedlung der Zähne im Bereich des Untersuchungsraumes des Silness und Loe Index anfängt und auch dort Gingivitis auslöst ist es sinnvoll sich gerade um diesen, nicht uneingeschränkt im Bereich der natürlichen Selbstreinigung liegenden, Bereich zu kümmern. (Fischman 1986, Loe 1967, Silness 1964, Loe 1967)

Ein sehr früher Plaqueindex ist der Oralhygieneindex nach Greene und Vermillion, welcher im Jahr 1960 beschrieben wurde und ebenfalls nur mit einer Sonde ermittelt wird. In die Bewertung des OHI geht native, nicht mineralisierte (Debris – OHI–D) als auch mineralisierte (Calculus – OHI–C) Plaque aller ausgewählter Zähne (OHI–S) ein (Hoffmann 2005). Der Oralhygieneindex wird in 4 Grade unterteilt, wobei die Zahnkrone in horizontale Drittel eingeteilt wird. Bei Grad 1 findet sich keine Plaque und kein Zahnstein auf dem Zahn. Findet sich Plaque oder Zahnstein im gingivalen Kronendrittel spricht man von Grad 2. Wird Plaque oder Zahnstein bis zum mittleren Drittel gefunden bzw. finden sich subgingivale Inseln liegt Grad 3 vor. Findet sich ein subgingivales Band bzw. wird der Zahn über 2/3 der Krone mit Zahnstein oder Plaque bedeckt kann man von Grad 4 sprechen. Der Oralhygieneindex kann gesondert für Plaque oder Zahnstein erhoben werden. In Studien mit Gruppen, welche relativ wenig Plaque hatten, stellte sich heraus, dass die Kriterien des Oralhygieneindex zu grob für die Demonstration signifikanter Unterschiede zwischen den Probanden und der

Kontrollgruppe waren. Wenn Plaque im Zusammenhang mit Prävalenz und Schwere von Gingivitis evaluiert werden soll ist nur die Plaque in der Nähe der marginalen Gingiva wichtig. Der Oralhygieneindex bietet keine gute Beschreibung der Plaque in gingivanahen Bereichen (Greene & Vermillion 1960, Greene & Vermillion 1964, Fischman 1986).

Ein Indexsystem bei dem eine Anfärbung der Plaque mit Plaquerevelatoren nötig ist, ist der von den Namensgebern Quigley und Hein 1962 beschriebene Index (QHI). Er erfasst nur die fazialen Zahnflächen, dafür aber sehr differenziert. Die proximale und sulkuläre Plaque wird nur unzureichend beurteilt (Hellwig et al. 2003). Überkronte Zähne oder Zähne mit zervikalen Restaurationen werden nicht in die Befundung einbezogen. Der QHI bewertet die Plaqueakkumulation in 6 Graden. Grad 0 beschreibt die Abwesenheit von Plaque. Finden sich vereinzelt kleine Plaqueinseln liegt Grad 1 vor. Eine deutliche Plaquelinie bis 1 mm entlang des Gingivarandes wird als Grad 2 gewertet. Grad 3 liegt vor wenn die Plaque über 1 mm Breite entlang des Gingivarandes und bis zu einem Drittel der Zahnfläche ausgedehnt ist. Sollte eine Plaqueausdehnung bis maximal 2/3 der Zahnoberfläche vorliegen spricht man von Grad 4. Der 5. Grad beschreibt schließlich die Plaqueausdehnung über 2/3 der zu untersuchenden Zahnfläche (Quigley 1962). Der individuelle QHI errechnet sich aus der Summe der Bewertungsgrade dividiert durch die Anzahl der Zähne.

Der QHI bietet eine gute Plaquebewertung sowie eine gute Möglichkeit zur Beurteilung des Verlaufes und Unterschieden in der Plaqueakkumulation (Quirney 1991). Er ist leicht und schnell zu erheben und durch das Anfärben der Plaque bietet sich zusätzlich die Möglichkeit zur Demonstration sowie zur Motivation des Patienten. In Studien zur Evaluation von Mundhygieneprodukten ist er wegen seiner Einfachheit und guten Darstellung auch gut zu verwenden (Fischman 1986).

Modifikationen des Quigley-Hein Indexes führten zur Einbeziehung von Indexzähnen (16, 21, 24, 36, 41 und 44), aller Zähne sowie distaler, vestibulärer und oraler Zahnflächen, wobei hier der jeweils höhere Wert aufgenommen wird. Heute wird meist eine Modifikation, beschrieben 1970, nach Turesky verwendet. Restaurierte Zähne und die dritten Molaren werden nicht einbezogen (Fischman 1986, Turesky 1970).

Um auch die Interdentalräume zu beurteilen können wurde 1975 von Lange der Approximalraum-Plaqueindex (API) beschrieben. Die Beseitigung der Plaque im Approximalraum erfordert eine besonders gründliche Mundhygiene, weshalb durch die Kontrolle der Plaque in diesem Bereich die Mitarbeit des Patienten gut abgeschätzt werden kann. Mit einer Sonde wird mit oder ohne Anfärben der Plaque durch eine Ja-/Nein-

Entscheidung bestimmt, ob sich im Approximalraum Plaque befindet. Diese Beurteilung der Approximalraumplaque geschieht beim API im ersten und dritten Quadranten oral und im zweiten und vierten Quadranten vestibulär. Der AP-Index wird in Prozent angegeben. Die Summe der plaquepositiven Approximalräume wird mit 100 multipliziert und durch die Summe aller Approximalräume dividiert. Ein API unter 25% entspricht einer optimalen Mundhygiene. Der Patient oder Proband hat eine gute Mundhygiene, wenn der API bei 25-39% liegt. Bei 40-69% wurde nur mäßige Mundhygiene betrieben. Ein API von 70-100% entspricht einer unzureichenden Mundhygiene. Da vom API nur die Approximalräume erfasst werden handelt es sich um einen relativ empfindlichen Index. Im Rahmen einer Parodontalbehandlung wird ein API unter 35% als Indiz einer guten Mitarbeit des Patienten gewertet (Lange 1977).

Nachteilig beim API ist die durch die Ja-/Nein-Entscheidung relativ geringe Sensitivität. So kann es sein, dass durch andere Indizes, wie Blutungsindizes, eine Besserung der Mundhygiene festgestellt werden kann, dies sich jedoch nicht oder kaum im API widerspiegelt. Um die Sensitivität des Indexes zu erhöhen modifizierte 2005 Zimmer et al. den API (Zimmer 2005). Diese Modifikation benutzt das Plaqueindexsystem nach Silness und Loe mit der ursprünglichen Gradeinteilung von 0-3. Der modifizierte AP-Index zeigt eine gute Korrelation mit dem Papillen-Blutungsindex (PBI), da beide Indizes das gleiche Areal beurteilen und Plaque eine zu Gingivitis und damit zur Blutung führt (Loe 1965).

Der erste Index, bei dem Versucht wurde durch Einführung einer numerischen Skala die Ausdehnung der Plaque zu erfassen war der Periodontal Disease Index nach Ramfjord. Erhoben wird die Plaquekomponente des Indexes an den bereits erwähnten Ramfjord-Zähnen. Das Vorhandensein bzw. die Ausdehnung der angefärbten Plaque wird in 4 Grade eingeteilt, wobei speziell alle interdentalen, fazialen und lingualen Oberflächen der entsprechenden Zähne untersucht werden. Shick und Ash modifizierten die Originalkriterien von Ramfjord wegen des Ausschlusses der Bewertung von Interdentalflächen (Shick 1961). Die Bewertung wurde auf die gingivale Hälfte der fazialen und lingualen Oberfläche der Indexzähne beschränkt.

Die Grade des modifizierten Periodontal Disease Indexes reichen von Grad 0, welcher die Abwesenheit von Plaque beschreibt bis zu Grad 3 bei dem Plaque 2/3 oder mehr der gingivalen Hälfte der fazialen oder lingualen Oberfläche des Zahnes bedeckt. Der Individuelle Wert wird durch Summation der einzelnen Zahnwerte und Division durch die Anzahl der

untersuchten Zähne berechnet. Der modifizierte Index ist gut für klinische Studien geeignet (Fischman 1986, Rumpfjard 1956).

Beim Navy-Plaque-Index nach Elliot et al. (1972) wird das Vorhandensein von Plaque in gedachten Zonen auf dem Zahn mit 0 oder 1 bewertet. Die Zahnoberfläche wird zunächst in 3 Hauptzonen unterteilt: eine okklusale Zone, eine mittlere Zone und eine gingivale Zone. Die gingivale Zone liegt apikal zu einer gedachten Linie, welche die Spitzen der Papillen verbindet und ungefähr parallel zur marginalen Gingiva liegt. Diese Zone wird nochmals in eine mesiale, eine mittlere sowie eine distale Zone, wobei die Ausdehnung jeder dieser Zonen 1 mm über den Gingivarand reichen, unterteilt. Die mittlere Zone wird in eine mesiale und eine distale Zone unterteilt. Durch diese Zoneneinteilung wird der gingivanaher und interdentaler Bereich im Verhältnis zum Inzisal- und Glattflächen-Bereich besonders betont (Fischman 1986, Elliot 1972).

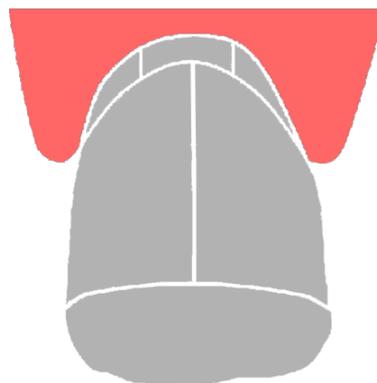


Abb. 2.1: Navy-Plaque-Index nach Elliot et al. 1972

Der Navy-Plaque-Index wurde zweimal modifiziert. Mit dem modifizierten Navy-Plaque-Index nach Rustogi et al. (1992) wird das Vorhandensein von Plaque in 9 Zonen (A-I) mit 0 oder 1 bewertet. Rustogi et al. erweiterten die Areale F (distal) und D (mesial) in die Region unter dem approximalen Kontaktpunkt. Außerdem wurden die Areale C und A erweitert um die an die marginale Gingiva angrenzende Region zu vergrößern. Durch die Modifikation wird eine deutlichere Differenzierung des interproximalen und marginalen Bereiches erreicht (Rustogi 1992).

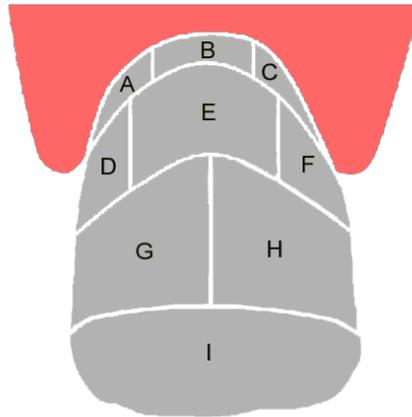


Abb. 2.2: modifizierter Navy-Plaques-Index nach Rustogi et al.1992

Calydon und Addy modifizierten die Auswertung des Navy-Plaques-Index im Jahr 1995. Sie benutzten ein planimetrisches Verfahren zur Erfassung der Plaques. Davon ausgehend, dass klinisch 9 Werte sowohl fazial als auch lingual erhoben werden müssen, was Summiert beim voll bezahntem Gebiss 576 Werte ergibt, erhoben Claydon und Addy die Befunde später anhand von Fotos und einer speziellen Schablone, wodurch der Zeitaufwand am Patienten reduziert werden konnte (Claydon & Addy 1995, Claydon & Addy 1996).

Insgesamt ist der Navy-Plaques-Index ein sehr guter Index. Er lässt sich hervorragend reproduzieren sowohl inter- als auch intraindividuell (Shaloub 2000). So kann dieser Index von Fachpersonal mit Erfahrung als auch von völlig ungeübtem Personal erhoben werden. Als weiterer Vorteil sei die größere Objektivität gegenüber anderen Indexsystemen genannt. (Claydon & Addy 1995). Nachteilig ist jedoch, dass es relativ schwierig und zeitaufwändig ist, alle Werte zu erheben, besonders bei distalen Molaren oder in lingualen Bereichen. Dieser Nachteil kann aber durch die Modifikation durch Claydon und Addy vermindert werden, da durch die Fotodokumentation optimale Sichtverhältnisse erzeugt und somit eine höhere Sensitivität geschaffen werden kann. Die verschiedenen Modifikationen des Indexes, besonders die nach Rustogi et al. sowie nach Claydon und Addy, eignen sich sehr gut für Studien, welche Mundhygieneprodukte evaluieren. Für die Klinik ist dieses Indexsystem wegen des großen Zeitaufwandes nur eingeschränkt verwendbar.

Cancro beschrieb 1983 mit dem DMPI-Index ein System, welches sein Augenmerk besonders auf gingivalen und interdentalen Bereich legt. Der Zahn wird bei diesem Indexsystem in verschiedene Bereiche eingeteilt. Die vier gingivalen, sowie die vier interdentalen (zwei mesiale und zwei distale) Bereiche sind in sich nochmals in drei kleinere Bereiche geteilt und

werden mit vier Graden (Werte 0 bis 3) bewertet. Diese Einteilung bewirkt eine differenziertere und gut reproduzierbare Bewertung der Plaqueakkumulation. Die Glatfläche wird nur durch eine Ja-/Nein-Entscheidung bewertet. Dieses Indexsystem eignet sich wegen der differenzierten Betrachtung der gingivalen und interdentalen Bereichen um den Effekt von Mundhygieneprodukten, wie Zahnpasten oder Mundspüllösungen, zu evaluieren (Cancro 1983, Fischman 1986).

Mit dem Distal-Mesial-Plaque-Index wurde von Fischman der Navy-Plaque-Index variiert. Hier wird auf die mit der Zahnbürste schwer erreichbaren gingivalen und zervikalen Zahnanteile, sowie auf den interdentalen Raum, der Schwerpunkt gelegt (Fischman 1987).

O'Leary beschreibt 1967 eine Bewertungsmethode welche die bukkal-labialen und die lingualen Oberflächen der Zähne evaluiert. Die höchsten Werte pro Segment werden durch die Anzahl an Zahnsegmenten dividiert. Die Werte reichen von 0 bis 3, wobei 0 die Abwesenheit von Plaque jedes Zahnes im Segment und 3 die Bedeckung eines Zahnes mit Plaque über ein Drittel bedeutet. (Fischman 1986, O'Leary 1967).

Der Gingivarand-Plaque-Index nach Harrap (1974) wird auf den Bukkalflächen der Zähne erhoben. Er wurde zur Erhebung von Plaque nah an der marginalen Gingiva entwickelt, weil dort die Plaqueakkumulation beginnt und es daher wichtig ist diese Region zu betrachten. Es wird nach Anfärben der Plaque deren prozentuale Ausdehnung entlang des Gingivarandes im Verhältnis zur Gesamtlänge geschätzt. Die Dicke der Plaque bleibt hierbei unberücksichtigt. (Mander 1980, Harrap 1974).

Aus der Literaturrecherche hat sich der modifizierte Navy-Plaque-Index nach Rustogie et al. Mit der planimetrischen Modifikation von Claydon und Addy als höchst differenzierter und reproduzierbarer Plaqueindex herauskristallisiert. Aus diesem Grund wurde dieses Verfahren in dieser Arbeit verwendet.

Die Putzkraft spielt eine weitere Rolle in der klinischen Erforschung und Anwendung von Zahnbürsten. Empfehlungen über den maximalen Anpreßdruck beschreiben einen maximalen Druck von 1,5 N (Mierau 1992). Eine neuere Studie aus dem Jahr 2002 beschreibt jedoch erst erhöhte Abrasionswerte ab einem Anpreßdruck von 4 N im Vergleich zu 1,5 N (Westerfeld 2002). Aus diesem Grund, konnte der in dieser Studie verwendete Anpreßdruck von 3,5 N bedenkenlos angewendet werden.

Für die klinische Erforschung von Zahnbürsten spielt auch das Studiendesign eine entscheidende Rolle. Erfolgreiche Studiendesigns werden beispielsweise von Claydon und Addy (1996), Danser 2002, Claydon (2002), Dörfer (2003) und He (2009) beschrieben. Dabei

umfassten die Studien zwischen 23 und 87 Probanden mit und/oder ohne zahnmedizinisches Hintergrundwissen (randomisiert), welche sich nach einer professionellen Zahnreinigung in einer 2 – 4 – tägigen Plaque-regrowth-Phase befanden, auf der die Untersuchung folgte. Es schloss sich in allen Studien eine mehrtägige, wenigstens jedoch 4-tägige wash-out-Phase an. Die Untersuchungen verliefen einfach verblindet, cross-over und erfolgten alle innerhalb jeweils eines Instituts (monozentrisch) mit jeweils einem Untersucher. Die verwendeten Zahnbürsten wurden einmalig (single-dose) verwendet. In keiner der Studien wurden die Tests der Zahnbürsten in Kombination mit Zahnpasta durchgeführt. Diese Parameter finden sich in dieser Studie wieder und entsprechen internationalen Kriterien.

Die Erforschung von Zahnbürsten erfolgt, wie bereits erwähnt, nicht nur durch klinische, sondern auch durch labortechnische Studien. Für labortechnische Studien gelten andere Kriterien und sind in ihrer Gestaltung flexibler als klinische Studien am Menschen. Die industrielle Erforschung von Zahnbürsten entwickelt seit Jahrzehnten Methoden, die standardisiert die Reinigungseffizienz von Zahnbürsten ermitteln.

Zu diesen Methoden gehören seit dem Jahr 1979 auch Roboter, welche die Verwendung und Reinigungseffizienz von Zahnbürsten simulieren. Der erste Roboter wird in der Arbeit von Nygaard-Østby im Jahr 1979 beschrieben. Dieser erste Roboter simulierte den Zugang verschiedener Zahnbürstendesigns in den Interdentalraum und verwendete zwei standardisierte Putztechniken. Eine horizontale und eine vertikale (Nygaard-Østby 1979).

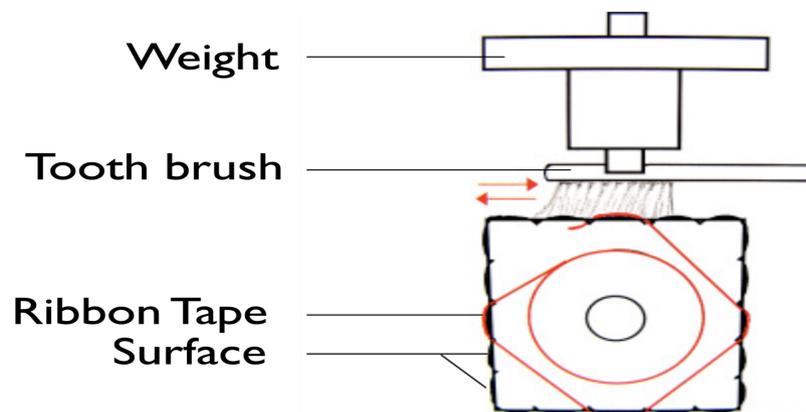


Abb. 2.3.: Roboterversuchsaufbau nach Nygaard-Østby 1979

Der Versuchsaufbau von Nygaard-Østby 1979 wurde durch Rawls 1993

Weiterentwickelt. Die simulierte Zahnreihe wurde durch Oberkiefermodelle (Columbia Dentoform Zahnmodelle) ersetzt und um eine Aussage über das Plaqueentfernungspotential

ausgewählter Zahnbürsten treffen zu können, wurde ein blauer Ethylcellulosefilm hergestellt, der jedoch in der Haftung nicht der natürlichen Plaque entsprach (Rawls 1993, Völker 2006).

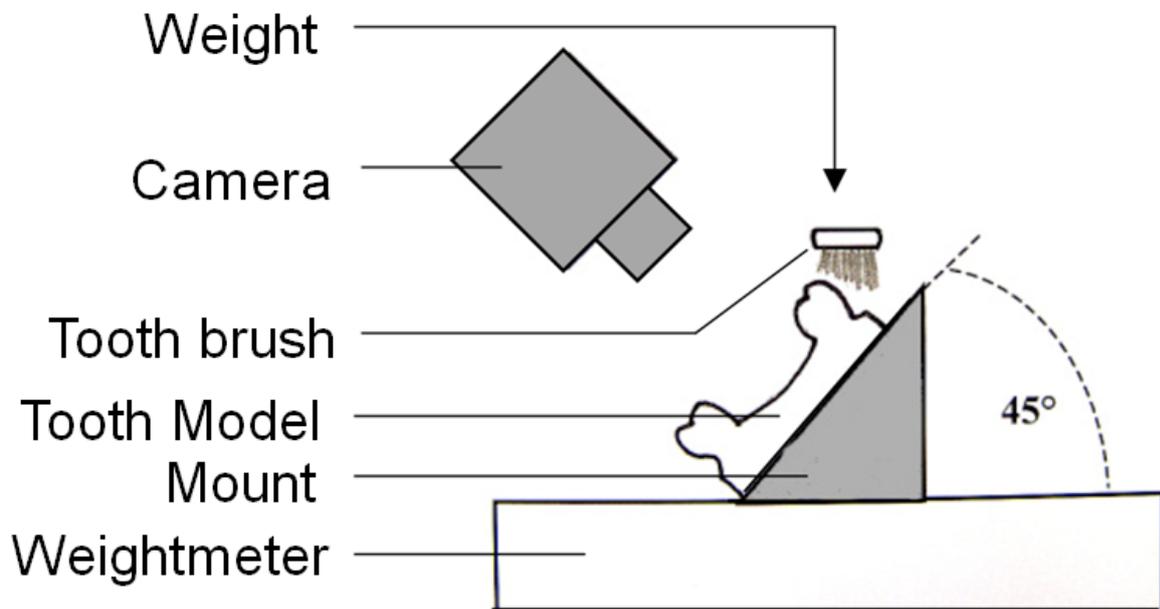


Abb. 2.4.: Roboterversuchsaufbau nach Rawls

Der Versuchsaufbau wurde 1994 von Volpenhein modifiziert, der die Hartnäckigkeit von 12 stündiger in-vivo gewachsener Plaque mit einem roten alkoholbasierenden Ethylester von einem PVM/MA Copolymer nachzuahmen versuchte (Volpenhein 1994).

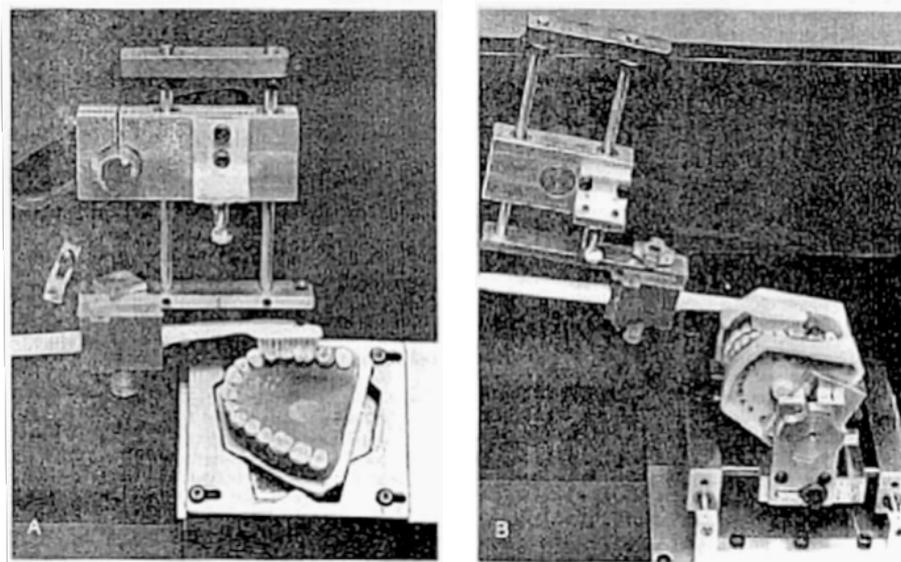


Abb. 2.5.: Roboterversuchsaufbau nach Volpenhein 1994

1997 findet in einer Veröffentlichung von Ernst ein weiterer Roboter Anwendung in der Erforschung der Reinigungseffizienz von Zahnbürsten. Dieser Roboter ist auf Grund seiner 6 Achsen in der Lage ein drei-dimensionales Bewegungsmuster zu simulieren und durch chromogene Plaque die Reinigungseffizienz auch elektrischer Zahnbürsten zu testen (Ernst 1997).

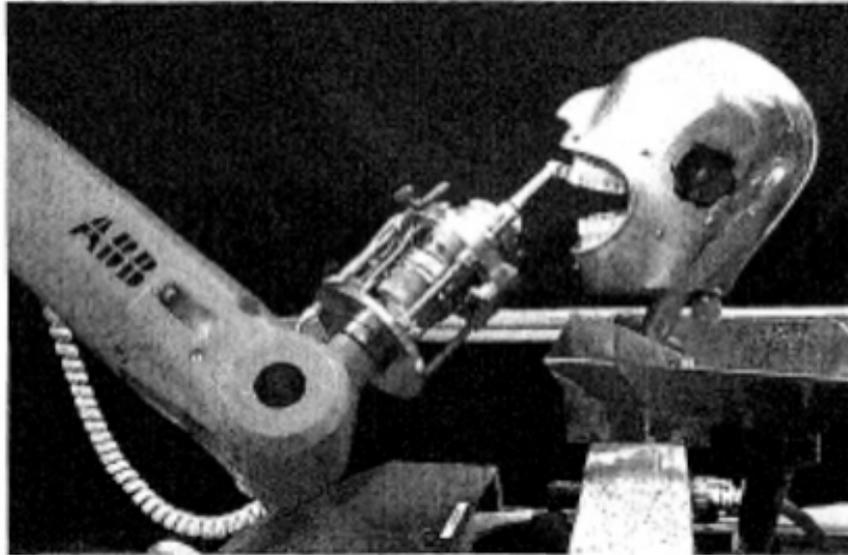


Abb. 2.6.: Roboterversuchsaufbau nach Ernst 1997

Es existieren viele weitere Forschungsarbeiten über Roboter, welche die Reinigungseffizienz von Zahnbürsten testen (Driesen 1996, Imfeld 2000, Mayer 2000, Völker 2006, Schätzle 2008, Barnes 2009). Die Studien weisen jedoch Mängel auf. Zum einen ist es keinem Versuchsaufbau gelungen, ein Plaqueersatzmaterial zu entwickeln, welches der natürlichen Plaque in Form, Festigkeit und Haftung entspricht. In dieser Studie wird eine Rote Spezialfarbe der Firma international GmbH verwendet, die durch eine Studie aus dem Jahr 2004 als der Plaque in ihren Eigenschaften am ähnlichsten ist (Rother 2004). Weiterhin werden in einigen der erwähnten Versuchsaufbauten keine anatomisch korrekten Zahn- und Kiefermodelle verwendet (Imfeld 2000, Völker 2006). Die Verwendung anatomisch korrekter Modelle erhöht die Übertragbarkeit der Ergebnisse in die klinische Situation. Es bieten sich daher Zahnmodelle der Firma Frasaco® oder KaVo® an (letztere werden in dieser Studie verwendet) (Volpenhein 1994, Ernst 1997).

Der größte Mangel aller Studien ist jedoch, dass keines der vorgestellten Robotermodelle klinisch validiert wurde und daher die Ergebnisse nicht unmittelbar auf klinische Situationen übertragen werden können. Zwar stellen die labortechnischen Ergebnisse Tendenzen in der

Reinigungseffizienz einzelner Zahnbürsten dar, aber zur abschließenden Beurteilung bedarf es dennoch aufwendiger klinischer Vergleichsstudien (Danser 2000).

Der in dieser Studie verwendete Industrie-Roboter FS 02N der Firma Kawasaki hat sich in Voruntersuchungen durch seine geringe Zykluszeiten und eine hohe präzise Wiederholgenauigkeit ($\pm 0,03$ mm) ideal für die Simulation der Zahnputzbewegungen geeignet (Rother 2004). Das Gerät wurde von der Firma Schiffer zu Forschungs- und Demonstrationszwecken auf eine separate Funktionseinheit montiert, die durch verschließbare Glastüren den Schutz des Betrachters gewährleistet (Rother 2004). Der Roboter ist in der Lage drei Bewegungsarten entsprechender gängiger Putztechniken durchzuführen. Das Schrubben, das Rotieren nach *Bass* und die vertikale Bewegung vom Zahnfleisch zum Zahn nach *Stillman*.



Abb. 2.7.: Roboterversuchsaufbau der Firma Schiffer

3 Material und Methode

3.1 Verwendete Zahnbürsten

Es wurden zwei handelsübliche Zahnbürsten verwendet. Hierbei handelte es sich um die Dr. Best Flex Plus der Firma GlaxoSmithKline (Abb. 2.1), welche im Test als Zahnbürste A bezeichnet wurde, und um die Dr. Best Interdental der Firma GlaxoSmithKline (Abb. 2.2), welche als Zahnbürste B bezeichnet wurde.

Beide Zahnbürsten besitzen die Borstenstärke „mittel“.

Die Anordnung der Borstenbüschel ist bei beiden Zahnbürsten geringfügig anders, nimmt aber dieselben Flächenanteile in der Aufsicht ein.

Zahnbürste A hat 43 Borstenbüschel (Tuft), Zahnbürste B hat insgesamt 42 Borstenbüschel.

Die Anordnung der Büschelreihen bei Zahnbürste B folgt einem hoch-tief Muster in der lateralen Ansicht. Die Zahnbürste A hat eine plane Büschelanordnung.

Die Zahnbürstenköpfe haben eine nahezu identische Raumforderung. Lediglich die Dicke der Borstenplatte ist bei Zahnbürste B geringfügig größer.

Beide Zahnbürsten haben ein federndes Element im Bereich der Daumenauflage in Form einer Schlange.

Zahnbürste B hat im Gegensatz zu Zahnbürste A einen flexiblen Bürstenkopf in Form eines elastischen Kugelelementes in der Nähe des Bürstenkopfes.

Die Griffe der beiden Zahnbürsten sind identisch.

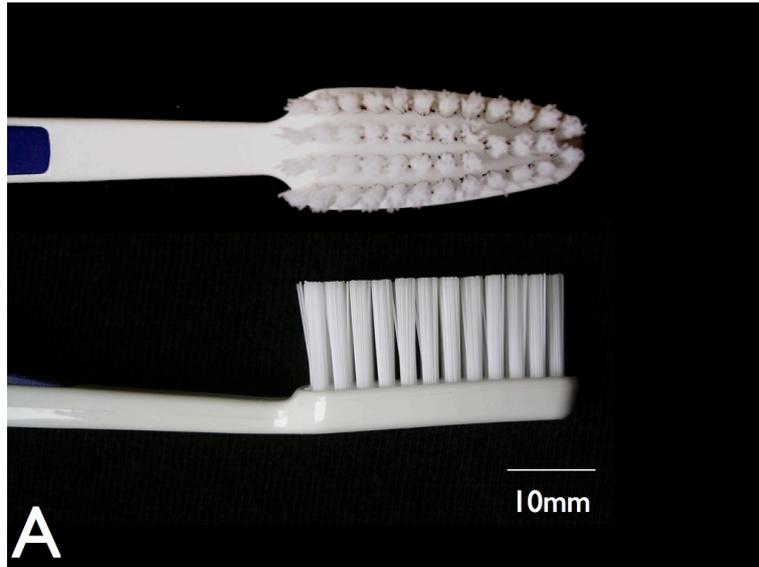


Abbildung 3.1 Dr. Best Flex Plus, Zahnbürste A

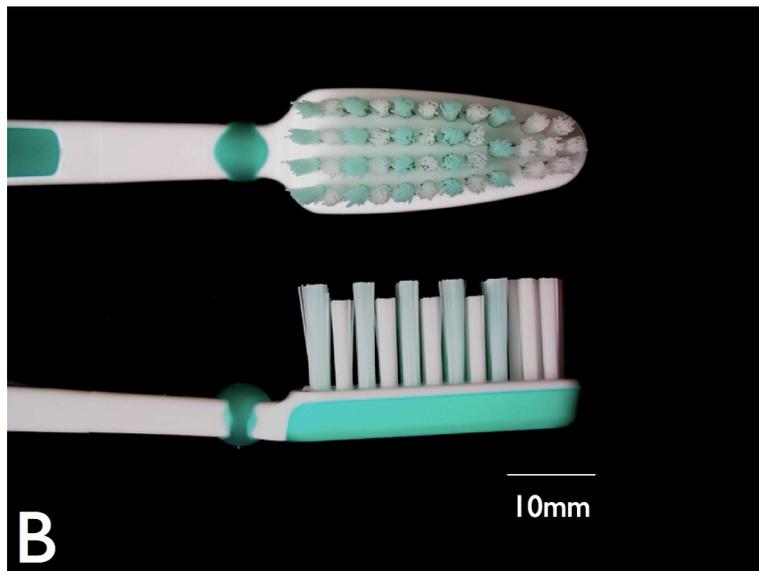


Abbildung 3.2: Dr. Best Interdental, Zahnbürste B

3.2 Probandengut

An der Studie nahmen 30 Probanden teil (12 männliche, 18 weibliche) . Die Probanden waren vorklinische Studenten der Fakultät für Zahn- Mund und Kieferheilkunde der Universität Witten/Herdecke im Alter zwischen 19 und 28 Jahren¹.

Die Einschlusskriterien waren:

- vollständige, gesunde und unbehandelte Dentition der regio Zahn 33 bis Zahn 47
- parodontitisfreie Verhältnisse in der regio Zahn 33 bis Zahn 47
- vollständige Plaquefreiheit der regio Zahn 33 bis 47 zu Beginn eines jeden Untersuchungszyklus

In einer einführenden Veranstaltung wurden die Probanden am 6. Juli 2007 über den exakten Ablauf der klinischen Untersuchung informiert. Ihnen wurden die einzelnen Putztechniken mit Hilfe von Video-Sequenzen vorgestellt. Die Video-Sequenzen zeigten die Arbeitsschritte und Putzverfahren des Roboters. Parallel zu diesem Video mussten die Probanden die Putzbewegungen nachahmen und sich dadurch in die einzelnen Putztechniken einarbeiten.

Nach dem Einüben der Putztechniken mussten sich die Probanden mit Hilfe einer Waage auf den entsprechenden Anpressdruck von 3,5N, welchen der Roboter verwendet, einstellen, um beim Putzen den gleichen oder ähnlichen Anpressdruck zu verwenden (Abb. 2.3). Als zusätzliche Hilfe diente ein Unterkiefermodell aus Gips, welches auf der Waage fixiert war und an dem die Probanden Putzbewegung und Anpressdruck im Zusammenspiel simulieren konnten. Die Kalibrierung auf den Anpressdruck wurde vor jedem Untersuchungszyklus wiederholt.

¹ Die Freigabe der Studie erfolgte durch die Ethik-Kommission der Universität Witten/ Herdecke (Antrag Nr. 55/2007)



Abbildung 3.3: Kalibrierung des Anpressdrucks auf 3,5N

Des Weiteren wurden den Probanden feste Nummern zugewiesen, welche den Probanden Termin, Reihenfolge und zu verwendende Putztechnik an den entsprechenden Untersuchungszyklen zuwies. Dabei wurden zwei Hauptgruppen gebildet, sodass 15 Probanden mit der Zahnbürste A, und 15 Probanden mit der Zahnbürste B getestet wurden. Am Tag 1 eines Untersuchungszyklus wurde durch professionelle Zahnreinigungen die Plaquefreiheit der regio Zahn 33 bis 47 aller Probanden erreicht. Die professionellen Zahnreinigungen wurden von den geschulten Studienteilnehmern gegenseitig ausgeführt. Bei der professionellen Zahnreinigung wurden die Prophylaxe-Trays (12 Teile) der Universität Witten/ Herdecke, Polierkelche Prophy-Kelche® der Firma Hager & Werken GmbH & Co KG und Polierpaste Miraclean® der Firma Hager & Werken GmbH & Co KG verwendet. Nach Abschluss der professionellen Zahnreinigung wurden die Probanden darauf hingewiesen, jede Form der Mundhygiene für die nächsten 72 Stunden einzustellen. Untersuchungszyklus 1 verlief vom 6. – 9. Juli 2007; Untersuchungszyklus 2 verlief vom 13. – 16. Juli 2007; Untersuchungszyklus 3 verlief vom 20. – 23. Juli 2007.

3.3 Dokumentation

Die Fotodokumentation der Untersuchungen erfolgte mit einer Nikon D70 Fotokamera, welche mit einem Micro Nikkor 105mm /2,8 Objektiv und einem Nikon Makroblitz R1 ausgestattet war, durchgeführt. Der Abbildungsmaßstab aller Aufnahmen betrug dabei 1:2. Bei der Fotodokumentation assistierte ein Helfer mit Hilfe von einem einseitigen Retraktor Mirahold® der Firma Hager & Werken GmbH & Co KG und einem rhodiumbeschichteten Lateralspiegel der Firma Doctorseyes. Die Assistenz war nötig, um das Sichtfeld auf den Mundraum zu vergrößern und um die Fotodokumentation sicher zu standardisieren.

3.4 Ablauf der klinischen Untersuchung

Nach Ablauf von 72 Stunden Plaque-Akkumulation (3-day plaque regrowth) wurde mittels eines Plaquerevelators Mira-2-Ton® der Firma Hager & Werken GmbH & Co KG die sich gebildete Plaque sichtbar gemacht und mittels Retraktor, Lateralspiegel und Fotokamera dokumentiert.

Der Fotodentalstatus, der pro Proband fünf Dentalfotos vor dem Putzen und fünf Dentalfotos nach dem Putzen der Zähne enthält, setzt sich aus Fotogrammen der folgenden Regionen zusammen:

Vestibulärer Situs:

1. Incisivi Zahn 32-42 (Spiegellose Aufnahme mit beidseitig angelegtem Retraktor)
2. Canini & Prämolaren Zahn 43-45 (Spiegellose Aufnahme mit beidseitigem Retraktor)
3. Molaren Zahn 46-47 (Gespiegelte Aufnahme mit beidseitigem Retraktor)

Lingualer Situs:

4. Incisivi Zahn 32-42 (gespiegelte Aufnahme mit beidseitig angelegtem Retraktor)
5. Molaren Zahn 46-47 (gespiegelte Aufnahme mit beidseitigem Retraktor)

Nach der Dokumentation mussten die Probanden entsprechend der vorangegangenen, wiederholten Kalibrierung (siehe oben) und entsprechend der ihnen zugeteilten Nummer ohne Zahnpasta und Wasser mit der Roboterputztechnik der Programme 1-3 die zu untersuchenden Zähne der regio 33 – 47 putzen. Die Roboter-Programme bauen sich folgendermaßen auf:

Roboterputztechnik Programm 1

Horizontales Schrubben

Roboterputztechnik Programm 2

Rotatorische Putztechnik

Roboterputztechnik Programm 3

Rot-Weiss-Technik

(Abrollbewegung von gingival nach koronal)

Die Putzzeit betrug insgesamt 40 Sekunden². Als zusätzliche Unterstützung wurde den Probanden während des Putzens das Video des Roboters mit der entsprechenden Putztechnik vorgeführt, damit sie sich, entsprechend der Vorgabe, an das Putzschema halten konnten und so die Abweichungen von Putzzeit und Putzbewegung zusätzlich minimiert werden konnten (Abb. 2.4).

² Jeweils 20 Sekunden vestibulär und 20 Sekunden lingual, durch Robotervideo-Sequenzen vorgegeben.



Abbildung 3.4: Proband während des Testdurchlaufs mit zusätzlicher Kalibrierung durch die vorgegebene Video-Sequenz

Nach dem Putzen mussten sich die Probanden mit wenig Wasser den Mund leicht ausspülen, um gelöste Plaquereste aus der Mundhöhle zu entfernen. Danach wurde der Plaqueindex mittels Retraktor, Lateralspiegel und Fotokamera ein zweites Mal dokumentiert. Nach der Dokumentation durften die Probanden die übliche Mundhygiene wieder aufnehmen. Es schloss sich eine 96-stündige Wash-out-Phase an. An die Wash-out-Phase schloss sich der nächste Untersuchungszyklus an. Mit dem Abschluss aller drei Untersuchungszyklen hatte jeder Proband mit dem ihm zugeteilten Zahnbürstentyp alle drei Putztechniken absolviert.

3.5 Kalibrierung des Untersuchers

Die Fotodentalstaten wurden von einem Untersucher indexiert. Zur Kalibrierung dienten die methodialen Vorgaben nach Claydon und Addy (1995).

Nach diesem Index wird die Zahnfläche in 9 Abschnitte eingeteilt (A-I). Diese Areale sind kleiner in Bereichen häufiger Plaquebesiedelung und größer in Bereichen seltener Plaquebesiedelung. In der Planimetrie gilt ein Areal als positiv (Werte 1), sobald in diesem eingeteilten Areal Plaque zu finden ist. Anatomische Bezugspunkte für die Einteilung der Plaqueareale sind:

- Gingivaler Sulcus
- Aproximaler Kontaktpunkt
- Vertikale Mittellinie
- Anatomischer Äquator

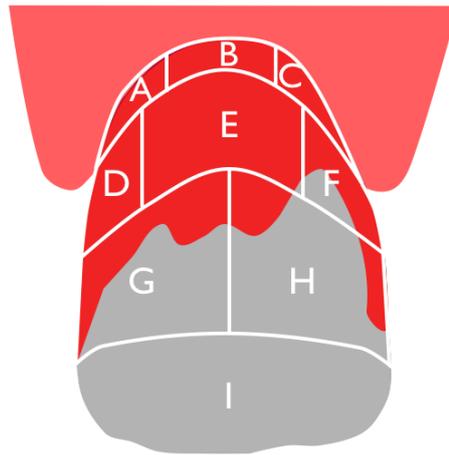


Abbildung 3.5: Planimetrischer Index

3.6 Indexierung der klinischen Untersuchung

Die Auswertung fand, um die Vergleichbarkeit der Betrachtung zu gewährleisten, ausschließlich an einem Arbeitsplatz (IBM Thinkpad® T60 der Firma Lenovo) statt. Die Eintragung der Befunde erfolgte in Tabellenform (Programm Excel).



Abbildung 3.6: Fotostatus vor dem Putzen



Abbildung 3.7: Fotostatus nach dem Putzen

Tabelle 3.1: Auswertungsbeispiel nach Planimetrie

Probandnummer: 2

Datum: 09.07.2007

Zahnbürste: A

Durchlauf: 1

Putztechnik: 1

Vestibulärer Situs vor dem Putzen

47			46			45			44			43			42			41			31			32		
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6			5			6			6			7			8			8			6			7		

3.7 Ablauf der Labortests

Die Laboruntersuchungen für die Studie fanden im Forschungslabor der Fakultät für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde der Universität Witten/Herdecke statt.

Bei den Versuchen wurden die Zahnbürsten A und B mit jeder Putztechnik an jeweils sieben Modellen im Roboter getestet. Nach der Bezahnung der Unterkiefermodelle der Firma Kavo® mit entsprechenden Kunststoffzähnen und Einfärbung mit roter Spezialfarbe wurde das zu testende Modell in den Roboter eingespannt und der entsprechende Putzzyklus gestartet. Nach Ablauf des Putzzyklus wird das Modell aus dem Roboter ausgespannt und als erstes entsprechend dem in 2.3 beschriebenen klinischen Fotodentalstatus fotografiert. Eine Dokumentation vor den Putzvorgang war nicht erforderlich, da die Kunststoffzähne des Modells nach der Beschichtung mit der roten Spezialfarbe zu 100% bedeckt waren.

Nach der Erstellung des Fotodentalstatus wurden die Kunststoffzähne entsprechend der Methode der Fa. M+C Schiffer anhand der Arbeit von Rother (2004) und Berger (2007) dokumentiert, ausgewertet und an die Statistik weitergeleitet.

3.8 Indexierung der Labordaten

Die Auswertung der Labormodelle entsprach der Auswertung der klinischen Fotodentalstatus. Die Problematik der fehlenden Gingiva beim Labormodell musste durch die Kalibrierung des Untersuchers kompensiert werden. Darum konnte diese Auswertung ebenfalls nur durch einen Untersucher erfolgen, damit die Festlegung der fiktiven gingivalen Grenze nicht variieren konnte.



Abbildung 3.8: Fotostatus nach dem Putzen³

³ Abbildung 3.8 zeigt die Aufsicht auf die Modellzähne nach dem Putzvorgang mittels Roboter. Durch die fehlende gingivale Begrenzung erreicht der Roboter Zahnabschnitte, welche klinisch unerreichbar sind. Diese Problematik ist in Kapitel 5.4 analysiert.

4 Versuchsanordnung, Anforderungen an die Datenbasis und verwendete Verfahren

An der **Probandenstudie** nahmen 30 Teilnehmer teil. Sie bestand aus 3 Durchläufen, in denen jeweils eine Putztechnik verwendet wurde:

- Putztechnik 1 : Schrubben
- Putztechnik 2: Rotierend
- Putztechnik 3: Rot-Weiß.

Von den 30 Teilnehmern der Studie nahmen 2 Probanden (Proband 5 und Proband 14) am Durchlauf 3 nicht mehr teil, sie wurden aus der gesamten Datenbasis entfernt. Die Analysewerte eines weiteren Teilnehmers (Proband 18) zeigten bereits vor dem Putzen einen auffällig niedrigen Plaque-Befall. Ein Test auf Ausreißer (GRUBBS-Test) bestätigte, dass für die Putztechnik 1 und diesen Probanden bei einem Signifikanzniveau von 5 % die Nullhypothese, dass es sich nicht um einen Ausreißer handelt, verworfen werden kann.⁴ Als Konsequenz wurden die Werte dieses Probanden für die folgenden Untersuchungen ebenfalls aus der Datenbasis entfernt. Insgesamt ergibt sich für die Probandenstudie somit ein Stichprobenumfang von $n=27$.

Es wurden 2 verschiedene Zahnbürsten verwendet:

- Zahnbürste A: Dr. Best Flex Plus mittel
- Zahnbürste B: Dr. Best Interdental mittel

Die Zahnbürste A verwendeten $n=13$ und Zahnbürste B $n=14$ Probanden.

Es wurden die Zähne 47, 46, 45, 44, 43, 42, 41, 31 und 32 untersucht. Jeder Zahn wurde nach dem Schema der Planimetrie in 9 Felder eingeteilt, die jeweils vor und nach dem Putzen mit einer 0/1-Variablen bewertet wurden. Nach dem Planimetrie-Schema bedeutet

- 0: das entsprechende Zahnfeld ist frei von Plaque, und
- 1: es gibt sichtbare Plaque auf dem entsprechenden Feld.

⁴ Zur Identifikation von Ausreißern vgl. auch RINNE (2003, S. 545 ff.)

Das hat Konsequenzen bei der Mittelwertbetrachtung der einzelnen Zähne und auch bei der Durchführung von t-Tests mit diesen Daten: Ein Mittelwert von 3 bedeutet z.B. nicht, dass der Zahn zu einem Drittel mit Plaque bedeckt ist, sondern lediglich, dass im Mittel ein Drittel der Zahnfelder dieses Zahnes noch Plaquerückstände aufweist und die anderen zwei Drittel vollständig sauber sind. Betrachtet man diese Interpretation, so steht einer Verwendung von Mittelwerten aus inhaltlicher Sicht nichts im Wege.

Zur Beurteilung des Putzerfolges werden die Variablen verwendet, die den Zustand der Zähne *nach* dem Putzen beschreiben. Im Rahmen einer statistischen Untersuchung muss dazu zunächst sichergestellt werden, dass nicht bereits vor dem Putzbeginn systematische Unterschiede im Plaquebefall bei den Probanden bestehen. Es wurden daher Tests für verschiedene Klassifikationen (Zahnbürste, Putztechniken) durchgeführt, die keine signifikanten Mittelwertabweichungen für die Variablen vor dem Putzen nachweisen konnten. Eine ausschließliche Betrachtung des Zustandes nach dem Putzen ist somit für die Daten der Probandenstudie angemessen.

Die **Roboterdaten** entstammen einer Versuchsreihe von jeweils 7 Durchläufen mit Zahnbürste A und 7 Durchläufen mit Zahnbürste B. Auch hier wurden die 3 verschiedenen Putztechniken angewandt. Nach dem Putzen wurden die Ergebnisse zum einen mittels klinischer Planimetrie festgehalten und zum anderen auf die übliche Weise ausgewertet. Die Planimetriedaten liegen analog zur Probandenstudie zahnweise vor, während für das übliche Verfahren lediglich drei Zahnabschnitte untersucht wurden (zur genauen Definition siehe w.u. der statistischen Auswertung). Im ersten Teil der vorliegenden Untersuchung werden die Roboterdaten nach Planimetrie mit denen der Probandenstudie verglichen. Im folgenden Teil werden die Planimetriedaten dann ebenfalls zu Zahnabschnitten aggregiert und den Ergebnissen des üblichen Verfahrens gegenübergestellt.

Auch bei der Auswertung der Roboterdaten bezeichnen die verwendeten Variablen stets den Zustand nach dem Putzen. Die für die folgenden Analysen verwendeten Ausgangsdaten befinden sich in Anhang A 5.1.

Da für alle verwendeten Datenreihen Mittelwert und Varianz sinnvoll interpretierbar sind, können Hypothesen bezüglich der Unterschiedlichkeit zweier oder mehrerer Mittelwerte mittels t- bzw. F-Tests überprüft werden.⁵ Aufgrund des geringen Stichprobenumfanges wird zur Bestimmung der Zufallswahrscheinlichkeit eines berechneten t-Wertes die entsprechende Tabelle der t-Verteilung zu Hilfe genommen.⁶ Die Anwendung eines t-Tests bei kleinen Stichproben setzt voraus, dass die Grundgesamtheiten, aus denen die Stichproben entnommen werden, normalverteilt sind. Zweite Voraussetzung ist die Homogenität der Varianzen. Der t-Test ist allerdings relativ robust gegenüber Verletzungen dieser beiden Grundannahmen. Sind die Stichprobenumfänge n_1 und n_2 jedoch deutlich verschieden und die Varianzen nicht gleich, so kann es zu einem relativ hohen Prozentsatz von Fehlentscheidungen kommen. Dies stellt insbesondere bei dem Vergleich von Probanden und Roboter ein Problem dar ($n_1 = 27$, $n_2 = 14$). Es wird deshalb beim Vergleich der Mittelwerte von Probanden und Robotern ein modifizierter t-Test (SATTERTHWAITE-WELCH-Test) verwendet, der diese Problematik entsprechend korrigiert.⁷

Für die Verarbeitung der Daten und die Tests wurden die Programme Microsoft Excel und EViews verwendet.

⁵ Zur Kontrolle wurden neben den t-Tests auch U-Tests nach MANN-WHITNEY durchgeführt (zu den verteilungsfreien Verfahren vgl. z.B. BORTZ 2005, S.150 ff.). Diese bestätigten die Ergebnisse der t-Tests. Auf eine Dokumentation der Ergebnisse wurde verzichtet.

⁶ Bei einem größeren Stichprobenumfang wird auf die Normalverteilungstabelle zurückgegriffen.

⁷ Vgl. hierzu auch BORTZ (2005, S.141).

5 Analyse der durch Planimetrie erhobenen Daten

In diesem Teil der Studie werden die Daten der Probandenstudie analysiert und mit den Planimetriedaten der Roboterstudie verglichen. Insbesondere wird untersucht, ob und welche Unterschiede zwischen Probanden und Putzroboter zu beobachten sind. Die in Teil 2 verwendeten Daten liegen sowohl für Probanden als auch für den Roboter für die Zähne 47, 46, 45, 44, 43, 42, 41, 31 und 32 in Einzelbetrachtung vor.

5.1 Vergleich von Probanden und Roboter

Abbildung 5.1 zeigt die Putzergebnisse von Probanden und Roboter für die einzelnen Zähne, nach Putztechnik und vestibulär / lingual differenziert. Es wird jeweils der Mittelwert für die untersuchte Gruppe ausgewiesen (nähere Erläuterungen zum Vorgehen bei der statistischen Analyse finden sich jeweils als Erläuterung unter der entsprechenden Abbildung bzw. Tabelle). Der abgebildete Wert stellt die durchschnittliche Anzahl nicht vollständig gereinigter Zahnfelder nach Planimetrie dar. Pro Zahn können dies maximal 9 Felder sein.

Zunächst fällt in der Abbildung 5.1 auf, dass es in der Roboterstudie bei der Putztechnik 3 besonders im Bereich der hinteren Zähne und für die Zahnbürste B zu erheblichen Abweichungen vom sonstigen Muster gekommen ist (vgl. hierzu auch die Ausgangsdaten in Anhang 5.1). Dies ist auf die spezielle Konstellation „Putztechnik Rot-Weiß“ mit Zahnbürste B zurückzuführen. Zum Vergleich mit den anderen Graphiken wird in Abbildung 5.2 die Putztechnik 3 nur für die Zahnbürste A dargestellt. Dadurch zeigt sich jetzt zwar bei Zahnbürste A im vestibulären Bereich das erwartete Bild,⁸ im Bereich der lingualen Zahnflächen des hinteren Zahnabschnittes existiert aber auch hier eine starke Abweichung zwischen Roboter und Probanden. Insgesamt müssen daher die Ergebnisse der Putztechnik 3 für den Roboter sehr vorsichtig interpretiert werden.

⁸ Dies bedeutet allerdings auch, dass die gute Übereinstimmung von Roboter- und Probandendaten in der aggregierten Betrachtung von Putztechnik 3 im vestibulären Bereich auf die starke Überhöhung der Mittelwerte durch die Zahnbürste B zurückzuführen ist. Rechnet man diesen Effekt hinaus, wie es in Abbildung 5.2 geschieht, so zeigt sich auch hier eine höhere Putzleistung des Roboters im Vergleich zu den Probanden.

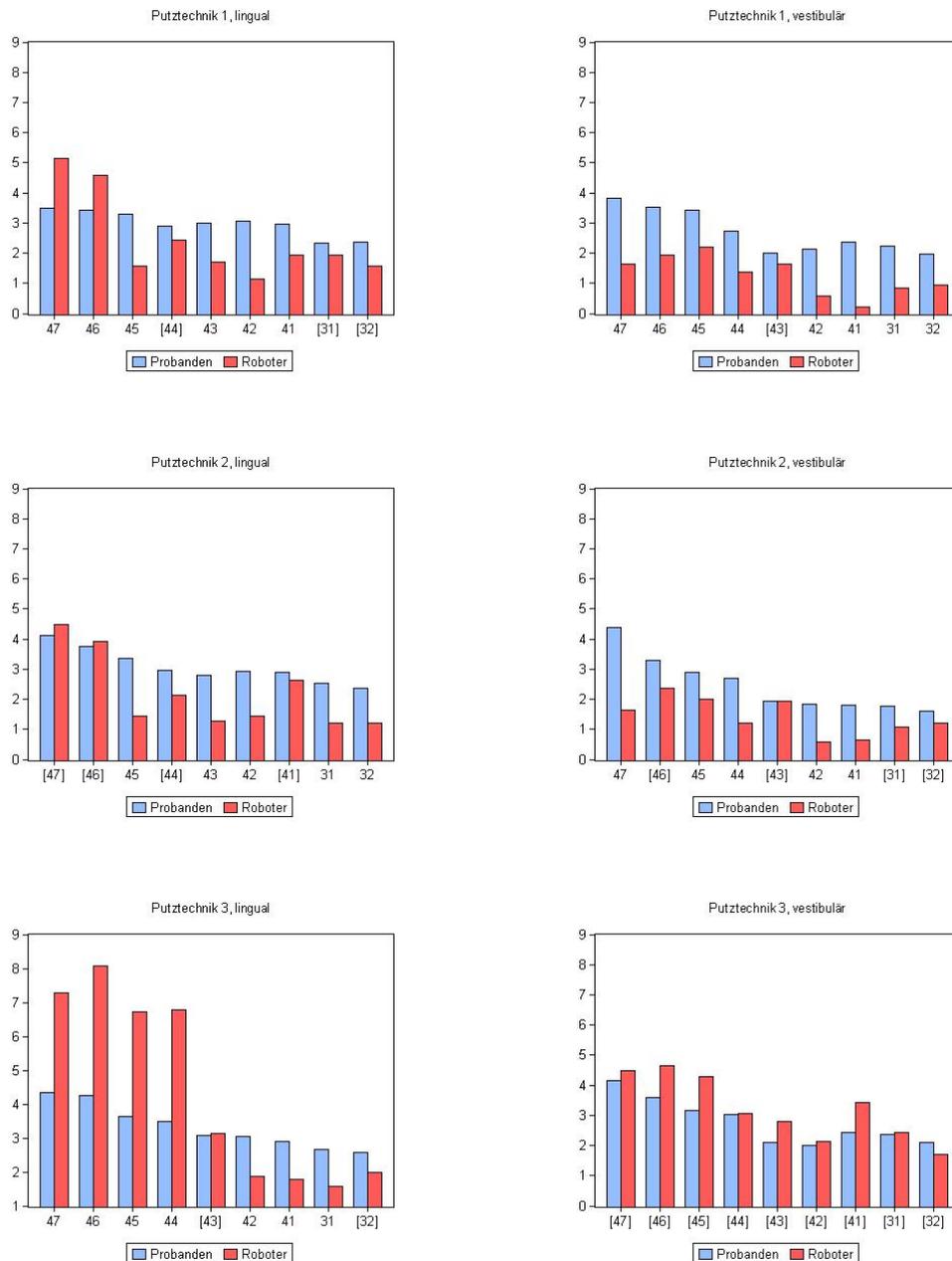


Abbildung 5.1: Anzahl nicht vollständig gereinigter Zahnfelder (Planimetrie) nach Putzen

Erläuterungen: Mittelwerte, Anzahl der Beobachtungen: Probanden: $n=27$, Roboter: $n=14$. Keine Differenzierung nach der verwendeten Zahnbürste. Die Ziffern auf der Abszisse bezeichnen die untersuchten Zähne. Werte in eckigen Klammern (z.B. [47]) bedeuten, dass die Nullhypothese der Gleichheit der Mittelwerte der beiden untersuchten Reihen bei einem Signifikanzniveau von 5 Prozent nicht abgelehnt werden kann (Mittelwerte sowie t-Werte für alle Vergleiche siehe Tabelle A.1.a).

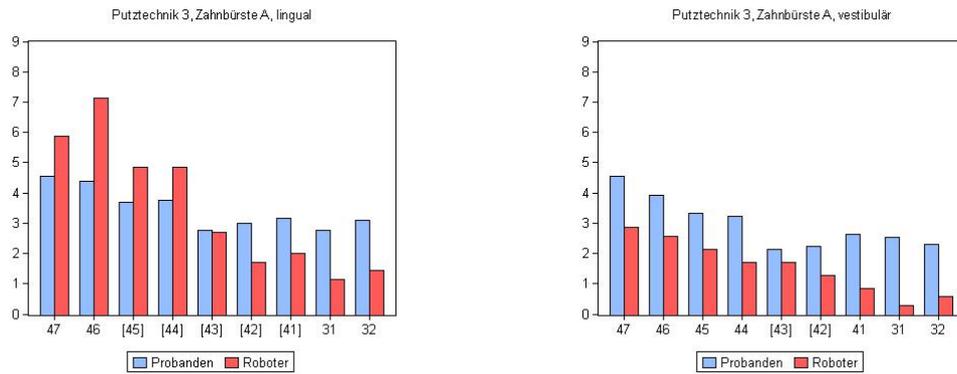


Abbildung 5.2: Anzahl nicht vollständig gereinigter Zahnfelder (Planimetrie) nach Putzen, Zahnbürste A, Putztechnik 3

Erläuterungen: Mittelwerte, Anzahl der Beobachtungen: Probanden: n=13, Roboter: n=7. Die Ziffern auf der Abszisse bezeichnen die untersuchten Zähne. Werte in eckigen Klammern (z.B. [47]) bedeuten, dass die Nullhypothese der Gleichheit der Mittelwerte der beiden untersuchten Reihen bei einem Signifikanzniveau von 5 Prozent nicht abgelehnt werden kann (Mittelwerte sowie t-Werte für alle Vergleiche siehe Tabelle A.1 b).

Ergebnisse:

Der Putzerfolg des Roboters nach Planimetrie ist generell höher als derjenige der Probanden. Eine Ausnahme hiervon bilden die lingualen Flächen der Zähne 47 und 46. Hier hinterlassen die Probanden mehr vollständig gereinigte Zahnflächen als der Roboter. In den wenigsten Fällen kann die Hypothese der Gleichheit der Mittelwerte aus Roboter- und Probandenstudie für die einzelnen Zähne nicht abgelehnt werden. Die Übereinstimmungen sind bei Putztechnik 2 am größten. Hier kann für die Hälfte der untersuchten Zähne eine Übereinstimmung zwischen Probanden- und Roboterstudie hinsichtlich der Anzahl nicht vollständig gereinigter Zähne festgestellt werden.

Auffällig ist zudem, dass die Probanden im lingualen und vestibulären Bereich annähernd gleich gut putzen. Die jeweiligen Mittelwerte unterscheiden sich relativ wenig. Beim Roboter ergeben sich hingegen gravierende Unterschiede zwischen der Putzleistung im lingualen und der im vestibulären Bereich. Allerdings zeigt der Roboter, genau wie die Probanden, durchgängig bei allen Putztechniken im lingualen Bereich eine höhere Restverschmutzung als im vestibulären Bereich. Abbildung 5.3 zeigt als Boxplot-Diagramm die Anzahl nicht vollständig gereinigter Zahnflächen für alle untersuchten Zähne aus der Roboter- und der Probandenstudie.

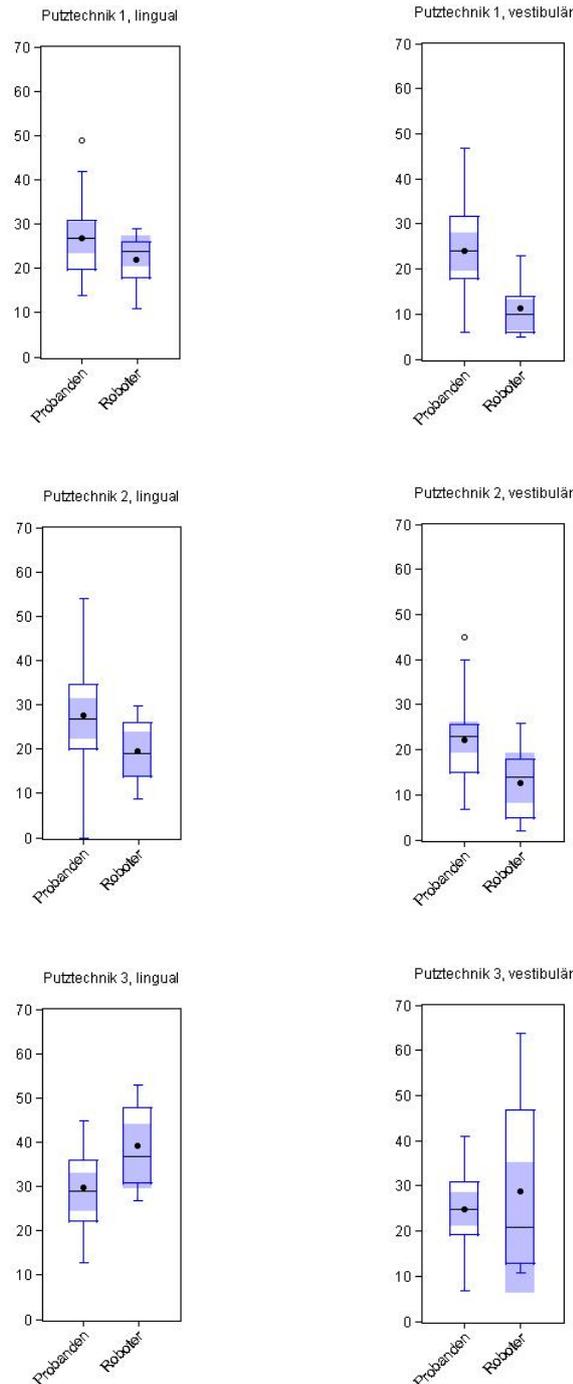


Abbildung 5.3: Anzahl nicht vollständig gereinigter Zahnfelder(Planimetrie) nach Putzen für die Gesamtheit der untersuchten Zähne (47 bis 32)

Erläuterungen: Anzahl Beobachtungen: Probanden: n=27, Roboter: n=14. Keine Differenzierung nach der verwendeten Zahnbürste. Der Mittelwert der entsprechenden Reihe wird durch den schwarzen Punkt gekennzeichnet, der Median durch den schwarzen Strich. Die Box umfasst Werte vom unteren bis zum oberen Quartil. Sie ist auf beiden Seiten mit der Beobachtung verbunden, die noch innerhalb des 1,5-fachen Interquartilsabstandes von der Beobachtung verbunden ist. Das 95% Konfidenzintervall für den Median wird schattiert dargestellt, ein Punkt außerhalb der Box bezeichnet eine Beobachtung, die zwischen dem 1,5- und 3-fachen

Interquartilsabstand von der Box entfernt ist. Noch weiter entfernte Beobachtungen werden mit einem Sternchen gekennzeichnet (Mittelwerte sowie t-Werte für alle Vergleiche siehe Tabelle A.1.a).

T-Tests für die Gesamtheit der untersuchten Zähne bestätigen den visuellen Eindruck aus der Abbildung 4.3: Die Mittelwerte für die Anzahl nicht vollständig gereinigter Zähne unterscheiden sich zwischen Probanden und Roboter signifikant.⁹ Der Mittelwert in der Probandenstudie schwankt je nach Putztechnik und vestibulärem bzw. lingualem Bereich zwischen 22,22 und 29,93 Zahnfeldern, die nach dem Putzen nicht vollständig gereinigt waren (dies entspricht 27,43 bis 36,95 Prozent aller Zahnfelder des Bereiches 47 bis 32). Bei den Roboterdaten sind es zwischen 11,36 und 39,21 Zahnfelder für diesen Bereich. Betrachtet man lediglich Putztechnik 1 und 2, so ergibt sich folgendes Bild:

Tabelle 5.1: Prozentualer Anteil nicht vollständig gereinigter Zahnfelder (Planimetrie) nach Putzen für die Gesamtheit der untersuchten Zähne (47 bis 32)

Putztechnik		Probanden	Roboter
1	lingual	33,10	27,16
	vestibulär	29,86	14,02
2	lingual	34,16	24,43
	vestibulär	27,43	15,60

Wesentliches Ergebnis dieses Untersuchungsabschnittes ist also, dass der Roboter nach dem Putzen signifikant weniger Zahnflächen hinterlässt, die nicht vollständig gereinigt sind als die Probanden.

5.2 Vergleich der verwendeten Zahnbürsten hinsichtlich ihrer Reinigungseffizienz

Dieser Abschnitt untersucht, ob in der Probanden- oder der Roboterstudie eine der beiden verwendeten Zahnbürsten der anderen hinsichtlich ihrer Reinigungseffizienz überlegen ist. Die Ergebnisse werden abschließend miteinander verglichen.

⁹ Ausnahme bildet Putztechnik 3 im vestibulären Bereich. Vgl. hierzu jedoch die Ausführungen zu Beginn des Abschnittes 4.1.

Die Abbildungen 5.4 bis 5.6 visualisieren den Vergleich der Zahnbürsten A und B in der Probanden- und der Roboterstudie. Es werden die Mittelwerte der Anzahl nicht vollständig gereinigter Zahnflächen pro Zahn abgebildet. Je geringer diese Zahl, umso höher ist die erzielte Reinigungsleistung der untersuchten Zahnbürste. Ein Vergleich findet innerhalb der jeweiligen Stichprobe zwischen den Zahnbürsten statt. Es wird untersucht, ob die Nullhypothese einer Gleichheit der Mittelwerte bei einem Vergleich von Zahnbürste A und B aufrechterhalten werden kann: „Putzen Zahnbürste A und B gleich gut?“ Kann diese Hypothese des nicht signifikant unterschiedlichen Putzerfolges bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 Prozent nicht abgelehnt werden, dann erhält die betreffende Zahnbezeichnung eine eckige Klammer.

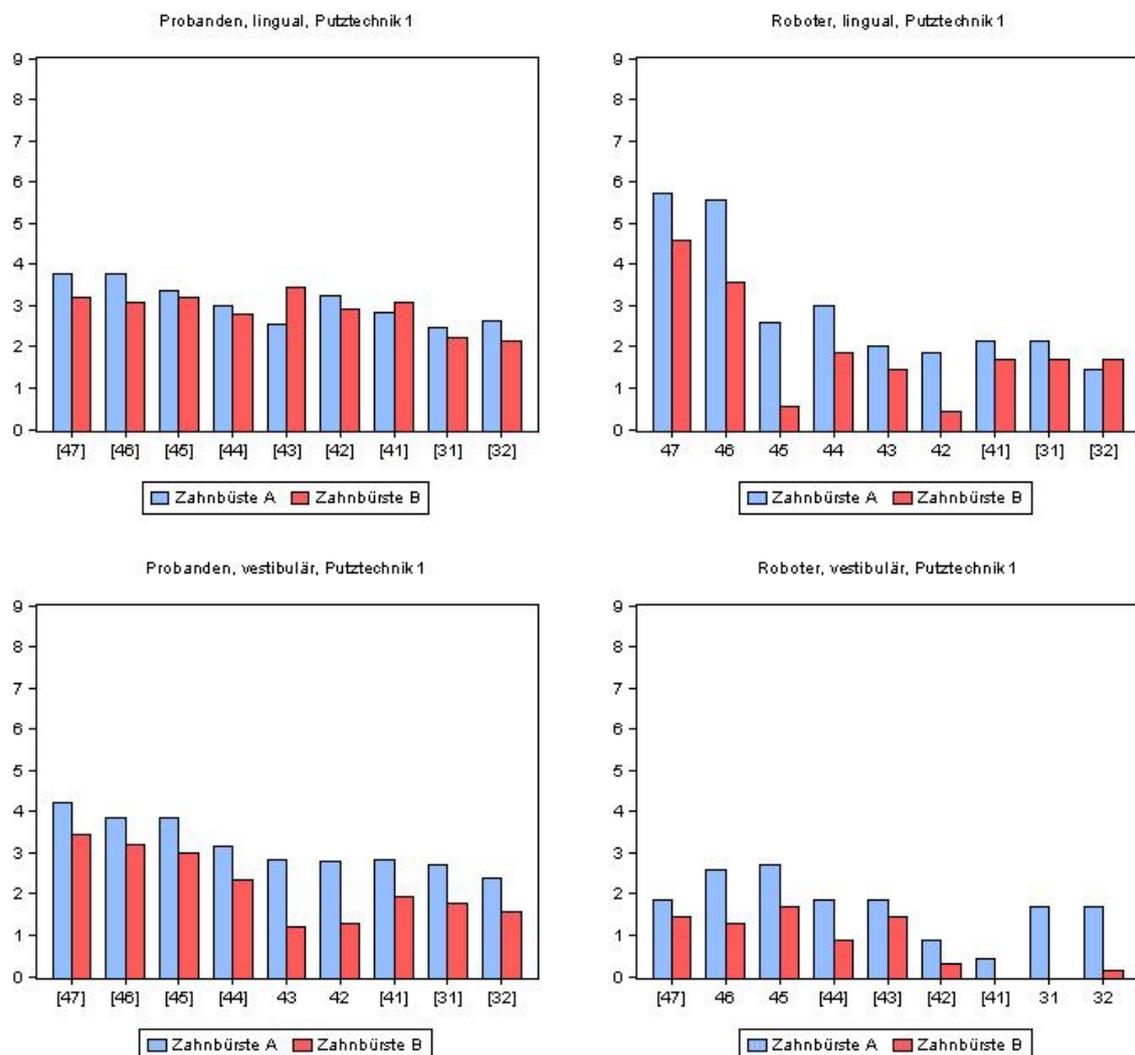


Abbildung 5.4: Vergleich Zahnbürste A und Zahnbürste B – Putztechnik 1

Erläuterungen: Anzahl nicht vollständig gereinigter Zahnfelder (Planimetrie) nach Putzen, Mittelwerte. Anzahl der Beobachtungen: Probanden, Zahnbürste A: n=13, Zahnbürste B: n=14; Roboter: n=7. Die Ziffern auf der Abszisse bezeichnen die untersuchten Zähne. Ist dieser Wert in eckige Klammern gesetzt (z.B. [47]), so bedeutet dies, dass die Nullhypothese der Gleichheit der Mittelwerte der beiden untersuchten Reihen bei einem Signifikanzniveau von 5 Prozent nicht abgelehnt werden kann (Mittelwerte sowie t-Werte für alle Vergleiche siehe Tabelle A.2 (Probanden) und Tabelle A.4 (Roboter)).

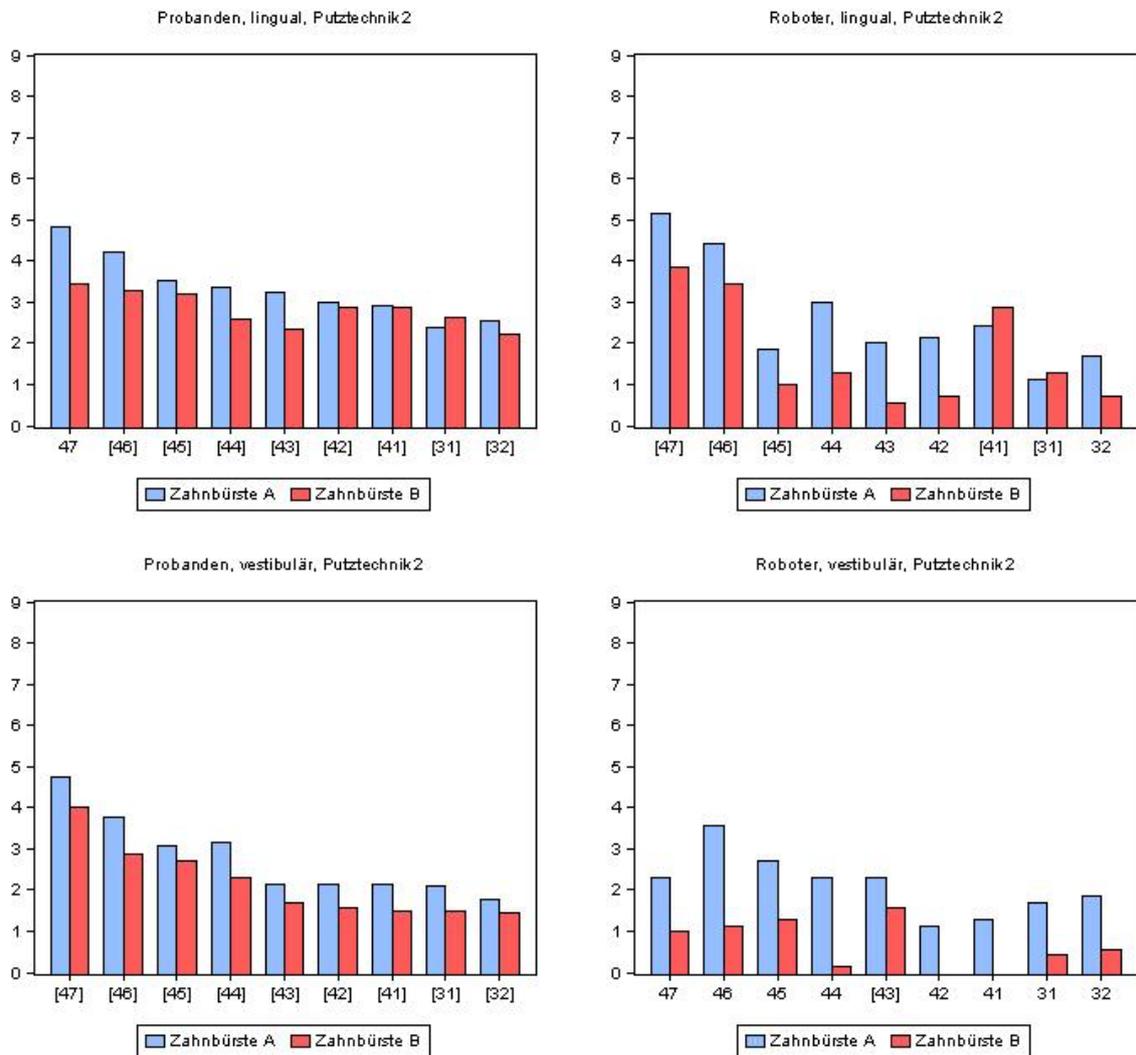


Abbildung 5.5: Vergleich Zahnbürste A und Zahnbürste B – Putztechnik 2

Erläuterungen: siehe Abbildung 5.4.

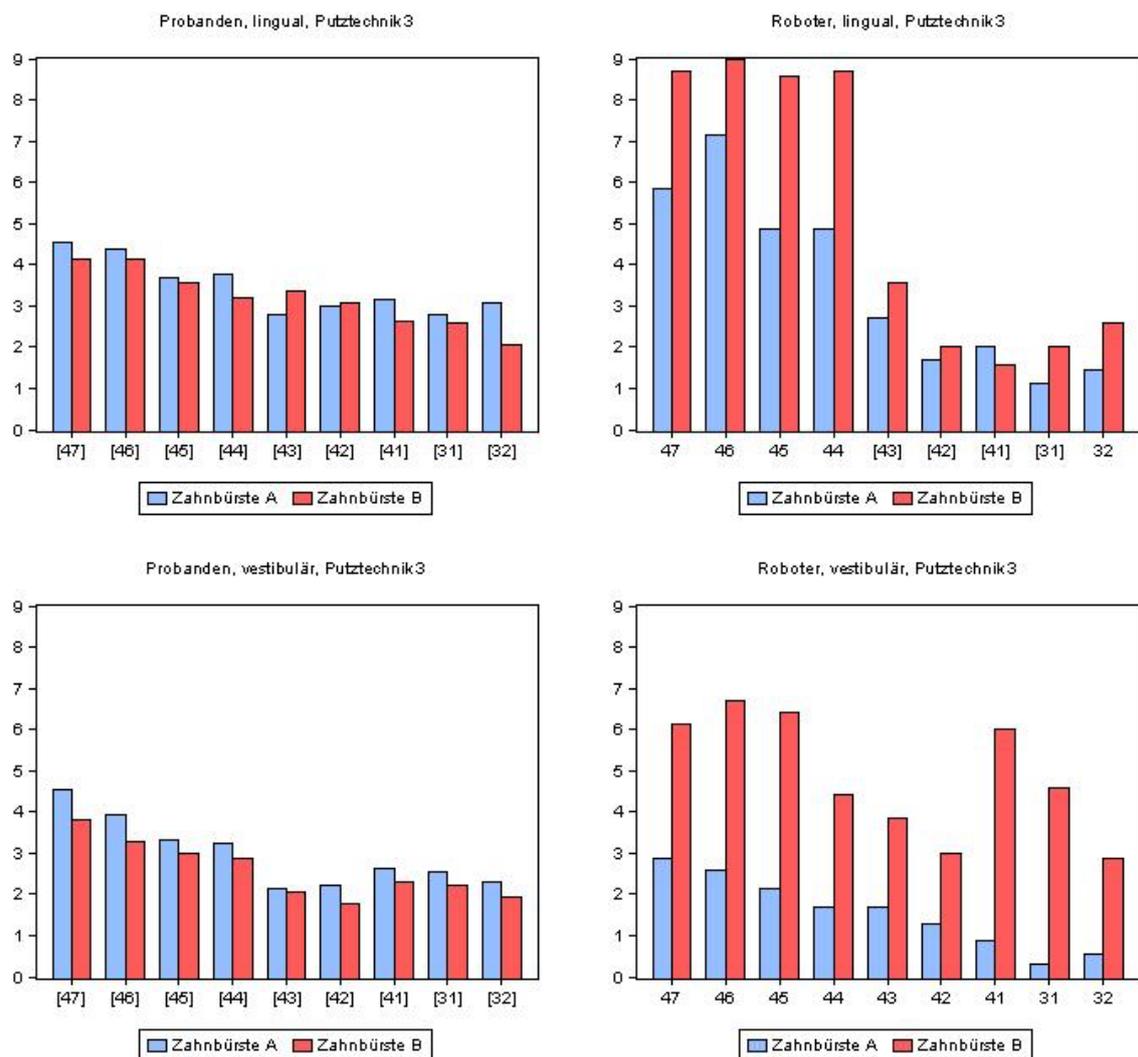


Abbildung 5.6: Vergleich Zahnbürste A und Zahnbürste B – Putztechnik 3

Erläuterungen: siehe Abbildung 4.4.

Ergebnisse:

Bei der Probandenstudie finden sich lediglich bei Putztechnik 1 zwei Zähne (42 und 43 vestibulär), bei denen die Zahnbürste B ein signifikant besseres Putzergebnis hinsichtlich der Anzahl vollständig gereinigter Zähne liefert.¹⁰ Bei allen anderen Zähnen und Putztechniken

¹⁰ Diese Untersuchung wurde für die Probandendaten auch mit einer Differenz aus dem Zustand vor dem Putzen und dem Endzustand durchgeführt. Die entsprechenden t-Werte sind im Anhang in Tabelle A.3 dokumentiert. Es zeigte sich, dass die Ergebnisse mit denen der oben gewählten Vorgehensweise übereinstimmen.

stellt man fest, dass zwar der Mittelwert von Zahnbürste B immer unterhalb des Mittelwertes von Zahnbürste A liegt (d.h., dass Zahnbürste B im Vergleich zu Zahnbürste A im Mittel mehr vollständig gereinigte Zahnflächen nach dem Putzen aufweisen kann), dass dieser Unterschied aus statistischer Sicht aber als nicht signifikant zu bewerten ist.

In der Roboterstudie fällt das Ergebnis wesentlich deutlicher aus: Die Daten zeigen ebenfalls eine Vorteilhaftigkeit der Zahnbürste B. Im Unterschied zur Probandenstudie ist sehr häufig eine Ablehnung der Nullhypothese möglich. Die Differenzen zwischen den Zahnbürsten sind statistisch signifikant. So zeigt der t-Test für Putztechnik 1 bei mehr als der Hälfte der untersuchten Zähne eine signifikante Vorteilhaftigkeit von Zahnbürste B gegenüber Zahnbürste A. Lediglich bei Putztechnik 3 kommt der Roboter aus den bereits in Abschnitt 5.1 diskutierten Gründen zu einem anderen Ergebnis.

Vergleicht man die beiden Ergebnisse, so ist festzuhalten, dass beide Untersuchungen dieselbe Tendenz hinsichtlich eines Vergleiches der Mittelwerte von Zahnbürste A und Zahnbürste B aufweisen. Während jedoch bei den Probanden eine statistisch signifikante Vorteilhaftigkeit von Zahnbürste B nicht nachweisbar ist, ist dies beim Roboter bei Putztechnik 1 und 2 der Fall.

5.3 Vergleich der Putztechnik

Bei einem Vergleich der Putztechniken bietet sich zunächst ein ähnliches Bild wie bei dem Vergleich der Zahnbürsten in Abschnitt 5.2. Während bei den Probanden ein F-Test auf Gleichheit der Mittelwerte der 3 Putztechniken zu dem Ergebnis kommt, dass sich bei allen Zähnen die Mittelwerte der 3 Putztechniken nicht signifikant voneinander unterscheiden, zeigt sich bei den Roboterdaten ein ganz anderes Bild (vgl. hierzu Abbildung 5.7 und 5.8). Dort kann nur in 3 Fällen die Nullhypothese einer Gleichheit der Mittelwerte nicht abgelehnt werden.

Allerdings liegt die Vermutung nahe, dass dieses Ergebnis stark durch die bereits beschriebenen Schwierigkeiten bei der Putztechnik 3 zustande kommt. Aus diesem Grund

wurden für die Roboterdaten zusätzlich zum F-Test paarweise t-Tests für die 3 Putztechniken durchgeführt (vgl. Tabelle A.5). Hier zeigte sich, dass auch beim Roboter für die Putztechniken 1 und 2 die Hypothese einer Gleichheit der Mittelwerte nicht abgelehnt werden kann. Nur durch den Vergleich mit Putztechnik 3 kommen die Unterschiede zustande.

Ergebnis:

Insgesamt ist festzuhalten, dass die Wahl der Putztechnik weder bei Probanden noch in der Roboterstudie einen signifikanten Einfluss auf den Putzerfolg (gemessen als Anzahl vollständig gereinigter Zahnflächen pro Zahn) hat.

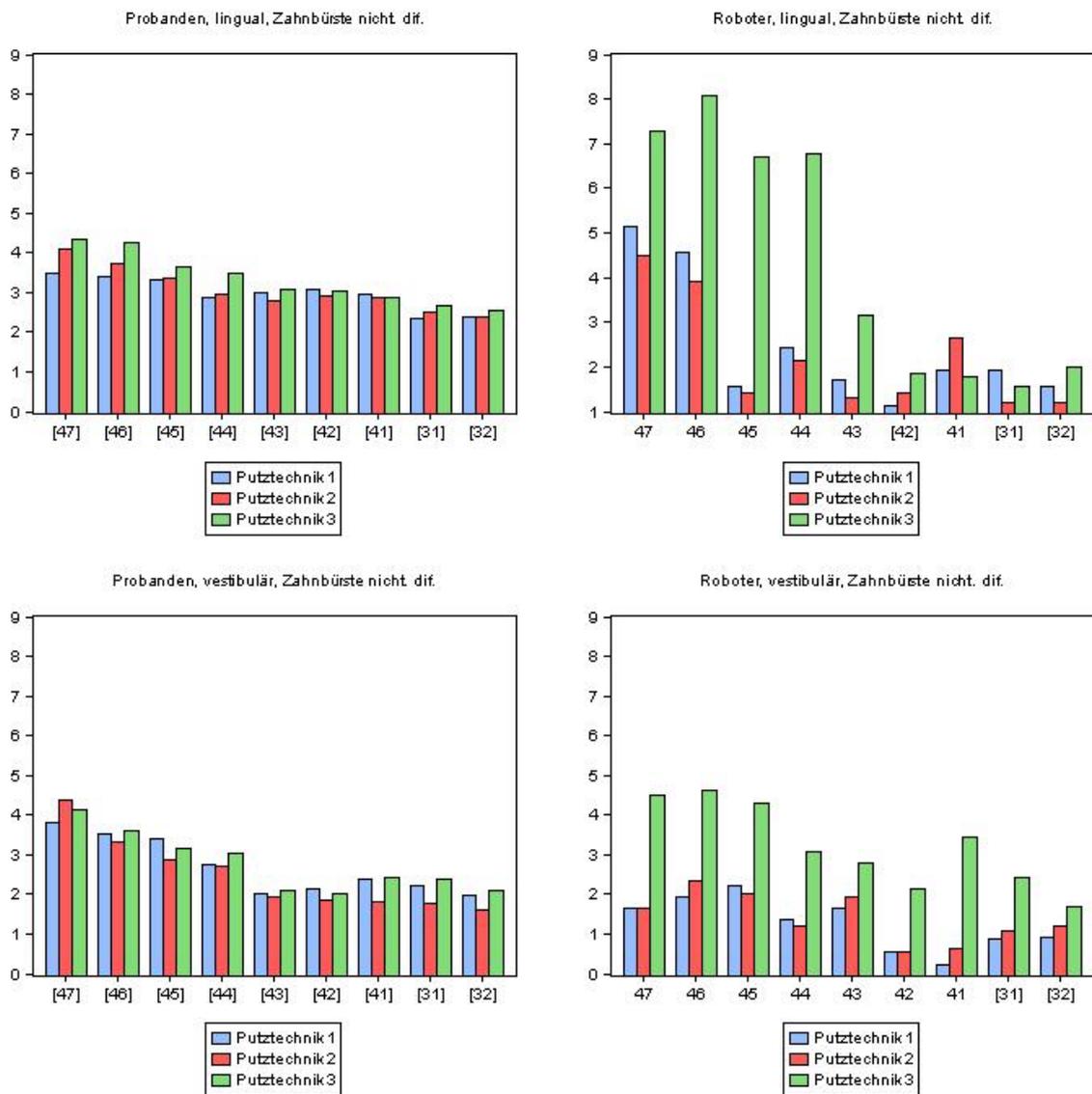


Abbildung 5.7: Vergleich Putztechnik 1 bis 3

Erläuterungen: Anzahl nicht vollständig gereinigter Zahnfelder (Planimetrie) nach Putzen, Mittelwerte. Anzahl der Beobachtungen: Probanden: n=27, Roboter: n=14. Die Ziffern auf der Abszisse bezeichnen die untersuchten Zähne. Ist dieser Wert in eckige Klammern gesetzt (z.B. [47]), so bedeutet dies, dass die Nullhypothese der Gleichheit der Mittelwerte der drei untersuchten Reihen bei einem Signifikanzniveau von 5 Prozent nicht abgelehnt werden kann (F-Werte für alle Vergleiche sowie die t-Werte der paarweisen Tests mit den Roboterdaten siehe Tabelle A.5).

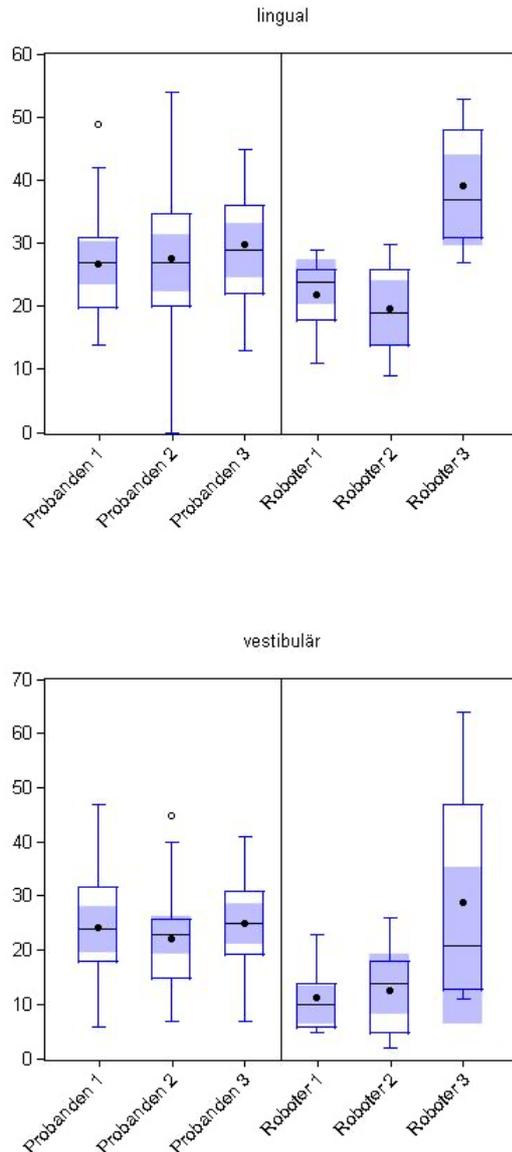


Abbildung 5.8: Vergleich Putztechnik 1 bis 3 für die Gesamtheit der untersuchten Zähne (47 bis 32)

Erläuterungen: Anzahl nicht vollständig gereinigter Zahnfelder (Planimetrie) nach Putzen, Mittelwerte. Anzahl der Beobachtungen: Probanden: n=27, Roboter: n=14. Erläuterungen zu den Box-Plot-Diagrammen siehe Abbildung 4.3.

5.4 Die Bedeutung des Zahnfleischsaumes für die Qualität des Robotermodells

Es wird die Hypothese untersucht, ob die Übereinstimmung der Probandenstudie und der Roboterdaten positiv beeinflusst werden kann, wenn die Daten aus den beiden Studien um die kritischen Bereiche des Zahnfleischsaumes (Bereich A, B und C des Planimetrie-Schemas) korrigiert werden.

Abbildung 5.9 zeigt die Mittelwerte von Probanden und Roboter für die einzelnen Zähne ohne Einbeziehung des Zahnfleischsaumes.¹¹

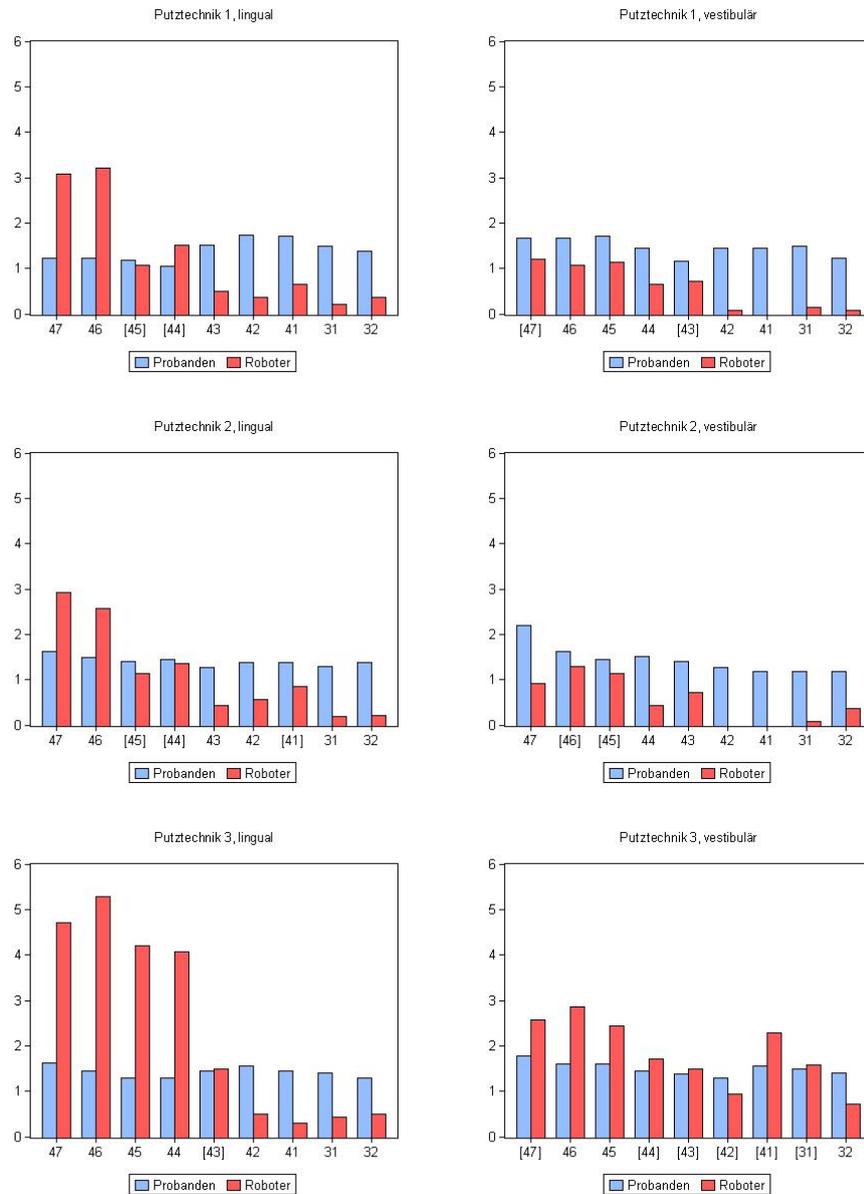


Abbildung 5.9: Anzahl nicht vollständig gereinigter Zahnfelder (Planimetrie) nach Putzen ohne Zahnfleischsaum (Bereich A, B und C)

Erläuterungen: Anzahl nicht vollständig gereinigter Zahnfelder (Planimetrie) nach Putzen, Mittelwerte. Anzahl der Beobachtungen: Probanden: n=27, Roboter: n=14. Keine Differenzierung nach der verwendeten Zahnbürste. Die Ziffern auf der Abszisse bezeichnen die untersuchten Zähne. Ist dieser Wert in eckige Klammern gesetzt (z.B. [47]), so bedeutet dies, dass die Nullhypothese der Gleichheit der Mittelwerte der beiden untersuchten Reihen bei einem Signifikanzniveau von 5 Prozent nicht abgelehnt werden kann (Mittelwerte sowie t-Werte für alle Vergleiche siehe Tabelle A.6).

¹¹ Die maximale Anzahl nicht vollständig gereinigter Zähne beträgt nun 6, da die Bereiche A, B und C herausgerechnet wurden.

Bei einem Vergleich mit der Abbildung 4.1 zeigt sich, dass es durch die Korrektur um den Zahnfleischsaum nicht gelingt, die Übereinstimmung der Daten aus Probanden- und Roboterstudie zu erhöhen. Die Zahl der Zähne, für die eine Übereinstimmung der Mittelwerte aus den beiden Datenbasen diagnostiziert werden kann, hat sich nicht erhöht. Der Roboter hinterlässt auch ohne Betrachtung des Zahnfleischsaumes deutlich weniger Zahnfelder, die nicht vollständig gereinigt sind, als die Probanden dies tun. Ausnahme hiervon sind immer noch die Zähne 47 und 46, lingual sowie der kritische Befund aus Putztechnik 3 bei der Roboterstudie.

Ergebnis:

Eine mögliche Erweiterung des Putzrobotermodells um einen Zahnfleischsaum trägt nach den vorliegenden Daten nicht dazu bei, die Übereinstimmung zwischen den Putzerfolgen von Probanden und Roboter zu verbessern. Nach Datenlage kann auf eine solche Erweiterung verzichtet werden.

5.5 Untersuchung der Differenzen zwischen Probandenstudie und Roboterdaten

Die Abbildungen 4.1, 4.4 und 4.5 zeigen bereits, dass der Putzroboter in der Regel ein besseres Putzergebnis liefert als die Probanden.¹² Ein Vorzeichen-Rangtest nach WILCOXON¹³ für die Differenz zwischen dem jeweiligen Mittelwert aus der Probandenstudie und dem des entsprechenden Roboterdurchlaufes bestätigt dies ebenfalls.

¹² Aufgrund der bereits aufgezeigten Schwierigkeiten bei der Putztechnik 3 werden in diesem Abschnitt lediglich die Daten der Durchläufe von Putztechnik 1 und 2 verwendet.

¹³ Vgl. RINNE (2003, S. 531).

Tabelle 5.2: WILCOXON's Vorzeichen-Rangtest für die Differenz der Mittelwerte aus Probanden- und Roboterstudie

Putztechnik	lingual/ vestibulär	Zahnbürste	W_n^{\neq}
1	lingual	A	28
		B	37 (**)
2	lingual	A	42 (***)
		B	40 (**)
1	vestibulär	A	45 (***)
		B	44 (**)
2	vestibulär	A	42 (**)
		B	45 (***)

Erläuterungen: Stichprobenumfang: n=9. (**) bzw. (***) die Nullhypothese einer symmetrischen Verteilung der Differenz um den Nullpunkt kann bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von höchstens 5 bzw. 1 % abgelehnt werden. Gegenhypothese bei diesem Test ist eine positive Abweichung vom Nullpunkt. Kritische Werte vgl. RINNE (2003, S. 752).

Es besteht, bis auf Putztechnik1, Zahnbürste A im lingualen Bereich, eine signifikant positive Differenz zwischen Probanden und Roboter.¹⁴ Die Probanden hinterlassen signifikant mehr Zahnfelder, die nicht vollständig gereinigt sind als der Roboter. Die Abbildungen 4.10 und 4.11 zeigen die Differenzen zwischen Probanden und Roboter für die einzelnen Klassifikationen, nach lingualem und vestibulärem Bereich differenziert:

¹⁴Das Ergebnis für Putztechnik 1, Zahnbürste A im lingualen Bereich ist auf das Testdesign des WILCOXON-Tests zurückzuführen: Es besteht nur bei den Zähnen 47 und 46 eine negative Differenz, die aber betragsmäßig höher ausfällt als die positiven Differenzen bei den anderen Zähnen. Der WILCOXON-Test gewichtet über die Rangvergabe diese hohen Abweichungen stärker als betragsmäßig geringere Differenzen.

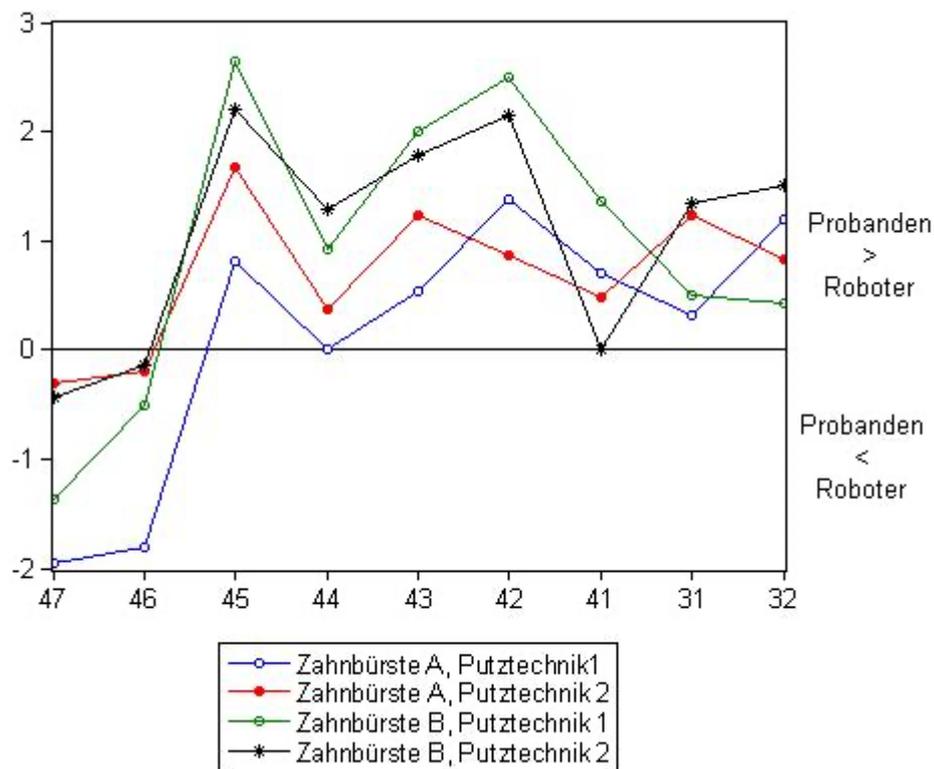


Abbildung 5.10: Differenzen zwischen Probanden- und Roboterdaten – lingual

Erläuterungen: Differenz der Anzahl nicht vollständig gereinigter Zahnfelder (Planimetrie) nach Putzen bei Probanden und Roboter, Mittelwerte. Anzahl der Beobachtungen: Probanden, Zahnbürste A: n=13, Zahnbürste B: n=14; Roboter: n=7. Die Ziffern auf der Abszisse bezeichnen die untersuchten Zähne. Ein Wert oberhalb der Nulllinie bedeutet, dass die Probanden nach dem Putzen mehr nicht vollständig gereinigte Zahnfelder aufweisen als der Roboter (Mittelwerte zur Berechnung der Differenzen vgl. Tabelle A.2 (Probanden) und A.4 (Roboter)).

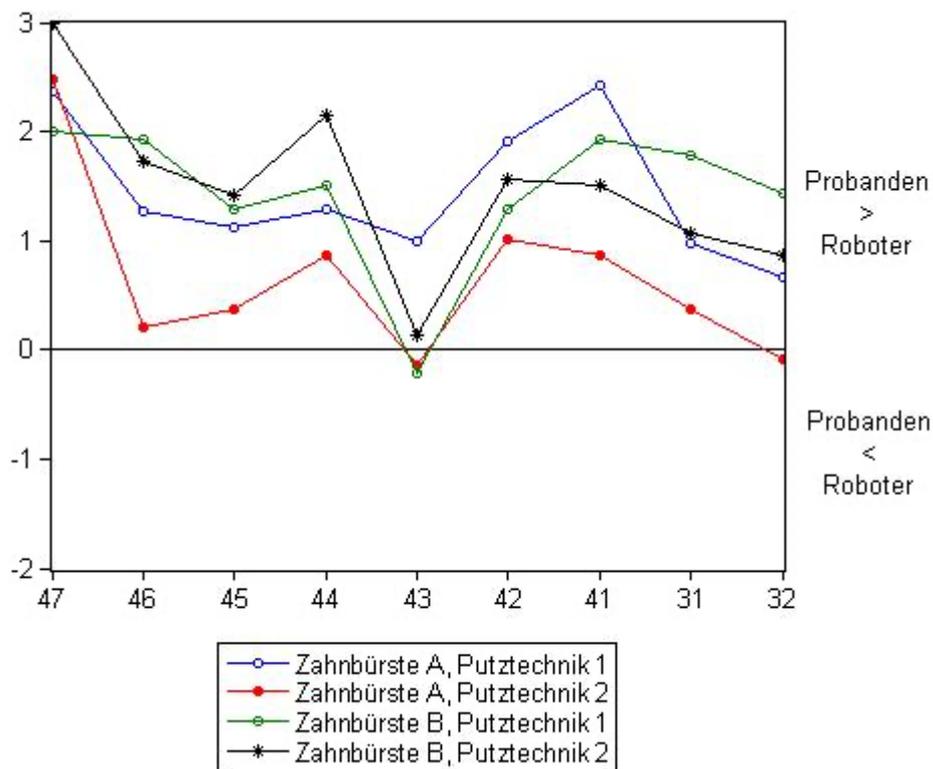


Abbildung 5.11: Differenzen zwischen Probanden- und Roboterdaten – vestibulär

Erläuterungen: siehe Abbildung 4.10.

Es ist erkennbar, dass es ein bestimmtes Muster für die Abweichungen des Roboters von den Probandendaten gibt, welches für die verschiedenen Putztechniken und Zahnbürsten relativ konstant aussieht: Im lingualen Bereich sind es die Zähne 47 und 46, die als einzige eine negative Differenz aufweisen. Hier ist der Putzerfolg des Roboters geringer als derjenige der Probanden. Bei den Zähnen 45, 44 und 42 weicht die Putzleistung des Roboters im Mittel um mehr als eine Zahnfläche positiv von der Putzleistung der Probanden ab. Relativ gering sind die Abweichungen bei den Zähnen 44, 41, 31 und 32 im lingualen Bereich.

Auch im vestibulären Bereich gibt es starke Abweichungen beim Zahn 47, allerdings gegensätzlich zum Befund im lingualen Bereich: Der Roboter weist hier zwischen 2 und 3 nicht vollständig gereinigter Zahnflächen auf als die Probanden. Schon für Zahn 46 und 45 reduziert sich diese Differenz im Mittel auf wenig mehr als eine Zahnfläche. Sehr gut stimmen Roboter und Probanden bei den Zähnen 43 und 32 überein. Für den Rest der Zähne

befindet sich die mittlere Abweichung zwischen 1 und 2 Zahnflächen. Im gesamten vestibulären Bereich hinterlässt der Roboter weniger Zähne, die nicht vollständig gereinigt sind als die Probanden.

Dieses Bild legt den Verdacht nahe, dass der Putzroboter in der Regel zwar ein abweichendes Ergebnis hinsichtlich der Intensität der Reinigungsleistung zeigt, dass diese Abweichungen zwischen Roboter und Probanden aber einer festen Systematik folgen. Um diese Hypothese testen zu können, wurde mit Hilfe des Rangkorrelationskoeffizienten von SPEARMAN¹⁵ überprüft, ob die Datenreihen der Differenzen zwischen Probanden und Roboter innerhalb des lingualen bzw. des vestibulären Bereiches miteinander verbunden sind. Die Nullhypothese lautet „Die beiden untersuchten Reihen hängen nicht monoton voneinander ab“. Sie wird gegen die Alternative einer gleichläufigen Verbundenheit der jeweiligen Datenreihen getestet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5.3 (lingualer Bereich) und 5.4 (vestibulärer Bereich) zusammengefasst.

Tabelle 5.3: SPEARMAN's Rangkorrelationstest für die Differenzen der Mittelwerte aus Probanden- und Roboterstudie – lingualer Bereich

Zahnbürste Putztechnik	A 1	A 2	B 1	B 2
A 1	1			
A 2	0,6167 (2,07*)	1		
B 1	0,6833 (2,48**)	0,7333 (2,85**)	1	
B 2	0,800 (3,53***)	0,8667 (4,60***)	0,8333 (3,99***)	1

Erläuterungen: Stichprobenumfang:n=9. (*), (**) bzw. (***): die Nullhypothese einer Unverbundenheit der untersuchten Reihen kann bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von höchstens 10, 5 bzw. 1 % abgelehnt werden. Gegenhypothese bei diesem Test ist eine gleichläufige Verbundenheit der Datenreihen. Für $n < 20$ ist der Testwert $r_{SP} \sqrt{n-2} / \sqrt{1-r_{SP}^2}$ /approximativ t-verteilt mit (n-2) Freiheitsgraden. Kritische Werte vgl. RINNE (2003, S. 758 f).

¹⁵ Vgl. RINNE (2003, S. 559 ff.).

Tabelle 5.4: SPEARMAN's Rangkorrelationstest für die Differenzen der Mittelwerte aus Probanden- und Roboterstudie – vestibulärer Bereich

Zahnbürste Putztechnik	A 1	A 2	B 1	B 2
A 1	1			
A 2	0,7983 (3,51***)	1		
B 1	0,4833 (1,46)	0,4538 (1,34)	1	
B 2	0,7333 (2,85**)	0,7731 (3,23***)	0,600 (1,98*)	1

Erläuterungen: siehe Tabelle 4.3.

Die Testwerte bestätigen den Eindruck, den die Abbildungen 5.10 und 5.11 hinterlassen. Mit Ausnahme der Putztechnik 1, Zahnbürste B im vestibulären Bereich, bestätigt sich für alle untersuchten Reihen eine hohe Korrelation. Die Abbildung 5.12 fasst die Abbildungen 5.10 und 5.11 zu einer gemeinsamen Grafik für alle untersuchten Zahnbürsten und Putztechniken zusammen, differenziert nach lingualem und vestibulärem Bereich, und bildet so die festgestellte Systematik ab.

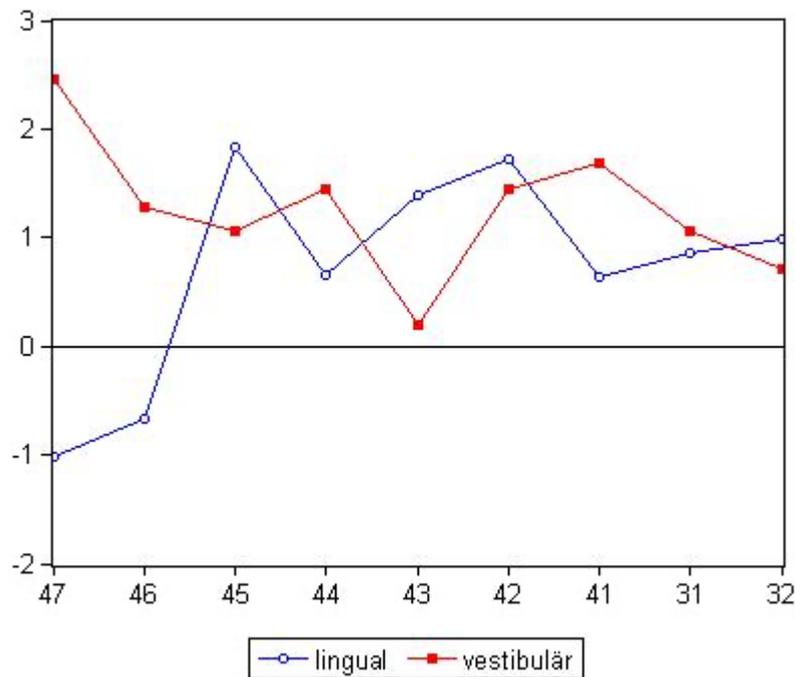


Abbildung 5.12: Differenzen zwischen Probanden- und Roboterdaten

Erläuterungen: Differenz der Anzahl nicht vollständig gereinigter Zahnfelder (Planimetrie) nach Putzen bei Probanden und Roboter, Mittelwerte. Anzahl der Beobachtungen: Probanden, Zahnbürste A: n=13, Zahnbürste B: n=14; Roboter: n=7. Die Ziffern auf der Abszisse bezeichnen die untersuchten Zähne. Ein Wert oberhalb der Nulllinie bedeutet, dass der Roboter nach dem Putzen mehr vollständig gereinigte Zahnfelder aufweist als die Probanden.

Ein Ergebnis der Untersuchungen aus Abschnitt 5.1 war es, dass Probanden im vestibulären und lingualen Bereich annähernd gleich gut putzen, während der Roboter starke Unterschiede zwischen den beiden Bereichen aufweist.¹⁶ Die Abbildung 5.12 macht deutlich, dass auch dieser Befund ausschließlich im Putzverhalten des Roboters bei den Zähnen 47 und 46 begründet liegt. Bei allen anderen Zähnen gibt es nur geringe Abweichungen zwischen den Differenzen im vestibulären und im lingualen Bereich.

Ergebnis:

Die Untersuchungen dieses Abschnittes haben gezeigt, dass eine Systematik der Abweichungen zwischen dem Putzerfolg von Probanden und Roboter besteht. Bis auf die Zähne 47 und 46 liefert der Putzroboter einen höheren Putzerfolg, er folgt dabei jedoch einem

¹⁶ Vgl. auch Tabelle 4.1.

konstanten Muster. Erweist sich beispielsweise eine Zahnbürste oder Putztechnik innerhalb der Probanden als überlegen, so wird dies mit hoher statistischer Wahrscheinlichkeit auch vom Putzroboter angezeigt.

6 Vergleich mit den übliche Roboterdaten

Das übliche Verfahren zur Auswertung der Roboterergebnisse misst den prozentualen Anteil noch plaque-behafteter Zahnfläche an der gesamten untersuchten Zahnfläche. Im Gegensatz zur Planimetrie, die lediglich eine Aussage darüber liefert, wie groß der Anteil der Zahnfelder ist, die nicht vollständig gereinigt wurden, zeigt dieser Wert tatsächlich an, wie viel Prozent der untersuchten Zahnfläche nach dem Putzen sauber ist und an welchem Prozentsatz der untersuchten Zahnfläche noch Plaque anhaftet. Die Daten aus der üblichen Analyse liegen nicht für die einzelnen Zähne vor, sondern für 3 Zahnabschnitte, die wie folgt abgegrenzt sind:

- Abschnitt 1: die Zähne 31, 32, 41, 42
- Abschnitt 2: die Zähne 43, 44 und 45
- Abschnitt 3: die Zähne 46, 47 und 48.¹⁷

6.1 Aufbereitung der erhobenen Daten

In der üblichen Roboterstudie wird der Anteil verbliebener Plaque für 4 Bereiche des Zahnes erfasst: lingual, bukkal, mesial und distal. Um einen Vergleich mit den Planimetriedaten durchführen zu können, wird in der Untersuchung die Hypothese aufgestellt, dass sich der mesiale und der distale Bereich zu gleichen Teilen dem lingualen und dem vestibulären Bereich zuordnen lassen. Die so errechneten „Verschmutzungsgrade“ finden sich in Tabelle A.7.a und A.7.b im Anhang.

Es liegen für jede Zahnbürste und jede Putztechnik 7 Beobachtungen vor, und zwar jeweils für den lingualen und den vestibulären Bereich. Diese Beobachtungen wurden zunächst auf potentielle Ausreißer getestet. Ausreißer sind Extremwerte (Maximum bzw. Minimum), die sehr weit vom Durchschnitt der Beobachtungen entfernt liegen. Von ihnen nimmt man an, dass sie mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht aus derselben Verteilung stammen wie der Rest der Stichprobe. Erst wenn ein Test die Extremwerte als Ausreißer identifiziert, müssen sie aus

¹⁷In der Planimetrie wurde der Zahn 48 nicht einbezogen. Bei der Umrechnung in Anteile wurde dies entsprechend berücksichtigt.

der Datenbasis entfernt werden. Es wurde der GRUBBS-Test verwendet.¹⁸ Die zur Berechnung der Testwerte notwendigen Daten sind in Tabelle A.8 des Anhangs ausgewiesen, die Tabelle 6.1 zeigt die Ergebnisse.

Tabelle 6.1: GRUBBS-Ausreißertest für die üblichen Roboterdaten

Putztechnik 1			Putztechnik 2			Putztechnik 3		
Abs 1	Abs 2	Abs 3	Abs 1	Abs 2	Abs 3	Abs 1	Abs 2	Abs 3
lingual, Zahnbürste A								
1,25	1,63	1,20	1,54	1,50	1,28	1,31	1,76	2,11(**)
lingual, Zahnbürste B								
1,91	1,35	1,31	1,23	0,94	0,98	1,16	1,57	1,23
vestibulär, Zahnbürste A								
1,01	0,98	0,83	1,40	1,01	1,78	1,23	1,49	1,26
vestibulär, Zahnbürste B								
1,45	0,90	0,55	0,88	1,03	1,14	1,46	0,88	1,44

Erläuterungen: Stichprobenumfang: n=7. (**) bzw. (***) : Die Nullhypothese „Der größte oder kleinste Stichprobenwert ist kein Ausreißer“ kann bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von höchstens 5 bzw. 1 % abgelehnt werden. Gegenhypothese bei diesem Test ist die Existenz eines Ausreißers. Kritische Werte vgl. RINNE (2003, S. 549).

Lediglich bei Putztechnik 3 im Abschnitt 3 des lingualen Bereiches kann die Nullhypothese, dass keine Ausreißer in der Stichprobe vorhanden sind, abgelehnt werden. Diese Reihe weist einen Mittelwert von 52,38, ein Minimum von 42,79 und ein Maximum von 57,47 aus. Es wird derjenige Extremwert aus der Stichprobe entfernt, der den größten Abstand zum Mittelwert aufweist, in diesem Fall der Minimalwert von 42,79. Neuer Minimalwert ist ein Wert von 52,24.¹⁹ Für alle anderen Reihen gilt n=7.

Die Daten aus der Probanden- und Roboterstudie nach Planimetrie aus dem vorherigen Teil der Untersuchung wurden analog zu 3 Zahnabschnitten zusammengefasst und als prozentuale Daten ausgewiesen. Die einzelnen Werte finden sich, differenziert nach der verwendeten Zahnbürste, im Anhang in den Tabellen A.10 und A.11. Ein Vergleich dieser Daten mit den Daten des üblichen Roboterfahrens ist allerdings nur in sehr eingeschränktem Maße möglich.

¹⁸Vgl. RINNE (2003, S. 548 f.). Eine umfassende Diskussion alternativer Tests auf Ausreißer findet sich bei RINNE (2003, S. 545 ff.).

¹⁹Diese Reihe verfügt nun im Gegensatz zu allen anderen Datenreihen nur über 6 Beobachtungen. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird dieser Umstand in den folgenden Ausführungen nicht ständig erwähnt, sondern es wird allgemein von n=7 gesprochen.

6.2 Vergleich der üblichen Roboterdaten mit den Daten aus der Planimetrie

Während die Planimetriedaten den prozentualen Anteil nicht vollständig gereinigter Zahnfelder des betreffenden Abschnittes ausweisen, nennen die Werte der üblichen Auswertung den tatsächlichen Anteil verbleibender Plaque für den Abschnitt. Diese beiden Werte stehen in keiner stabilen Beziehung zueinander. Je nach verwendeter Zahnbürste und Putztechnik sind zum Beispiel Kombinationen eines hohen Prozentsatzes nicht vollständig gereinigter Zähne bei gleichzeitig geringem Gesamtbefall als auch das genaue Gegenteil denkbar. Aus diesem Grund wird auf einen direkten Vergleich verzichtet.

Analog zum Vergleich in Abschnitt 4.2 zeigen die folgenden Abbildungen den Vergleich der Zahnbürsten A und B in der Probanden- und der Roboterstudie nach Planimetrie sowie der Roboterstudie in der üblichen Auswertung. Es werden für die Planimetrie die Mittelwerte des prozentualen Anteils nicht vollständig gereinigter Zahnflächen pro Zahnabschnitt abgebildet. In der üblichen Auswertung zeigt die Abbildung den Mittelwert des prozentualen Anteils der nicht gereinigten Fläche des Zahnabschnittes. Je geringer diese Zahl, umso höher ist die erzielte Reinigungsleistung der untersuchten Zahnbürste. Ein Vergleich findet innerhalb der jeweiligen Stichprobe zwischen den Zahnbürsten statt. Eine eckige Klammer zeigt an, dass sich der Putzerfolg von Zahnbürste A nicht signifikant von der Reinigungsleistung der Zahnbürste B unterscheidet, beide Zahnbürsten also gleich gut reinigen.

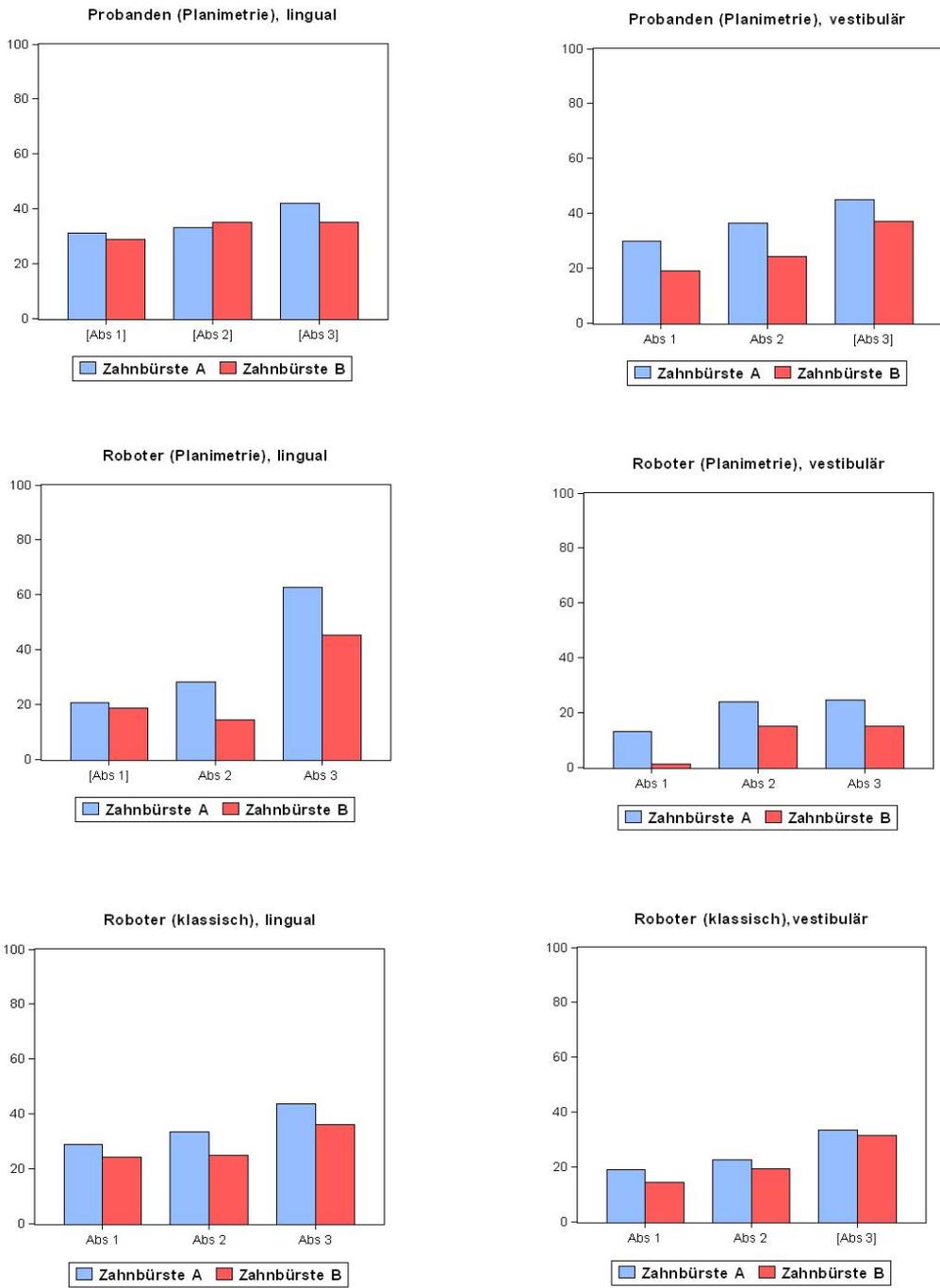


Abbildung 6.1: Vergleich Zahnbürste A und Zahnbürste B – Putztechnik 1

Erläuterungen: Prozentualer Anteil nicht vollständig gereinigter Zahnfelder (Planimetrie) nach Putzen, Prozentualer Anteil nicht gereinigter Fläche (übliches Verfahren) nach Putzen, Mittelwerte. Anzahl der Beobachtungen: Probanden, Zahnbürste A: n=13, Zahnbürste B: n=14; Roboter: n=7. Die Ziffern auf der Abszisse bezeichnen die untersuchten Zahnabschnitte. Ist dieser Wert in eckige Klammern gesetzt, so bedeutet dies, dass die Nullhypothese der Gleichheit der Mittelwerte der beiden untersuchten Reihen bei einem Signifikanzniveau von 5 Prozent nicht abgelehnt werden kann (Mittelwerte sowie t-Werte für alle Vergleiche siehe Tabellen A.9 bis A.11).

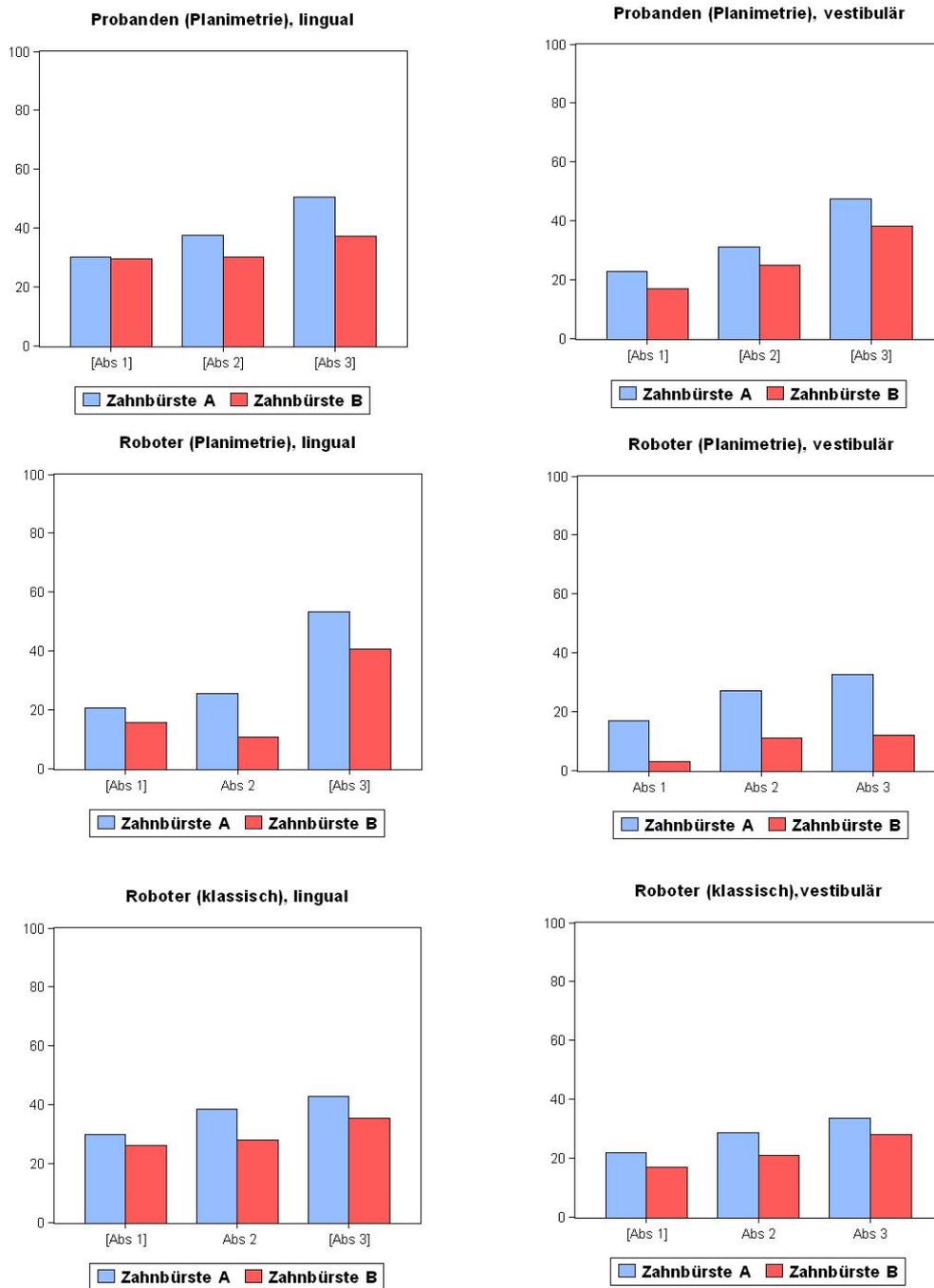


Abbildung 6.2: Vergleich Zahnbürste A und Zahnbürste B – Putztechnik 2

Erläuterungen: siehe Abbildung 6.1.

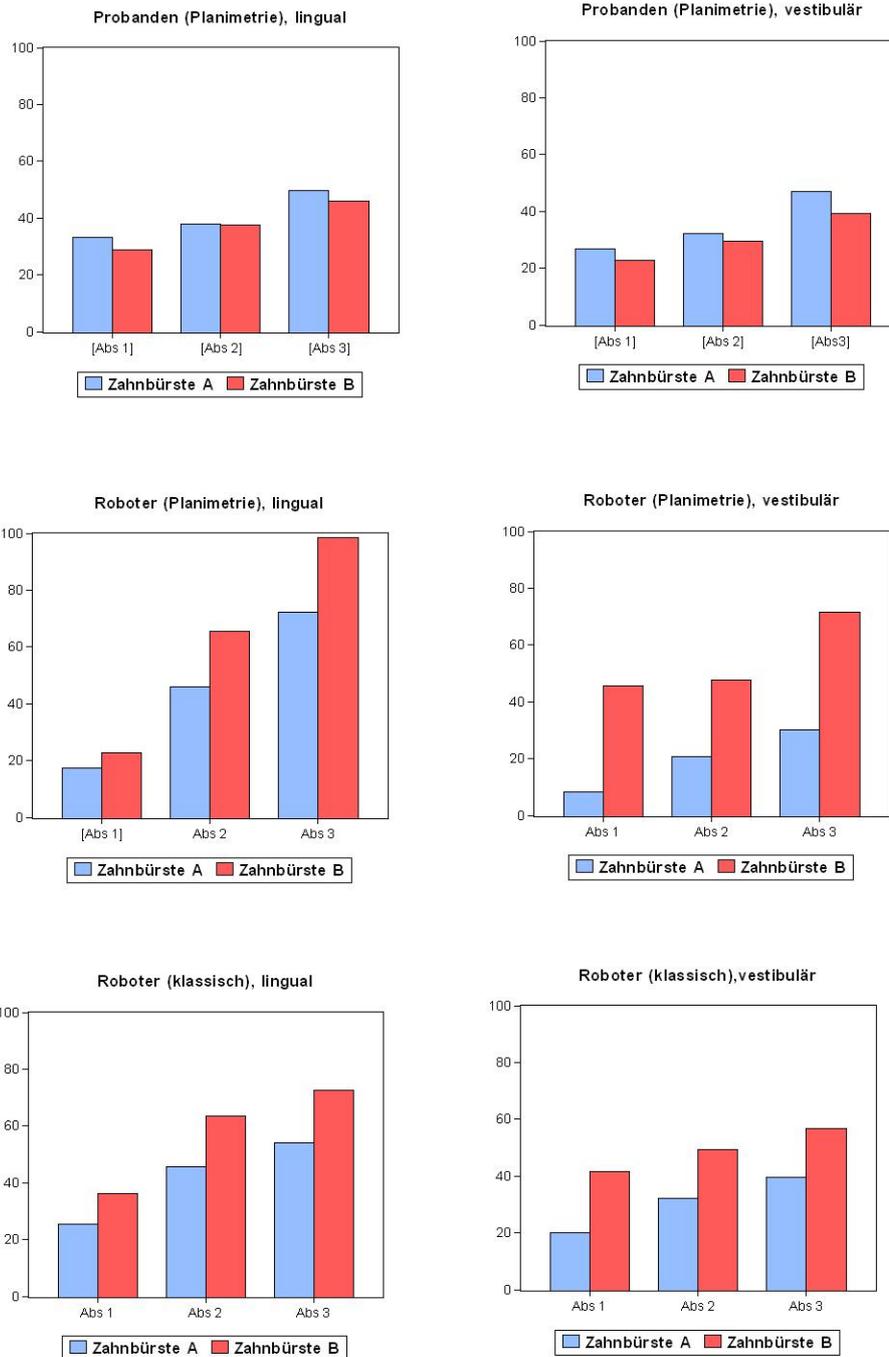


Abbildung 6.3: Vergleich Zahnbürste A und Zahnbürste B – Putztechnik 3

Erläuterungen: siehe Abbildung 6.1.

Trotz ihrer unterschiedlichen Definition kommen die Vergleiche der Zahnbürsten in der üblichen Roboterstudie und in der Auswertung der Roboterdaten nach Planimetrie zu vergleichbaren Aussagen hinsichtlich der Reinigungseffizienz: Bei Putztechnik 1 und 2 ist der Reinigungserfolg von Zahnbürste B höher, in 9 (Planimetrie) bzw. 8 (übliches Verfahren) von

12 Zahnabschnitten²⁰ ist der Unterschied signifikant. Bei den Probanden ist der Putzerfolg von Zahnbürste B ebenfalls höher, jedoch nur bei 2 von 12 Zahnabschnitten in signifikanter Höhe. Bei Putztechnik 3 kommen sowohl übliches Verfahren als auch Planimetrie in der Roboterstudie zu einer Überlegenheit von Zahnbürste A. Die Probandenstudie weist hingegen, wie bei Putztechnik 1 und 2, nicht signifikante Unterschiede zwischen Zahnbürste A und B aus.

Ergebnis:

Die Auswertung der Roboterdaten führt bei beiden verwendeten Verfahren zu ähnlichen Ergebnissen: Bei Putztechnik 1 und 2 ist die Zahnbürste B der Zahnbürste A überlegen, bei Putztechnik 3 scheint es umgekehrt zu sein.

6.3 Möglichkeiten und Defizite der durchgeführten Untersuchung

Anhand der problematischen Putztechnik 3²¹ lässt sich sehr gut zeigen, wie wichtig – trotz der Unmöglichkeit eines direkten Vergleiches – die Gegenüberstellung der 3 Untersuchungen ist:

- Hätte man lediglich die übliche Roboterstudie durchgeführt, so käme man zu dem Ergebnis, dass die Zahnbürste B der Zahnbürste A bei der Putztechnik 3 deutlich unterlegen ist. Dies trifft zwar auf die Roboterstudie zu, jedoch zeigt die Probandenstudie, dass es bei den Versuchspersonen keinen signifikanten Unterschied zwischen den verwendeten Zahnbürsten hinsichtlich ihrer Reinigungseffizienz gibt.
- Ohne Auswertung der Roboterstudie nach Planimetrie ist es unmöglich zu beurteilen, ob die unterschiedlichen Ergebnisse auf den Vergleich von Roboter- und Probandendaten oder auf die unterschiedlichen verwendeten Messtechniken zurückzuführen sind. Erst durch die Auswertung der Roboterdaten nach Planimetrie erkennt man, dass die Unterschiede zwischen Probanden und Roboter auch bei Verwendung derselben Messtechnik weiter bestehen.

²⁰ 3 Abschnitte pro Putztechnik, 2 Putztechniken, jeweils vestibulär und lingual betrachtet.

²¹ Vgl. hierzu Teil 2.1 der vorliegenden Untersuchung.

An den Abbildungen 5.1 bis 5.3 werden die Defizite einer abschnittsweise Betrachtung im Vergleich zu einer Analyse der einzelnen Zähne deutlich: Bei Putztechnik 1 im vestibulären Bereich führt beispielsweise die abschnittsweise Betrachtung bei den Probanden zu dem Ergebnis, dass lediglich in Abschnitt 3 die Zahnbürste A der Zahnbürste B nicht signifikant unterlegen ist. Für Abschnitt 1 und 2 weist der t-Test hingegen eine signifikante Vorteilhaftigkeit der Zahnbürste B aus (vgl. Abbildung 5.1 oben rechts). Die Analyse der einzelnen Zähne zeigt allerdings, dass es lediglich die Zähne 42 und 43 sind, bei denen der Putzerfolg der Zahnbürste B signifikant höher ist. Bei den anderen 7 untersuchten Zähnen sind die Unterschiede insignifikant (vgl. Abbildung 4.4 unten links).

Mit der Abbildung 5.4 wurde eine Grafik angefertigt, die analog zur Abbildung 4.12 die Differenzen zwischen Probanden- und Roboterstudie abbildet, sich aber auf die 3 Zahnabschnitte beschränkt. Für den Zahnabschnitt 3 erkennt man einen starken Unterschied zwischen vestibulärem und lingualem Bereich, der im Gegensatz zum Befund in den folgenden Zahnabschnitten steht. Die zahnweise Betrachtung von 47 und 46 zeigt aber zusätzlich, dass

- im lingualem Bereich beide Zähne eine ähnlich starke negative Differenz zwischen Probanden und Roboter aufweisen, während
- im vestibulären Bereich der Abstand zwischen Roboter und Probanden schon bei Zahn 46 nur noch halb so groß ist wie bei Zahn 47. Hier müsste lediglich Zahn 47 als „Sorgenkind“ eingestuft werden und nicht der gesamte Abschnitt.

Weitere Beispiele lassen sich für alle Zahnabschnitte finden. Da die abschnittsweise Betrachtung extreme Unterschiede innerhalb eines betrachteten Abschnitts nivelliert, gehen wichtige Befunde unter. Fazit ist also, dass eine abschnittsweise Betrachtung zum Verlust bedeutsamer Informationen führen kann.

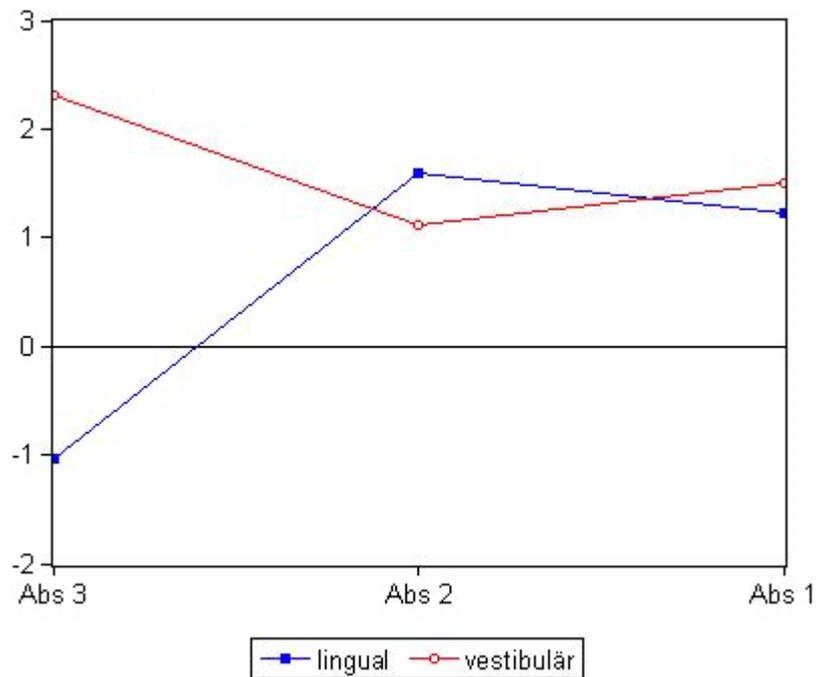


Abbildung 6.4: Differenzen zwischen Probanden- und Roboterdaten - Abschnitte

Erläuterungen: Durchschnittliche Differenz der Anzahl nicht vollständig gereinigter Zahnfelder (Planimetrie) nach Putzen bei Probanden und Roboter, Mittelwerte. Anzahl der Beobachtungen: Probanden, Zahnbürste A: n=13, Zahnbürste B: n=14; Roboter: n=7. Die Ziffern auf der Abszisse bezeichnen die untersuchten Zahnabschnitte. (Für eine bessere Vergleichbarkeit mit Abbildung 4.12 wurde die Reihenfolge der Abschnitte vertauscht.) Ein Wert oberhalb der Nulllinie bedeutet, dass der Roboter nach dem Putzen mehr vollständig gereinigte Zahnfelder aufweist als die Probanden.

6.4 Multivariate Analyse

Die in den vorangegangenen Untersuchungsabschnitten verwendete bivariate Analyse kann eine Reihe von Schwächen aufweisen, denen im Rahmen einer sogenannten „multivariaten Analyse“ begegnet werden kann. Eine für die Untersuchung zentrale Schwäche soll an einem Beispiel illustriert werden: Soll untersucht werden, welche der zwei untersuchten Zahnbürsten einen höheren Putzerfolg hat, dann kann eine belastbare Aussage nur für eine Untergruppe der Beobachtungen gemacht werden, bei der nicht mehr die Gefahr besteht, dass der Einfluss der Zahnbürste von anderen Faktoren überlagert wird. Im vorliegenden Fall kann beispielsweise gezeigt werden, dass für die Probanden im vestibulären Bereich des Zahnabschnitts 1 die Zahnbürste B unter Verwendung von Putztechnik I signifikant besser putzt als die Zahnbürste A. In den meisten anderen Untergruppen ist der Unterschied zwischen den Zahnbürsten in diesem bivariaten Vergleich statistisch insignifikant. Es kann auf diese Art eine Vielzahl von Aussagen zu sehr differenzierten Untergruppen gemacht werden, die allerdings schwierig zu interpretieren sind: Ist die Zahnbürste B nun insgesamt signifikant überlegen oder nicht? Sobald die untersuchten Untergruppen jedoch zu größeren Klassen zusammengefasst werden (zum Beispiel durch Aggregation der Putztechniken oder der Zahnabschnitte), ist die Aussagekraft des bivariaten Vergleiches eingeschränkt. Die möglichen Einflussvariablen überlappen sich in ihrer Wirkung. Diese lässt sich nicht mehr klar einer Ursache zuordnen. Ein Vergleich der Zahnbürsten A und B, der alle anderen Einflussfaktoren außer Acht lässt und trotzdem eine für alle erhobenen Daten gültige Aussage trifft, ist nur durch multivariate Analyseverfahren möglich.

In diesem Abschnitt wird deshalb für die folgenden 3 Variablen eine OLS-Schätzung vorgenommen:²²

- **WertZ:** der prozentuale Anteil nicht vollständig gereinigter Zahnfelder an der Gesamtzahl der Zahnfelder pro Abschnitt (Planimetrie) bei den Probanden
- **WertIV:** der prozentuale Anteil nicht vollständig gereinigter Zahnfelder an der Gesamtzahl der Zahnfelder pro Abschnitt (Planimetrie) bei dem Roboter
- **WertK:** der prozentuale Anteil nicht gereinigter Zahnfläche an der gesamten Zahnfläche pro Abschnitt (übliches Verfahren) bei dem Roboter.

²² Ein Überblick über die multivariate Regressionsanalyse findet sich z.B. bei Gujarati (2003).

Die Werte liegen für 3 Zahnabschnitte, 2 Putztechniken²³, 2 Zahnbürsten und vestibulär bzw. lingual vor. Somit ergeben sich 24 Beobachtungen.

Die Schätzgleichung hat folgende Gestalt:²⁴

$$WERT=C+\pi_1 PUTZ1 +\pi_2 ZBA+\pi_3 LING+\pi_4 ABS1 +\pi_5 ABS2 +\varepsilon$$

Als Regressoren wurden verwendet:

- **PUTZ1**: eine (0/1)-Variable, welche den Wert 1 annimmt, wenn es sich um Putztechnik 1 handelt,
- **ZBA**: eine (0/1)-Variable, die bei Verwendung von Zahnbürste A den Wert 1 zugeordnet bekommt,
- **LING**: eine (0/1)-Variable, welche den Wert 1 für den lingualen Bereich annimmt,
- **ABS1** und **ABS2** als Dummy-Variablen, die den Zahnabschnitt festlegen, sowie
- einer Konstanten **C**.
-

Tabelle 6.2 zeigt die Koeffizientenschätzungen und wesentliche Testwerte für das Modell:

²³Putztechnik 3 wurde aus den bekannten Gründen ausgespart.

²⁴Zur Verwendung von Dummy-Variablen in Regressionsmodellen siehe z.B. Gujarati (2003, Kap. 9) oder Greene (1993, Kap.8.2).

Tabelle 6.2: Koeffizientenschätzer für die Modelle

Koeffizienten	WertZ (Probanden)	WertIV (Roboter, Planimetrie)	WertK (Roboter, üblich)
Konstante C	36,13 (19,45***)	22,30 (5,75***)	29,03 (30,92***)
PUTZ1	0,01 (0,00)	1,20 (0,38)	-1,59 (-2,07*)
ZBA	6,74 (4,45***)	12,22 (3,86***)	5,87 (7,66***)
LING	3,95 (2,61**)	13,39 (4,23***)	8,59 (11,20***)
ABS1	-15,57 (-8,38***)	-22,07 (-5,70***)	-12,92 (-13,76***)
ABS2	-9,92 (-5,34***)	-16,34 (-4,22***)	-8,47 (-9,02***)
Mittelwert	32,98	22,91	28,33
Standardabweichung	8,36	14,98	7,85
R²	0,85	0,79	0,96
DW	1,88	2,55	2,16
BPG	3,33	9,24	2,90

Erläuterungen: Anzahl Beobachtungen: n=24. t-Werte in Klammern. (*), (**) bzw. (***): die Nullhypothese „Koeffizientenschätzer nicht von Null verschieden“ kann bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von höchstens 10, 5 bzw. 1 % abgelehnt werden. R²: Bestimmtheitsmaß. DW: Durbin-Watson-Test auf Autokorrelation der Residuen, Schwellenwerte vgl. Rinne (2003, S.603). BPG: Breusch-Pagan-Godfrey-Test auf Heteroskedastie, Nullhypothese „Keine Heteroskedastie“, Testwerte χ^2_v -verteilt mit v = Anzahl Regressoren (ohne Konstante), kritische Werte vgl. Rinne (2003, S. 731).

Die Testwerte bestätigen, dass die Residuen aller Schätzgleichungen frei von Autokorrelation und homoskedastisch sind.²⁵ Somit erfüllen die errechneten Koeffizientenschätzer die blauen Eigenschaften. Es muss kein anderes Schätzverfahren verwendet werden und keine Korrekturen der geschätzten Koeffizienten erfolgen. Die t-Werte der geschätzten Koeffizienten sind unverzerrt und können in gewohnter Weise interpretiert werden.²⁶ Im Einzelnen ergeben sich die folgenden Resultate:

²⁵Lediglich bei der Schätzung für die Roboterauswertung nach Planimetrie befindet sich der Durbin-Watson-Wert im Indifferenzbereich.

²⁶ Zu den möglichen Auswirkungen von Heteroskedastie und Autokorrelation auf die Qualität einer OLS-Schätzung und den Umgang mit diesen Problemen vgl. z.B. Gujarati (2003, Kap. 11 und 12).

Die t-Werte der Koeffizientenschätzer zeigen an, dass in allen 3 Fällen der Koeffizient der Variablen *Putz1* bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 Prozent einen nicht signifikant von Null verschiedenen Wert aufweist. Dies bedeutet, dass die Wahl von Putztechnik 1 oder 2 in allen 3 Untersuchungen keinen Einfluss auf den Putzerfolg hat. Alle anderen Koeffizientenschätzer sind signifikant von Null verschieden.

Ein interessanter Befund zeigt sich bei den Probanden hinsichtlich des Reinigungserfolges der verwendeten Zahnbürsten: Die Schätzung ergibt für den Koeffizienten der Variablen *ZBA* einen Wert von 6,74. Das bedeutet, dass sich die zu erklärende Variable – in diesem Fall ist es der Prozentsatz an Zahnfeldern, die nicht vollständig von Plaque gereinigt wurden – um 6,74 erhöht, wenn die Variable *ZBA* den Wert 1 annimmt. Diese Variable ist per definitionem gleich 1, wenn Zahnbürste A benutzt wurde und gleich 0, wenn Zahnbürste B im Einsatz war. Dies bedeutet, dass bei den Probanden die Verwendung von Zahnbürste A zu einem um 6,74 Prozent höheren Prozentsatz an Zahnfeldern führt, die nicht vollständig gereinigt wurden. Alle anderen möglichen Einflussfaktoren, die in der Studie erfasst wurden, sind dabei herausgerechnet, was simultan eben nur im Rahmen der vorliegenden multivariaten Analyse möglich ist.

Für den Roboter bewirkt eine Verwendung von Zahnbürste A statt der alternativen Zahnbürste B eine Erhöhung des Prozentsatzes nicht vollständig gereinigter Zahnfelder um 12,22. In der Betrachtung nach dem üblichen Verfahren erhöht sich der Anteil noch plaque-behafteter Fläche bei Verwendung von Zahnbürste A um 5,87 Prozentpunkte.

In allen 3 Untersuchungen ist der linguale im Vergleich zum vestibulären Bereich nach dem Putzen stärker mit Plaque behaftet. Und bei der Bewertung der Abschnitte herrscht ebenfalls Übereinstimmung: Abschnitt 1 ist am wenigsten von Plaque betroffen, es folgt Abschnitt 2 und der Abschnitt 3 ist derjenige, der am stärksten verschmutzt ist (bei den Probanden sind es z.B. in Abschnitt 1 im Vergleich zu Abschnitt 3 15,57 Prozentpunkte weniger und in Abschnitt 2 immerhin noch 9,92 Prozentpunkte weniger als in Abschnitt 3).

Ergebnis:

Die multivariate Analyse kommt zu den folgenden Ergebnissen:

1. Zahnbürste B ist der Zahnbürste A signifikant überlegen, und zwar sowohl bei den Probanden als auch in beiden Auswertungsvarianten der Roboterstudie.
2. Der Befall mit Plaque nach dem Putzen ist größer im lingualen Bereich und je weiter der untersuchte Zahnabschnitt im hinteren Bereich liegt.
3. Die Wahl der Putztechnik ist irrelevant für den Putzerfolg.

7 Diskussion

7.1 Material und Methode

7.2 Diskussion Teil 1 – Klinische Untersuchung

7.3 Diskussion Teil 2 – Labortechnische Untersuchung

7.4 Diskussion Teil 3 – Validierung des Putzroboters

8 Zusammenfassung

Die sich aus den Versuchsanordnungen ergebenden Daten wurden einer ausgiebigen statistischen Analyse unterzogen. Es kamen fortgeschrittene statistische Methoden zur Anwendung. Im Kern ergaben sich dabei die folgenden Ergebnisse:

A. Auswertung nach Planimetrie:

- Der Putzerfolg des Roboters ist generell höher als derjenige der Probanden. Eine Ausnahme hiervon bilden lediglich die linguale Flächen der Zähne 47 und 46, bei denen die Probanden mehr vollständig gereinigte Zahnfelder hinterlassen als der Roboter. Eine Detailanalyse ergab auch, dass das Putzverhalten des Roboters im Bereich der Zähne 47 und 46 ursächlich ist für den starken Unterschied zwischen vestibulären und lingualem Bereich, der so nur bei den Roboterdaten festzustellen ist.
- Es besteht eine Korrelation der Abweichungen zwischen dem Putzerfolg von Probanden und Roboter. Die gefundenen Muster sind über die Wahl der Zahnbürste und der Putztechnik hinweg konstant.
- Bei Putztechnik 3 gibt es extreme Schwankungen in der Reinigungsleistung des Roboters.
- Ein Vergleich der zwei untersuchten Zahnbürsten ergibt, dass die Zahnbürste B sowohl in der Probanden- als auch in der Roboterstudie ein besseres Putzergebnis hinsichtlich der Anzahl vollständig gereinigter Zahnfelder liefert. Während dieser Unterschied bei den Probanden allerdings nur in den wenigsten Fällen statistisch signifikant ausfällt, ist das Ergebnis in der Roboterstudie signifikant eindeutig.
- Die Wahl der Putztechnik hat weder bei Probanden noch in der Roboterstudie einen signifikanten Einfluss auf den Putzerfolg.
- Eine mögliche Erweiterung des Putzrobotermodells um einen Zahnfleischsaum trägt nach den vorliegenden Daten nicht dazu bei, die Übereinstimmung zwischen den Putzerfolgen von Probanden und Roboter zu verbessern. Nach Datenlage kann auf eine solche Erweiterung verzichtet werden.

B. Auswertung der Roboterdaten nach dem üblichen Verfahren:

- Bei Putztechnik 1 und 2 ist die Zahnbürste B der Zahnbürste A erneut überlegen.
- Da die Daten nach dem üblichen Verfahren lediglich für Zahnabschnitte und nicht für die einzelnen Zähne vorliegen, kommt es zum Verlust bedeutsamer Informationen.

C. Multivariate Analyse:

Zur Kontrolle potenzieller Einflussfaktoren, die im Rahmen einer bivariaten Analyse nicht entsprechend erfasst werden können, wurde zusätzlich eine Regressionsanalyse durchgeführt. Die multivariate Analyse kommt für alle drei Untersuchungen, unter Herausrechnung aller anderen möglichen Einflussfaktoren, zu den folgenden Ergebnissen:

1. Zahnbürste B ist der Zahnbürste A signifikant überlegen, und zwar sowohl bei den Probanden als auch in beiden Auswertungsvarianten der Roboterstudie.
2. Der Plaquebefall nach dem Putzen ist im lingualen Bereich größer und je weiter der untersuchte Zahnabschnitt im dorsalen (hinteren) Bereich liegt.
3. Die Wahl der Putztechnik ist irrelevant für den Putzerfolg.

D. Schlussfolgerung:

- Der Zahnputzroboter reagiert mit größerer Sensibilität auf Putzunterschiede und die daraus resultierende Reinigungsleistung als hochkalibrierte Probanden. Das liegt an den standardisierten Bewegungsprogrammen des Roboters.
- Die Korrelation der Reinigungsleistung zwischen Roboterauswertung und klinischer Auswertung ist statistisch gesichert, sowohl für das Planimetrie-Verfahren nach Claydon und Addy (1995), als auch für das übliche Prozentverfahren der Roboterauswertung.
- Damit gilt die robotergestützte Methode zur Beurteilung der Reinigungseffizienz von Handzahnbürsten als klinisch validiert.

The complex data of the test arrangements have been subjected to a broad statistical analysis. Advanced statistic methods have been used. The following core statements are the essential results of the study:

A. Planimetric analysis of plaque removal

- The cleaning efficiency of the robot cycles is in principal higher than the cleaning ability of the highly trained test persons. The only exceptions are the lingual surfaces of the right lower first and second molars. In these areas the test persons achieved

more completely cleaned planimetric areas of tooth surfaces than the robot. A detailed analysis showed, that the brushing modus of the robot caused the high differences between the vestibular and lingual surfaces of the right lower first and second molars. This difference is only detected in the robot data.

- The individual cleaning patterns tooth by tooth and their variations are well correlated from the robot test to the clinical data. These individual cleaning patterns are the same for both tested toothbrushes and for all tested brushing techniques.
- However, the brushing technique 3 (from “red” to “white”) produces extreme deviations of the cleaning efficiency of the robot.
- The comparison of the two examined toothbrushes resulted in a better cleaning efficiency of the toothbrush B considering the number of completely cleaned areas. These results are valid for the test persons as well as for the robot data. These differences were statistically significant for the robot data whereas the clinical data differed statistically significant only in few cases.
- The choice of brushing technique had neither for the test persons nor for the robot study a significant statistical effect concerning the cleaning efficiency.
- It has been proven whether a marginal gum line around the neck/root of robot tooth could improve the correlation between clinical validation data and robot cycles. There was no statistical evidence that the already good correlation could be improved by constructing a robot gum line.

B. Analysis of the robot data according to the traditional method, different to plaque planimetry

- Comparing brushing technique 1 and 2, concerning cleaning efficiency, toothbrush B (Interdental) is again superior to toothbrush A (Flex Plus).
- The traditional robot assessment method examines the teeth in sections and does not include the evaluation of a single tooth. This causes the loss of important individual tooth related information.

C. Multivariate data analysis

A regression analysis was carried out to control potential influencing factors, which can not be recorded in a bivariate analysis. For all three examinations the multivariate data analysis leads, considering all influencing factors, to the following results:

1. The cleaning efficiency of toothbrush B is significantly superior to toothbrush A. This is valid for the test persons as well as for both analysis types of the robot data.
2. After brushing the residual plaque is more extensive on the lingual surfaces increases in posterior positions of the teeth.
3. The choice of brushing technique is irrelevant for the cleaning efficiency.

D. Conclusion

- The tooth brushing robot data demonstrate a higher sensibility concerning brushing differences and the resulting cleaning efficiency compared to highly calibrated test persons with equal motion patterns. This is due to the standardised brushing programmes of the robot.
- The cleaning efficiency of all programmes of the robot cycles is statistically well correlated to the parallel clinical tests. This statistic outcome is evident for the planimetric assessment of plaque removal according to Claydon and Addy (1995) as well as for the traditional percentage assessment of the robot evaluation.
- Thus the robot supported method for assessing the cleaning efficiency of manual toothbrushes is clinically validated.

9 Literaturverzeichnis

- 1) Millberry GS: Role of dentistry in personal hygiene. Am J Public Health (N Y). 1921 Jan;11(1):53-4.
- 2) JF Roulet; S. Fath; S. Zimmer: Lehrbuch der Prohylaxeassistentin, Urban & Fischer, München, 2. Auflage, 2000
- 3) S Fath: Mundhygieneinstruktionen. In J. F. Roulet; S. Fath; St. Zimmer: Lehrbuch der Prohylaxeassistentin, Urban & Fischer, München, 2. Auflage, 2000; 169 ff
- 4) JF Roulet: Zahnbeläge. In J. F. Roulet; S. Fath; St. Zimmer: Lehrbuch der Prohylaxeassistentin, Urban & Fischer, München, 2. Auflage, 2000; 50 ff
- 5) JF Roulet; S Zimmer: Prophylaxe und Präventivzahnmedizin: Bd. 16 (Gebundene Ausgabe), Thieme, Stuttgart; Auflage: 1, 2003
- 6) S Zimmer: Mundhygiene und Mundhygienehilfsmittel. In JF Roulet; S. Zimmer: Prophylaxe und Präventivzahnmedizin: Bd. 16 (Gebundene Ausgabe), Thieme, Stuttgart, Auflage: 1, 2003; 47 ff
- 7) S Zimmer: Professionelle Kariesprophylaxe. In JF Roulet; S. Zimmer: Prophylaxe und Präventivzahnmedizin: Bd. 16 (Gebundene Ausgabe), Thieme, Stuttgart, Auflage: 1, 2003; 77 ff
- 8) Bellini HT, Arneberg P, von der Fehr FR. Oral hygiene and caries. A review. Acta Odontol Scand. 1981;39(5):257-65.
- 9) König KG: Karies und Kariesprophylaxe. München: Goldmann, 1971.
- 10)E Hellwig, J Klimek, T Attin: Einführung in die Zahnerhaltung, Urban & Fischer, München, 3. Auflage, 2003
- 11)K Lehmann, E Hellwig: Zahnärztliche Propädeutik, Urban & Fischer, München, 9. Überarbeitete Auflage, 2002
- 12)P Gängler, T Hoffmann: Konservierende Zahnheilkunde und Parodontologie, Thieme, 2. Auflage, 2005
- 13)P Gängler, WH Arnold, D. Steinberg: Ätiologie und Pathogenese. In P. Gängler, T. Hoffmann: Konservierende Zahnheilkunde und Parodontologie, Thieme, 2. Auflage, 2005; 113 ff

- 14) T Hoffmann: Parodontalerkrankungen – Grundlage und Diagnostik – Epidemiologie.
In P. Gängler, T. Hoffmann: Konservierende Zahnheilkunde und Parodontologie,
Thieme, 2. Auflage, 2005; 251 ff
- 15) CE Dörfer: Mechanische Plaquekontrolle. In P. Gängler, T. Hoffmann:
Konservierende Zahnheilkunde und Parodontologie, Thieme, 2. Auflage, 2005; 356 ff
- 16) W Ketterl: Zahnerhaltung II – Praxis der Zahnheilkunde 3, Urban & Schwarzenberg,
3. Auflage, München, 1993
- 17) O Fejerskov, E Kidd: Dental Caries: The Disease And Its Clinical Management,
Munksgaard, Kopenhagen, 2003
- 18) Imfeld T: Nutrition, diet and dental health--de- and remineralisation of teeth. *Ther Umsch.* 2008 Feb;65(2):69-73.
- 19) Jardim JJ, Alves LS, Maltz M: The history and global market of oral home-care
products. *Braz Oral Res.* 2009; 23 Suppl 1:17-22.
- 20) Zhao W, Zhao Q: The overview of the prevention and treatment of dental disease in
ancient China. *Zhonghua Yi Shi Za Zhi.* 2009 Mar;39(2):90-2.
- 21) Neiburger EJ: The toothbrush plant.. *J Mass Dent Soc.* 2009 Summer; 58(2):30-2.
- 22) Almas K, Skaug N, Ahmad I: An in vitro antimicrobial comparison of miswak extract
with commercially available non-alcohol mouthrinses. *Int J Dent Hyg.* 2005
Feb;3(1):18-24.
- 23) Yarde A, Robinson M: The miswak chewing stick: a traditional oral hygiene aid. *NDA
J.* 1996 Summer;47(1):20-1.
- 24) Al-Otaibi M, Al-Harthy M, Söder B, Gustafsson A, Angmar-Månsson B: Comparative
effect of chewing sticks and toothbrushing on plaque removal and gingival health.
Oral Health Prev Dent. 2003;1(4):301-7.
- 25) Younes SA, El-Angbawi MF: Dental caries prevalence in intermediate Saudi
schoolchildren in Riyad. *Community Dent Oral Epidemiol.* 1982 Apr;10(2):74-6
- 26) Hyson JM Jr: History of the toothbrush. *J Hist Dent.* 2003 Jul;51(2):73-80
- 27) Simon K: Zahnbürstenmanufakturen in Frankreich - Vom Luxusgut zum
Gebrauchsgegenstand. *zm* 95, Nr. 5, 1.3.2005: 116-120
- 28) W.Ketterl: Zahnerhaltung I – Praxis der Zahnheilkunde 2, Urban & Schwarzenberg, 3.
Auflage, München, 1992
- 29) Schug-Köstlers M: Lehrbuch der Kavitätenpräparation. Maudrich, Wien, 1951

- 30) Stejskalová J: Predilection areas of dental caries. Clinical and morphological studies. Comprehensive review. *Cesk Stomatol.* 1973;73(3):203-8
- 31) Mireau, HD, Haubnitz I, Völk W: Gewohnheitsmuster beim Gebrauch der Handzahnbürste. *Dtsch Zahnärztl Z* 44: 836, 1989
- 32) Unkel JH, Fenton SJ, Hobbs G, Frere CL: Toothbrushing ability is related to age in children. *ASDC J Dent Child* 62: 346-348, 1995
- 33) Stillmann PR: A philosophy of the treatment of periodontol disease. *Dent Dig*, 1932, 38: 215
- 34) Bass CC: An effective method of personal oral hygiene. *J. Louisiana State Medical. Assoc* 106, 1954
- 35) Fones AC: Mouth hygiene. Lea and Febiger. Philadelphia (1934)
- 36) Leonard NS: In our opinion – Home technics for the care of the teeth. *J Periodont* 20:37, 1949
- 37) Schäfer C: Unerwünschte Nebenwirkungen von Plaque-Anfärbemitteln. *Prophylaxe Impuls* 6: 12-16, 2002
- 38) Skinner FH: The prevention of pyorrhea and dental caries by oral prophylaxis. *Dent Cosmos* 56, 299, 1914
- 39) Lang NP, Oestergaard ER, Løe H: A fluorescent plaque disclosing agent. *J. periodont. Res.* 7, 59, 1973
- 40) Block PL, Lobene RR, Derdivanis JP: A two-tonedye test for dental plaque. *J. Periodont* 43, 423, 1972
- 41) Rams TE, Oler J, Listgarten MA, Slots J: Utility of Ramfjord index teeth to asses periodontal disease progression on longitudinal studies. *J Clin Periodontol.* 1993 Feb;20(2):147-50.
- 42) Fischman SL: Current status of indices of plaque, *J Clin Periodontol* 1986; 13:371-374
- 43) Løe H: The gingival index, the plaque index and the retention index systems. *J Periodontol.* 1967; 38: 610-6.
- 44) Silness J, Løe H: Periodontal disease in pregnancy. II Correlation between oral hygiene and periodontal conditions. *Acta odontol Scand.* 1964; 22: 121-35.
- 45) Løe H: The gingival index, the plaque indes and the retention index system. *Journal of Periodontology* 38, 610-616, 1967
- 46) Mander CI, Mainwaring PJ: Assessment of the validity of two plaque indicex. *Community Dent Oral Epidemiol.* 1980 Jun;8(3):139-41

- 47) Quirynen M, Dekeyser C, van Steenberghe D: Discriminating power of five plaque indices. *J. Periodontol.* 1991 Feb;62(2):100-5
- 48) Greene JC, Vermillion JR: The oral hygiene index: a method for classifying oral hygiene status. *J Am Dent Assoc.* 1960;61: 172-9.
- 49) Greene, J & Vermillion, J: The simplified oral hygiene index. *Journal of the American Dental Association.* 68, 7-13, 1964
- 50) Quigley GA, Hein JW: Comparative cleansing efficiency of manual and power brushing. *J Am Dent Assoc.* 1962; 65: 26-9.
- 51) Turesky S, Gilmore ND, Glickman I: Reduced plaque formation by the chloromethyl analog of vitamin C. *J Periodontol.* 1970; 41: 41-3
- 52) Lange DE, Lübbert HC, Eenboom A, Promesberger A: Klinische Bewertungsverfahren zur Objektivierung der Mundhygiene. *Dtsch. Zahnärztl. Z.* 32: 44, 1977
- 53) Zimmer S, Strauss J: Efficacy of the cybersonic in comparison with the braun 3d excel and a manual toothbrush. *J Clin Periodontol* 2005; 32: 360-363
- 54) Loe H, Theilade E, Jensen SB: Experimental gingivitis in man. *Journal of Periodontology* 36, 177-178, 1965
- 55) Shick RA, Ash MM: Evaluation of the vertical method of toothbrushing. *Journal of Periodontology* 32, 346-353, 1961
- 56) Rumfjord S: Indices for prevalence and incidence of periodontal disease. *Journal of Periodontology* 30, 51-59, 1956
- 57) Elliot JR, Bowers GM, Clemmer BA, Rovelstad GH: Evaluation of an oral physiotherapy center in the reduction of bacterial plaque and periodontal disease. *Journal of Periodontology* 43, 221-224, 1997
- 58) Rustogi KN, Curtis JP, Volpe AR, Kemp JH, McCool JJ, Korn LR: Refinement of the modified navy plaque index to increase plaque scoring efficiency in gumline and interproximal tooth areas. *J Clin Dent.* 1992; 3(Suppl C): C9-12
- 59) Claydon N, Addy M: Comparative single-use plaque removal by toothbrushes of different designs. *J Clin Periodontol.* 1996 Dec;23(12):1112-6
- 60) Claydon N, Addy M: The use of planimetry to record and score the modified navy index and other area-based plaque indices. a comparative toothbrush study. *J Clin Periodontol.* 1995 Sep;22(9):670-3

- 61) Shaloub A, Addy M: Evaluation of accuracy and variability of scoring area based plaque indices. a laboratory model. *J Clin Periodontol*; 27: 16-21, 2000
- 62) Fischman SL, Cancro LP, Pretara-Spanedda P, Jacobs D: Distal mesial plaque index: a technique for assessing dental plaque about the gingiva. *Dent Hyg* 61: 404-409, 1987
- 63) Cancro L: Development of a new plaque scoring technique, personal correspondence. 1983
- 64) O'Leary T: Periodontal diagnosis. *Journal of Periodontology* 38, 617-624, 1967
- 65) Harrap GJ: Assessment of the effect of dentifrices on the grove of dental plaque. *J Periodontol* 1: 166-174, 1974
- 66) Mierau HD: Der freiliegende Zahnhals. *Dtsch Zahnärztl. Z.* 1992; 47: 643-53
- 67) Westerfeld F: In vitro Untersuchung zur Prophylaxe von Bürstabrasionen erodierter Schmelzoberflächen; Gießen; 2002
- 68) Danser MM, Driesen GM, Timmerman MF, van der Velden, van der Weijden GA: A laboratory and clinical investigation comparing 2 oscillating/rotating electric toothbrushes. *J Clin Periodontol.* 2000 Apr;27(4):277-83.
- 69) Dörfer CE, von Bethlenfalvy ER, Kugel B, Pioch T: Cleaning efficacy of a manual toothbrush with tapered filaments. *Oral Health Prev Dent.* 2003;1(2):111-8.
- 70) He T, Li S, Sun L: Clinical comparison of the plaque removal efficacy of a manual toothbrush with criss-cross bristle design. *Am J Dent.* 2009 Aug;22(4):200-2.
- 71) Nygaard-Østby P, Edwardsen S, Spydevold B: Access to interproximal tooth surfaces by different bristle designs and stiffness of toothbrushes. *Scandinavian Journal of Dental Research* 87; 1979, S. 424-430
- 72) Rawls H.R., et al.: Interproximal penetration of commercial toothbrushes as determined by static and dynamic tests using recommended brushing techniques. *Journal of Clinical Dentistry* 4, S. 88-95 (1993)
- 73) Volpenhein DW, Walsh MD, Dellermann PA, Burkett TA: A new method for in vitro evaluation of the interproximal penetration of manual toothbrushes, *Journal of Clinical Dentistry* 5, S. 27-33 (1994)
- 74) Völker K: Putzeffizienz neuer Handzahnbürsten unter Verwendung eines 4-Achsen-Roboters; Med Diss, Ulm; 2006
- 75) Ernst CP et al.: A robot system for evaluating plaque removal efficiency of toothbrushes in vitro. *Quintessence International* 28, S. 441-445, 1997

- 76) Imfeld T, Sener B, Simonovic I: In-Vitro-Untersuchung der mechanischen Wirkung von handelsüblichen Handzahnbürsten. *Acta Med Dent Helv*, Vol 5, S. 37-47 (2000)
- 77) Mayer CM: Effizienz neuer Handzahnbürsten und Zahnpasten bei der Reinigung von festsitzenden kieferorthopädischen Apparaturen. *Med Diss*, Ulm 2000
- 78) Schätzle M, Imfeld T, Sener B, Schmidlin PR. In vitro tooth cleaning efficacy of manual toothbrushes around brackets. *Eur J Orthod*. 2009 Feb;31(1):103-7. Epub 2008 Dec 3.
- 79) Barnes CM, Covey DA, Shi X, Yankell SL: Laboratory evaluations of a bi-level, extremely tapered bristled toothbrush and a conventional uniform bristled toothbrush. *Am J Dent*. 2009 Apr;22(2):84-8.
- 80) Driesen GM, Warren PR, Hilfinger P, Ernst CP, Willershausen B: The development of the Braun Oral-B Ultra Plaque Remover: an in vitro robot study. *Am J Dent*. 1996 Jul;9 Spec No:S13-7.
- 81) Rother T: Entwicklung einer Prüfmethodik zur Evaluierung der Reinigungseffizienz von Zahnbürsten. Diplomarbeit, Fachhochschule Osnabrück 2004
- 82) H Rinne: Taschenbuch der Statistik, 3. Auflage, Frankfurt am Main 2003.
- 83) J Bortz: Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler, 6. Auflage, Heidelberg 2005.
- 84) WH Greene: *Econometric Analysis*, 2. Auflage, New York 1993.
- 85) DN Gujarati: *Basic Econometrics*, 4. Auflage, New York 2003

10 Anhang

Tabelle A.1.a: Vergleich der Mittelwerte Probanden und Roboter

Zahn	lingual/ vestibulär	Putztechnik 1			Putztechnik 2			Putztechnik 3		
		Probanden	Roboter	t-Wert	Probanden	Roboter	t-Wert	Probanden	Roboter	t-Wert
47	l	3,48	5,14	-3,78 (***)	4,11	4,50	-0,72	4,33	7,28	-5,76 (***)
	v	3,81	1,64	5,93 (***)	4,37	1,64	6,80 (***)	4,15	4,50	-0,51
46	l	3,41	4,57	-2,37 (**)	3,74	3,93	-0,37	4,26	8,07	-10,19 (***)
	v	3,52	1,93	3,91 (***)	3,30	2,36	1,80 (*)	3,59	4,64	-1,36
45	l	3,30	1,57	3,82 (***)	3,37	1,43	4,03 (***)	3,63	6,71	-4,78 (***)
	v	3,41	2,21	3,32 (***)	2,89	2,00	2,09 (**)	3,15	4,29	-1,47
44	l	2,89	2,43	1,22	2,96	2,14	1,70 (*)	3,48	6,79	-5,07 (***)
	v	2,74	1,36	3,70 (***)	2,70	1,21	3,27 (***)	3,04	3,07	-0,05
43	l	3,00	1,71	3,78 (***)	2,78	1,29	2,81 (***)	3,07	3,14	-0,13
	v	2,00	1,64	0,89	1,93	1,93	-0,01	2,11	2,79	-1,31
42	l	3,07	1,14	4,29 (***)	2,93	1,43	3,53 (***)	3,04	1,86	2,43 (**)
	v	2,15	0,57	4,56 (***)	1,85	0,57	3,85 (***)	2,00	2,14	-0,31
41	l	2,96	1,93	2,80 (**)	2,89	2,64	0,59	2,89	1,79	2,37 (**)
	v	2,37	0,21	6,49 (***)	1,81	0,64	3,40 (***)	2,44	3,43	-1,20
31	l	2,33	1,93	1,24	2,52	1,21	3,28 (***)	2,67	1,57	2,85 (***)
	v	2,22	0,86	3,66 (***)	1,78	1,07	1,89 (*)	2,37	2,43	-0,07
32	l	2,37	1,57	1,95 (*)	2,37	1,21	2,97 (***)	2,56	2,00	1,31
	v	1,96	0,93	3,04 (***)	1,59	1,21	1,11	2,11	1,71	0,71
gesamt	l	26,81	22,00	2,15 (**)	27,67	19,79	2,75 (***)	29,93	39,21	-3,01 (***)
	v	24,19	11,36	5,17 (***)	22,22	12,64	3,48 (***)	24,96	29,00	-0,80

Erläuterungen: Mittelwert der jeweiligen Anzahl nicht vollständig gereinigter Zahnfelder pro Zahn (Planimetrie) nach Putzen. Anzahl der Beobachtungen: Probanden: n=27, Roboter: n=14. Aufgrund des stark unterschiedlichen Stichprobenumfangs wurde der t-Test nach Satterthwaite-Welch verwendet. (*), (**) bzw. (***) die Nullhypothese der Gleichheit der Mittelwerte kann bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von höchstens 10, 5 bzw. 1 % abgelehnt werden.

Tabelle A.1.b: Vergleich der Mittelwerte Probanden und Roboter für Putztechnik 3, Zahnbürste A

Zahn	lingual/ vestibulär	Putztechnik 3, Zahnbürste A		
		Probanden	Roboter	t-Wert
47	l	4,54	5,86	-2,50 (**)
	v	4,54	2,86	3,72 (***)
46	l	4,38	7,14	-5,70 (***)
	v	3,92	2,57	3,18 (***)
45	l	3,69	4,86	-2,02 (*)
	v	3,31	2,14	3,26 (***)
44	l	3,77	4,86	-1,96 (*)
	v	3,23	1,71	3,37 (***)
43	l	2,77	2,71	0,09
	v	2,15	1,71	0,84
42	l	3,00	1,71	2,00 (*)
	v	2,23	1,29	1,94 (*)
41	l	3,15	2,00	1,64
	v	2,62	0,86	3,34 (***)
31	l	2,77	1,14	2,88 (**)
	v	2,54	0,29	5,46 (***)
32	l	3,08	1,43	3,10 (***)
	v	2,31	0,57	3,32 (***)
gesamt	l	31,15	31,71	-0,19
	v	26,85	14,00	5,75 (***)

Erläuterungen: Mittelwert der jeweiligen Anzahl nicht vollständig gereinigter Zahnfelder pro Zahn (Planimetrie) nach Putzen. Anzahl der Beobachtungen: Probanden: n=27, Roboter: n=14. Aufgrund des stark unterschiedlichen Stichprobenumfangs wurde der t-Test nach Satterthwaite-Welch verwendet. (*), (**) bzw. (***): die Nullhypothese der Gleichheit der Mittelwerte kann bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von höchstens 10, 5 bzw. 1 % abgelehnt werden.

Tabelle A.2: Vergleich der Mittelwerte Zahnbürste A und B für die Probanden

Zahn	lingual/ vestibulär	Putztechnik 1			Putztechnik 2			Putztechnik 3		
		Zahnbürste A	Zahnbürste B	t-Wert	Zahnbürste A	Zahnbürste B	t-Wert	Zahnbürste A	Zahnbürste B	t-Wert
47	L	3,76	3,21	0,80	4,84	3,43	2,18 (**)	4,54	4,14	0,80
	V	4,23	3,43	1,25	4,76	4,00	1,41	4,54	3,79	1,52
46	L	3,77	3,07	1,18	4,23	3,29	1,48	4,38	4,14	0,63
	V	3,84	3,21	1,18	3,77	2,86	1,40	3,92	3,29	1,31
45	L	3,38	3,21	0,36	3,54	3,21	0,50	3,69	3,57	0,24
	V	3,84	3,00	1,50	3,08	2,71	0,56	3,31	3,00	0,58
44	L	3,00	2,79	0,44	3,38	2,57	1,11	3,77	3,21	0,91
	V	3,15	2,36	1,56	3,15	2,29	1,65	3,23	2,86	0,61
43	L	2,54	3,43	-1,44	3,23	2,36	1,04	2,77	3,36	-0,88
	V	2,85	1,21	2,94 (***)	2,15	1,71	0,90	2,15	2,07	0,14
42	L	3,23	2,93	0,44	3,00	2,86	0,21	3,00	3,07	-0,08
	V	2,77	1,57	2,53 (**)	2,15	1,57	1,21	2,23	1,79	0,95
41	L	2,85	3,07	-0,35	2,92	2,86	0,10	3,15	2,64	0,68
	V	2,85	1,93	1,51	2,15	1,50	1,26	2,62	2,29	0,63
31	L	2,46	2,21	0,47	2,38	2,64	-0,38	2,77	2,57	0,36
	V	2,69	1,79	1,88 (*)	2,08	1,50	1,10	2,54	2,21	0,65
32	L	2,62	2,14	0,81	2,54	2,21	0,49	3,08	2,07	1,72 (*)
	V	2,38	1,57	1,80 (*)	1,77	1,43	0,76	2,31	1,93	0,71
gesamt	L	27,61	26,07	0,47	30,08	25,43	1,02	31,15	28,79	0,64
	V	28,61	20,07	2,39 (**)	25,08	19,57	1,56	26,85	23,21	1,18

Erläuterungen: Mittelwert der jeweiligen Anzahl nicht vollständig gereinigter Zahnfelder pro Zahn (Planimetrie) nach Putzen. Anzahl der Beobachtungen: Zahnbürste A: n=13, Zahnbürste B: n=14. Es wurde der Standard-t-Test verwendet. (*), (**) bzw. (***) die Nullhypothese der Gleichheit der Mittelwerte kann bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von höchstens 10, 5 bzw. 1 % abgelehnt werden.

Tabelle A.3: Vergleich der Mittelwerte Zahnbürste A und B für die Probanden (Putzerfolg als Differenz aus dem Zustand vor und nach dem Putzen gemessen)

Zahn	lingual/ vestibulär	Putztechnik 1 t-Wert	Putztechnik 2 t-Wert	Putztechnik 3 t-Wert
47	L	1,40	-0,84	0,01
	V	0,12	-0,96	-0,10
46	L	-0,51	-0,33	-0,81
	V	-0,19	-0,99	-0,05
45	L	-0,09	-0,31	-0,39
	V	-1,69	-0,48	-0,54
44	L	0,30	-0,82	-0,03
	V	-2,19 (**)	-0,70	0,03
43	L	1,68	-0,84	1,65
	V	-2,76 (**)	0,23	0,70
42	L	-1,12	0,57	0,25
	V	-0,65	-0,46	-1,48
41	L	0,23	1,49	0,07
	V	-1,02	-1,01	-1,16
31	L	-1,28	1,46	-0,50
	V	-0,93	-1,10	-1,01
32	L	-1,01	0,65	-1,03
	V	-0,42	-0,29	-0,23
gesamt	L	0,03	0,24	-0,15
	V	-1,79 (*)	-0,89	-0,69

Erläuterungen: Getestet wurden die Mittelwerte der jeweiligen Anzahl vollständig gereinigter Zahnfelder pro Zahn (Planimetrie), welche vor dem Putzen noch Plaque-behaftet waren (Differenz aus dem Zustand vor und nach dem Putzen). Anzahl der Beobachtungen: Zahnbürste A: n=13, Zahnbürste B: n=14. Es wurde der Standard-t-Test verwendet. (*), (**) bzw. (**): die Nullhypothese der Gleichheit der Mittelwerte kann bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von höchstens 10, 5 bzw. 1 % abgelehnt werden.

Tabelle A.4: Vergleich der Mittelwerte Zahnbürste A und B für den Roboter

Zahn	lingual/ vestibulär	Putztechnik 1			Putztechnik 2			Putztechnik 3		
		Zahnbürste A	Zahnbürste B	t-Wert	Zahnbürste A	Zahnbürste B	t-Wert	Zahnbürste A	Zahnbürste B	t-Wert
47	l	5,71	4,57	2,45 (**)	5,14	3,86	1,64	5,86	8,71	-6,43 (***)
	v	1,86	1,43	1,30	2,29	1,00	2,71 (**)	2,86	6,14	-3,56 (***)
46	l	5,57	3,57	3,54 (***)	4,43	3,43	1,34	7,14	9,00	-4,60 (***)
	v	2,57	1,29	2,50 (**)	3,57	1,14	5,38 (***)	2,57	6,71	-4,40 (***)
45	l	2,57	0,57	3,54 (***)	1,86	1,00	1,21	4,86	8,57	-5,91 (***)
	v	2,71	1,71	2,94 (**)	2,71	1,29	3,54 (***)	2,14	6,43	-4,87 (***)
44	l	3,00	1,86	2,25 (**)	3,00	1,29	4,08 (***)	4,86	8,71	-8,68 (***)
	v	1,86	0,86	2,08 (*)	2,29	0,14	4,82 (***)	1,71	4,43	-3,06 (***)
43	l	2,00	1,43	2,83 (**)	2,00	0,57	2,71 (**)	2,71	3,57	-1,07
	v	1,86	1,43	0,85	2,29	1,57	2,04 (*)	1,71	3,86	-3,25 (***)
42	l	1,86	0,43	3,16 (***)	2,14	0,71	4,47 (***)	1,71	2,00	-0,55
	v	0,86	0,29	1,29	1,14	0,00	3,36 (***)	1,29	3,00	-2,66 (**)
41	l	2,14	1,71	1,11	2,43	2,86	-0,85	2,00	1,57	0,75
	v	0,43	0,00	2,12 (*)	1,29	0,00	4,50 (***)	0,86	6,00	-8,12 (***)
31	l	2,14	1,71	1,11	1,14	1,29	-0,32	1,14	2,00	-1,69
	v	1,71	0,00	6,00 (***)	1,71	0,43	3,12 (***)	0,29	4,57	-4,23 (***)
32	l	1,43	1,71	-0,48	1,71	0,71	2,94 (**)	1,43	2,57	-2,19 (**)
	v	1,71	0,14	6,74 (***)	1,86	0,57	3,25 (***)	0,57	2,86	-2,87 (**)
gesamt	l	26,43	17,57	4,55 (***)	23,86	15,71	2,99 (**)	31,71	46,71	-5,34 (***)
	v	15,57	7,14	4,04 (***)	19,14	6,14	5,90 (***)	14,00	44,00	-5,89 (***)

Erläuterungen: Mittelwert der jeweiligen Anzahl nicht vollständig gereinigter Zahnfelder pro Zahn (Planimetrie) nach Putzen. Anzahl der Beobachtungen: Zahnbürste A: n= 7, Zahnbürste B: n=7. Es wurde der Standard-t-Test verwendet. (*), (**) bzw. (***): die Nullhypothese der Gleichheit der Mittelwerte kann bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von höchstens 10, 5 bzw. 1 % abgelehnt werden.

Tabelle A.5: F- und t-Werte eines Mittelwertvergleiches der Putztechniken 1 bis 3 bei Probanden und Roboter

Zahn	lingual/ vestibulär	Probanden	Roboter	t-Test	t-Test	t-Test
		F-Test Putztechnik 1 bis 3	F-Test Putztechnik 1 bis 3	Putztechnik 1 und 2	Putztechnik 1 und 3	Putztechnik 2 und 3
47	L	1,96	14,15 (***)	1,29	-4,54 (***)	-4,07 (***)
	V	0,95	15,82 (***)	0,00	-4,09 (***)	-4,34 (***)
46	L	2,38 (*)	37,04 (***)	1,18	-8,25 (***)	-6,93 (***)
	V	0,29	8,11 (***)	-0,85	-2,74 (**)	-3,43 (***)
45	L	0,42	42,79 (***)	0,27	-7,59 (***)	-7,22 (***)
	V	0,79	7,30 (***)	0,61	-2,93 (***)	-2,72 (**)
44	L	1,10	39,54 (***)	0,67	-7,09 (***)	-6,75 (***)
	V	0,43	6,04 (***)	0,31	-2,75 (**)	-2,72 (**)
43	L	0,18	10,04 (***)	1,24	-3,59 (***)	-3,38 (***)
	V	0,11	3,68 (**)	-0,90	-1,80 (*)	-2,28 (**)
42	L	0,04	1,82	-0,74	-1,20	-1,84 (*)
	V	0,36	9,65 (***)	0,00	-3,48 (***)	-3,48 (***)
41	L	0,02	3,54 (**)	-2,26 (**)	2,29 (**)	0,41
	V	1,53	13,74 (***)	-1,70	-3,45 (***)	-4,10 (***)
31	L	0,33	2,43 (*)	2,46 (**)	-1,03	1,07
	V	1,48	2,96 (*)	-0,56	-1,67	-1,93 (*)
32	L	0,12	2,12	0,99	-2,15 (**)	-1,03
	V	1,23	1,27	-0,80	-0,89	-1,42
gesamt	L	0,69	29,46 (***)	0,96	-6,43 (***)	-5,89 (***)
	V	0,64	9,66 (***)	-0,50	-3,11 (***)	-3,48 (***)

Erläuterungen: Mittelwert der jeweiligen Anzahl nicht vollständig gereinigter Zahnfelder pro Zahn (Planimetrie) nach Putzen. Dokumentation der Mittelwerte siehe Anhang Tabelle 1. Anzahl der Beobachtungen: Probanden: n=27, Roboter: n=14. Es wurde der Standard-F-Test sowie der Standard-t-Test verwendet. (*), (**) bzw. (***): die Nullhypothese der Gleichheit der Mittelwerte kann bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von höchstens 10, 5 bzw. 1 % abgelehnt werden.

Tabelle A.6: Vergleich der Mittelwerte Probanden und Roboter ohne Zahnfleischsaum (Bereich A, B und C)

Zahn	lingual/ vestibulär	Putztechnik 1			Putztechnik 2			Putztechnik 3		
		Probanden	Roboter	t-Wert	Probanden	Roboter	t-Wert	Probanden	Roboter	t-Wert
47	l	1,22	3,07	-5,44 (***)	1,63	2,93	-3,26 (***)	1,63	4,71	-8,70 (***)
	v	1,67	1,21	1,46	2,19	0,92	4,42 (***)	1,78	2,57	-1,91 (*)
46	l	1,22	3,21	-7,87 (***)	1,48	2,57	-3,18 (***)	1,44	5,28	-13,88 (***)
	v	1,67	1,07	2,74 (***)	1,63	1,29	1,13	1,59	2,86	-2,75 (***)
45	l	1,19	1,07	0,42	1,41	1,14	0,81	1,30	4,21	-7,03 (***)
	v	1,70	1,14	2,91 (***)	1,44	1,14	1,16	1,59	2,43	-2,05 (**)
44	l	1,04	1,50	-1,59	1,44	1,36	0,25	1,30	4,07	-6,26 (***)
	v	1,44	0,64	3,41 (***)	1,52	0,42	4,60 (***)	1,44	1,71	-0,79
43	l	1,52	0,50	3,30 (***)	1,26	0,43	2,21 (**)	1,44	1,50	-0,16
	v	1,15	0,71	1,83 (*)	1,41	0,71	2,42 (**)	1,37	1,50	-0,38
42	l	1,74	0,36	4,61 (***)	1,37	0,57	2,88 (***)	1,56	0,50	3,16 (***)
	v	1,44	0,07	5,60 (***)	1,26	0	6,13 (***)	1,30	0,93	1,07
41	l	1,70	0,64	3,51 (***)	1,37	0,86	1,62	1,44	0,29	3,91 (***)
	v	1,44	0	6,34 (***)	1,19	0	5,61 (***)	1,56	2,29	-1,51
31	l	1,48	0,21	5,23 (***)	1,30	0,14	4,18 (***)	1,41	0,43	3,64 (***)
	v	1,48	0,14	6,26 (***)	1,19	0,07	4,84 (***)	1,48	1,57	-0,20
32	l	1,37	0,36	3,66 (***)	1,37	0,21	3,84 (***)	1,30	0,50	2,55 (**)
	v	1,22	0,07	4,93 (***)	1,19	0,36	3,58 (***)	1,41	0,71	2,15 (**)
gesamt	l	12,48	10,93	1,20	12,63	10,21	1,24	12,81	21,50	-4,16 (***)
	v	13,22	5,07	6,05 (***)	13,00	4,93	5,79 (***)	13,52	16,57	-1,10

Erläuterungen: Mittelwert der jeweiligen Anzahl nicht vollständig gereinigter Zahnfelder pro Zahn (Planimetrie) nach Putzen. Anzahl der Beobachtungen: Probanden: n=27, Roboter: n=14. Aufgrund des stark unterschiedlichen Stichprobenumfangs wurde der t-Test nach Satterthwaite-Welch verwendet. (*), (**) bzw. (***) die Nullhypothese der Gleichheit der Mittelwerte kann bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von höchstens 10, 5 bzw. 1 % abgelehnt werden.

Tabelle A.7.a: Prozentualer Anteil plaque-behafteter Zahnfläche an der gesamten Zahnfläche (Roboterdaten) - lingual

Werte in %		Putztechnik 1, lingual			Putztechnik 2, lingual			Putztechnik 3, lingual		
		Abschnitt 1	Abschnitt 2	Abschnitt 3	Abschnitt 1	Abschnitt 2	Abschnitt 3	Abschnitt 1	Abschnitt 2	Abschnitt 3
Modell	Bürste									
1	A	26,40	33,89	42,35	30,88	37,28	40,01	22,66	39,29	42,79
2	A	27,28	35,04	50,26	32,26	25,83	35,65	27,36	43,34	52,25
3	A	25,20	36,34	40,55	29,67	38,88	48,06	22,46	50,04	52,96
4	A	29,53	33,71	39,32	33,72	45,07	39,75	25,62	46,41	53,12
5	A	28,22	29,47	45,35	30,49	52,39	52,20	24,40	46,21	57,47
6	A	32,06	38,46	43,38	26,51	37,63	40,97	27,19	49,18	54,05
7	A	32,95	26,99	44,28	25,06	32,87	42,83	27,15	45,09	54,01
1	B	26,30	21,44	43,31	22,41	26,41	33,47	38,79	68,09	76,00
2	B	23,23	28,05	30,57	21,79	22,26	35,96	32,85	58,74	65,19
3	B	17,87	26,73	33,47	17,68	21,19	27,57	35,84	56,04	67,41
4	B	27,86	28,46	37,48	29,07	30,16	27,80	35,23	73,38	80,55
5	B	25,94	24,42	36,69	32,91	42,86	43,15	34,00	63,41	74,27
6	B	22,86	24,95	37,49	22,11	25,80	48,74	45,26	77,16	81,02
7	B	24,58	20,97	33,04	36,04	27,18	31,13	30,50	47,03	63,77

Erläuterungen: Beispiel für die Berechnung der Werte: Putztechnik1, lingual, Modell 1, Bürste A, Abschnitt 1:26,40 Prozent. Aus der Datenbasis sind für diesen Abschnitt die folgenden Zahlen bekannt (vgl. Anhang 1 Datenbasis): lingual: 6624 von 38110 Pixeln sind plaque-behaftet; mesial: 12553 von 37849; distal: 13502 von 34820. Hilfshypothese: der mesiale und der distale Bereich ist je zur Hälfte dem lingualen Bereich zuzuordnen. Es folgt: $6624 + (12553/2) + (13502/2) = 19651,5$ Pixel im Vergleich zu $38110 + (37849/2) + (34820/2) = 74444,5$ möglichen Pixeln sind plaque-behaftet. Dies entspricht 26,40 Prozent der untersuchten Zahnfläche.

Tabelle A.7.b: Prozentualer Anteil plaque-behafteter Zahnfläche an der gesamten Zahnfläche (Roboterdaten) - vestibulär

Werte in %	Bürste	Putztechnik 1, vestibulär			Putztechnik 2, vestibulär			Putztechnik 3, vestibulär		
		Abschnitt 1	Abschnitt 2	Abschnitt 3	Abschnitt 1	Abschnitt 2	Abschnitt 3	Abschnitt 1	Abschnitt 2	Abschnitt 3
Modell										
1	A	16,79	22,51	33,88	25,13	27,01	35,13	16,73	23,78	37,31
2	A	25,07	27,96	41,52	13,36	20,69	27,69	20,33	29,89	36,17
3	A	16,15	23,90	32,38	19,66	26,88	32,44	19,93	33,81	34,96
4	A	18,11	20,88	30,63	24,76	28,76	33,93	18,23	33,75	45,64
5	A	15,06	19,73	32,57	31,36	44,77	38,54	20,81	29,86	40,25
6	A	17,68	21,39	32,02	20,62	26,64	32,81	25,63	31,83	41,47
7	A	23,19	20,76	30,11	16,96	24,19	33,74	19,40	42,48	41,52
1	B	12,32	18,17	28,95	11,78	20,74	35,91	52,70	43,34	58,60
2	B	13,29	21,80	29,52	11,91	16,25	27,20	30,50	40,99	41,77
3	B	14,85	20,22	47,26	10,05	16,17	21,13	47,78	54,58	51,02
4	B	18,75	21,41	28,14	19,73	26,83	24,58	40,84	56,09	69,04
5	B	16,16	18,13	28,77	31,62	26,63	35,37	38,53	67,31	56,55
6	B	14,01	17,80	28,99	12,32	18,23	28,04	56,60	40,28	70,91
7	B	10,27	17,74	27,40	20,43	20,43	22,45	24,87	42,32	49,95

Erläuterungen: siehe Tabelle A.7.a.

Tabelle A.8: Relevante Daten zur Ermittlung der Ausreißer nach GRUBBS

	Putztechnik 1			Putztechnik 2			Putztechnik 3		
	Abschnitt 1	Abschnitt 2	Abschnitt 3	Abschnitt 1	Abschnitt 2	Abschnitt 3	Abschnitt 1	Abschnitt 2	Abschnitt 3
Zahnbürste A, lingual									
Mittelwert	28,81	33,41	43,64	29,80	38,57	42,78	25,26	45,65	52,38
Minimum	25,20	26,99	39,32	25,06	25,83	35,65	22,46	39,29	42,79
Maximum	32,95	38,46	50,26	33,72	52,39	52,20	27,36	50,04	57,47
Standardabw.	2,88	3,95	3,59	3,07	8,47	5,59	2,13	3,62	4,55
Zahnbürste B, lingual									
Mittelwert	24,09	25,00	36,01	26,00	27,98	35,40	36,07	63,41	72,60
Minimum	17,87	20,97	30,57	17,68	21,19	27,57	30,50	47,03	63,77
Maximum	27,86	28,46	43,31	36,04	42,86	48,74	45,26	77,16	81,02
Standardabw.	3,26	2,99	4,14	6,74	7,22	7,95	4,80	10,45	7,17
Zahnbürste A, vestibulär									
Mittelwert	18,86	22,45	33,30	21,69	28,42	33,47	20,15	32,20	39,62
Minimum	15,06	19,73	30,11	13,36	20,69	27,68	16,73	23,78	34,96
Maximum	25,07	27,96	41,52	31,36	44,77	38,54	25,63	42,48	45,64
Standardabw.	3,77	2,78	3,83	5,94	7,67	3,26	2,78	5,66	3,71
Zahnbürste B, vestibulär									
Mittelwert	14,24	19,33	31,29	16,83	20,76	27,81	41,69	49,27	56,83
Minimum	10,27	17,74	27,40	10,05	16,17	21,13	24,87	40,28	41,77
Maximum	18,75	21,80	47,26	31,62	26,83	35,91	56,60	67,31	70,91
Standardabw.	2,73	1,77	7,08	7,70	4,46	5,87	11,54	10,27	10,48

Erläuterungen: Prozentualer Anteil plaque-behafteter Zahnfläche an der gesamten Zahnfläche. Zur Ermittlung des Testwertes nach GRUBBS vgl. RINNE (2003, S.548 f.).

Tabelle A.9: Vergleich der Mittelwerte Zahnbürste A und B – Abschnitte 1 bis 3 - (Roboterdaten, üblich)

lingual:

Zahn- abschnitt	Putztechnik 1			Putztechnik 2			Putztechnik 3		
	Zahnbürste A	Zahnbürste B	t-Wert	Zahnbürste A	Zahnbürste B	t-Wert	Zahnbürste A	Zahnbürste B	t-Wert
Abs 1	28,81	24,09	2,87 (**)	29,80	26,00	1,35	25,26	36,07	-5,44 (***)
Abs 2	33,41	25,00	4,49 (***)	38,57	27,98	2,52 (**)	45,65	63,41	-4,25 (***)
Abs 3	43,64	36,01	3,69 (***)	42,78	35,40	2,01 (*)	53,97	72,60	-6,16 (***)
gesamt	35,74	28,81	6,74 (***)	37,31	30,11	2,70 (**)	42,65	58,02	-5,27 (***)

vestibulär:

Zahn- abschnitt	Putztechnik 1			Putztechnik 2			Putztechnik 3		
	Zahnbürste A	Zahnbürste B	t-Wert	Zahnbürste A	Zahnbürste B	t-Wert	Zahnbürste A	Zahnbürste B	t-Wert
Abs 1	18,86	14,24	2,63 (**)	21,69	16,83	1,32	20,15	41,69	-4,80 (***)
Abs 2	22,45	19,33	2,51 (**)	28,42	20,76	2,29 (**)	32,20	49,27	-3,85 (***)
Abs 3	33,30	31,29	0,66	33,47	27,81	2,23 (**)	39,62	56,83	-4,10 (***)
gesamt	25,16	21,94	1,98 (*)	28,01	21,99	2,20 (**)	30,88	49,48	-5,97 (***)

Erläuterungen: Mittelwert des jeweiligen Prozentsatzes noch plaque-behafteter Zahnflächen pro Zahnabschnitt (übliches Verfahren) nach Putzen. Anzahl der Beobachtungen: n=7. Es wurde der Standard-t-Test verwendet. (*), (**) bzw. (***): die Nullhypothese der Gleichheit der Mittelwerte kann bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von höchstens 10, 5 bzw. 1 % abgelehnt werden.

Tabelle A.10: Vergleich der Mittelwerte Zahnbürste A und B – Abschnitte 1 bis 3 - (Roboterdaten, Planimetrie)

lingual:

Zahn- abschnitt	Putztechnik 1			Putztechnik 2			Putztechnik 3		
	Zahnbürste A	Zahnbürste B	t-Wert	Zahnbürste A	Zahnbürste B	t-Wert	Zahnbürste A	Zahnbürste B	t-Wert
Abs 1	20,63	18,65	0,47	20,63	15,48	2,15(*)	17,46	22,62	-1,23
Abs 2	28,04	14,29	3,86 (***)	25,40	10,58	3,02 (**)	46,03	65,61	-5,95 (***)
Abs 3	62,70	45,24	4,31 (***)	53,17	40,48	1,71	72,22	98,41	-7,32 (***)
gesamt	32,45	23,10	3,69 (***)	29,45	19,40	2,99 (**)	39,15	53,79	-5,59 (***)

vestibulär:

Zahn- abschnitt	Putztechnik 1			Putztechnik 2			Putztechnik 3		
	Zahnbürste A	Zahnbürste B	t-Wert	Zahnbürste A	Zahnbürste B	t-Wert	Zahnbürste A	Zahnbürste B	t-Wert
Abs 1	13,10	1,19	5,14 (***)	16,67	2,78	5,12 (***)	8,33	45,63	-6,76 (***)
Abs 2	23,81	14,81	2,56 (**)	26,98	11,11	4,67 (***)	20,63	47,62	-4,66 (***)
Abs 3	24,60	15,08	2,22 (**)	32,54	11,90	4,94 (***)	30,16	71,43	-4,75 (***)
gesamt	19,22	8,81	4,04 (***)	23,63	7,58	5,90 (***)	17,28	52,03	-5,75 (***)

Erläuterungen: Mittelwert des jeweiligen Prozentsatzes nicht vollständig gereinigter Zahnfelder pro Zahnabschnitt (Planimetrie) nach Putzen. Anzahl der Beobachtungen: n=7. Es wurde der Standard-t-Test verwendet. (*), (**) bzw. (***) die Nullhypothese der Gleichheit der Mittelwerte kann bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von höchstens 10, 5 bzw. 1 % abgelehnt werden.

Tabelle A.11: Vergleich der Mittelwerte Zahnbürste A und B – Abschnitte 1 bis 3 - (Probandenstudie, Planimetrie)

lingual:

Zahn- abschnitt	Putztechnik 1			Putztechnik 2			Putztechnik 3		
	Zahnbürste A	Zahnbürste B	t-Wert	Zahnbürste A	Zahnbürste B	t-Wert	Zahnbürste A	Zahnbürste B	t-Wert
Abs 1	30,98	28,77	0,38	30,13	29,37	0,12	33,33	28,77	0,69
Abs 2	33,05	34,92	-0,43	37,61	30,16	1,09	37,89	37,57	0,06
Abs 3	41,88	34,92	1,04	50,43	37,30	1,90 (*)	49,57	46,03	0,84
gesamt	34,09	32,19	0,47	37,13	31,39	1,02	38,46	35,54	0,64

vestibulär:

Zahn- abschnitt	Putztechnik 1			Putztechnik 2			Putztechnik 3		
	Zahnbürste A	Zahnbürste B	t-Wert	Zahnbürste A	Zahnbürste B	t-Wert	Zahnbürste A	Zahnbürste B	t-Wert
Abs 1	29,70	19,04	2,16 (**)	22,65	16,67	1,18	26,92	22,82	0,86
Abs 2	36,47	24,34	2,36 (**)	31,05	24,87	1,24	32,19	29,37	0,55
Abs 3	44,87	36,90	1,35	47,44	38,10	1,67	47,01	39,29	1,55
gesamt	35,33	24,78	2,39 (**)	30,96	24,16	1,57	33,14	28,66	1,18

Erläuterungen: Mittelwert des jeweiligen Prozentsatzes nicht vollständig gereinigter Zahnfelder pro Zahnabschnitt (Planimetrie) nach Putzen. Anzahl der Beobachtungen: Zahnbürste A: n=13, Zahnbürste B: n=14. Es wurde der Standard-t-Test verwendet. (*), (**) bzw. (**): die Nullhypothese der Gleichheit der Mittelwerte kann bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von höchstens 10, 5 bzw. 1 % abgelehnt werden.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich denjenigen Personen herzlich danken, die zu dem Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Herrn Prof. Dr. med. dent. Dr. h.c. Peter Gängler danke ich für die Annahme und Betreuung meiner Dissertation sowie für die bereichernden Gespräche und Anregungen. Vor allem seine konstruktive Kritik und allzeitige Gesprächsbereitschaft waren mir eine große Hilfe.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Dr. med. dent. Lang der die Idee zu dieser Arbeit hatte. Seine hervorragende, kontinuierliche Unterstützung und fachkundige Unterstützung waren die wohl größte Hilfe bei dieser Arbeit.

Frau Dr. Barbara Jennes danke ich vielmals für die überaus kompetente statistische Auswertung meiner Daten und geduldigen Erläuterungen der Verfahren.

Der Abteilung für Kieferorthopädie der Universität Witten/Herdecke danke ich für die freundliche Bereitstellung ihrer Räumlichkeiten zur Durchführung meiner klinischen Untersuchung, sowie dem Institut für Anatomie der Universität Witten/Herdecke zur Bereitstellung des Forschungslabors für meine Laboruntersuchungen.

Mein größter Dank gilt meinen Eltern, die mir zu jeder Zeit zur Seite standen und mir stets mit Liebe, Rat und Fürsorge halfen, meinen Lebensweg bis zu diesem Punkt zu beschreiten. Ein Dank der nicht in Worte zu fassen ist.

Lebenslauf

Sebastian Staufer

Persönliche Daten:

Geburtsdatum: 11.05.1986
Geburtsort: Essen
Eltern: Joachim Staufer
Dr. Kirsten Staufer geb. Walter

Staatsangehörigkeit: deutsch

Schulausbildung:

08/1993 bis 07/1996 Schule an der Jakobsallee, Essen
08/1996 bis 06/2005 Goetheschule, Essen
2005 Abitur

Hochschulausbildung:

10/2005 bis 12/2010 Studium der Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde an der Universität Witten/Herdecke
06/2008 Aufnahme in die Studienstiftung des deutschen Volkes
2010 Staatsexamen und Approbation

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere (an Eides statt), dass ich die zur Erlangung des Doktorgrades der Zahnheilkunde vorgelegte Dissertationsschrift mit dem Thema „Klinische Validierung einer robotergestützten Methode zur Beurteilung der Reinigungseffizienz von Handzahnbürsten“ selbstständig und ohne fremde Hilfe angefertigt und die in der Arbeit verwendete Literatur vollständig zitiert habe.

Ich habe diese Dissertation weder in dieser noch in einer ähnlichen Form an einer anderen Hochschule eingereicht.