

3. Material und Methode

3.1. Versuchsaufbau

3.1.1. Herstellung eines Ur-Kiefers

Es wurde ein stilisiertes Oberkiefermodell aus Aluminium gefräst (Abb. 3.1.), welches mit dem Silikon Protesil[®] der Firma Austenal-Medizintechnik doubliert wurde. Das Modell orientiert sich in seiner Grundform und den Abmessungen an den Modellen, die in den Studien zum Formverhalten von JAGGER, HUGGETT et al. [35, 33,19] Anwendung fanden. Nach der Aussage von JAGGER sind die Maße frei wählbar. Das Verhältnis von Palatinalwölbung zum Kieferkammwinkel wurde der biometrischen Studie von KÖRBER entnommen (Abb. 3.2.). [36, 39]

Mit den gewonnenen Silikonformen aus Protesil wurden Gipsmodelle aus Hartgips der Klasse III hergestellt.

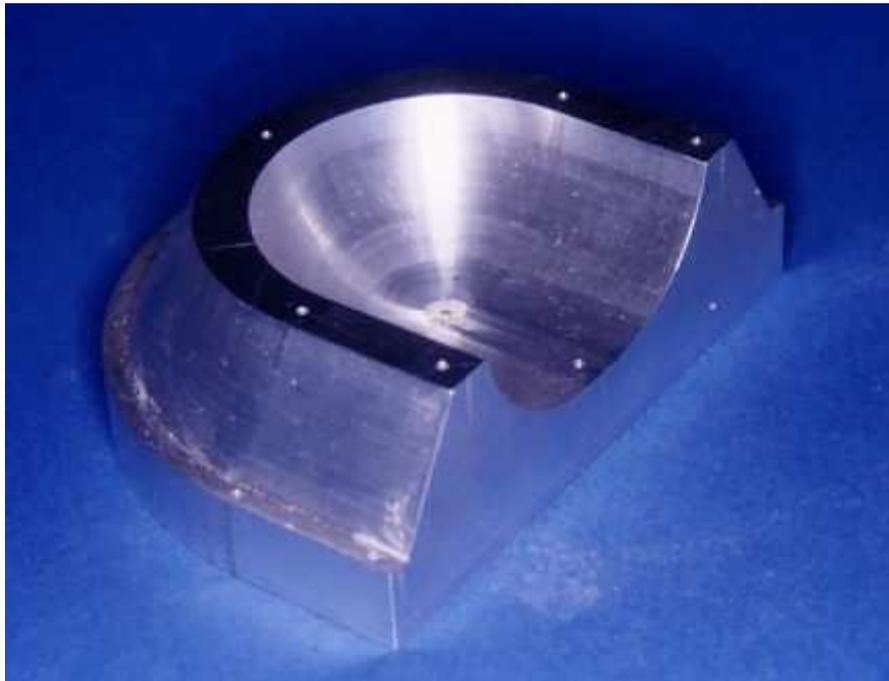


Abbildung 3.1.: Metallkiefer

Stilisierter Oberkiefer

- Konstruktionszeichnung -

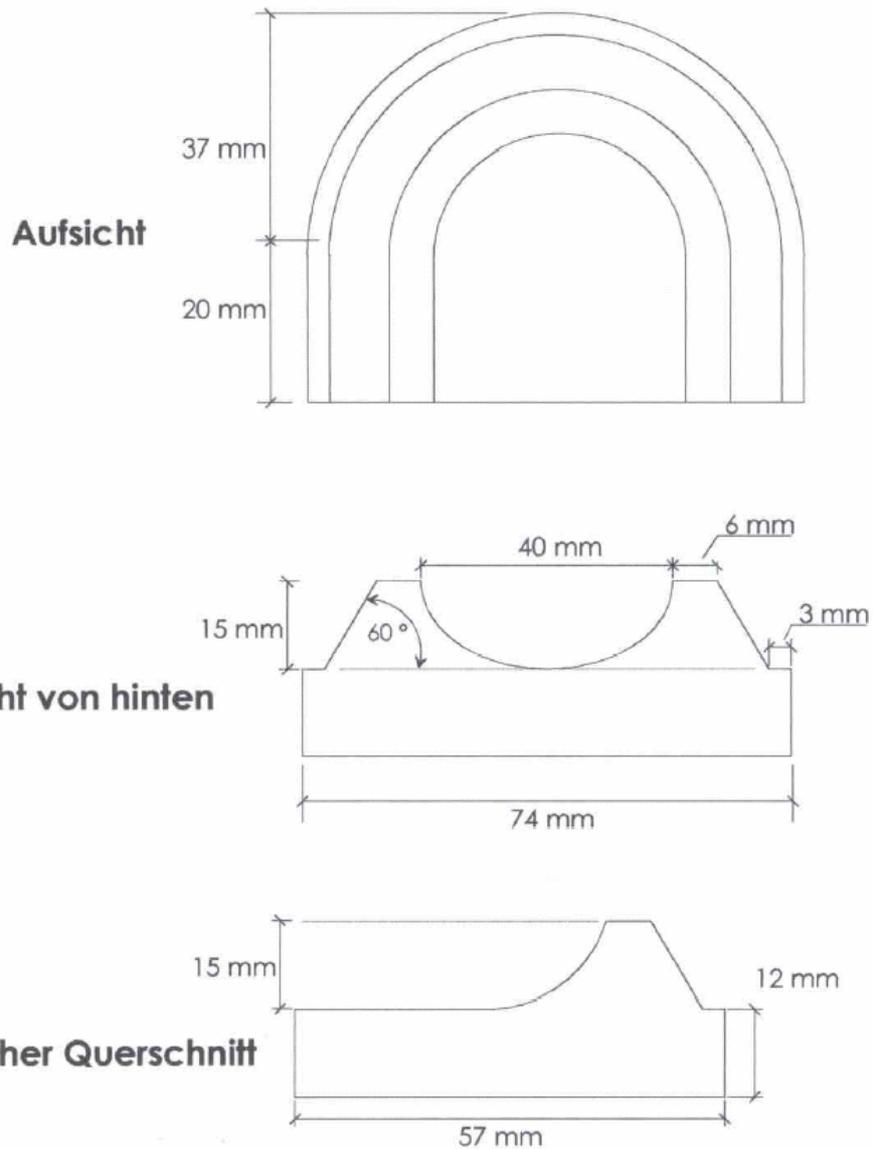


Abbildung 3.2.: Konstruktionszeichnung stilisierter Metallkiefer

Auf diesen Modellen sollten die Probekörper nach dem Paladon-Verfahren hergestellt werden. Um die Modellation jedes einzelnen Prothesenkörpers zu umgehen, wurde eine „Ur-Prothese“ aus einer CoCr-Legierung auf einem Einbettmassenmodell gegossen. Diese Prothese wurde von der Innenseite her skelettiert. (Abb. 3.3.) Grund hierfür ist der limitierende Faktor der maximalen zu vergießenden Menge an Metall mit der vorhandenen Gussanlage.

Hierzu wurde zunächst ein Kiefermodell mit einem Platzhalter versehen. Auf ein Gipsmodell wurden Wachsplatten einer Stärke von 1 mm wie zur Modellation einer Basisplatte für eine Prothese aufgebracht. In dem Wachs wurden 3 mm breite Kanäle angelegt, die bis auf den Gips stießen. Diese Kanäle wurden so angelegt, dass die später gewonnene Prothese mit dem Modellrand abschloss. Das Platzhaltermodell wurde mit Protesil® doubliert, so dass mit Einbettmasse ein identisches Modell gewonnen werden konnte. Auf diesem Modell erfolgte nun die Modellation der Prothesenbasis mit 1 mm starkem Plattenwachs und anschließend die Umsetzung in Metall.



Abbildung 3.3.: Einbettmassenmodell und „Ur-Prothese“ (Innenseite)

Die so gewonnene Ur-Prothese wurde auf Hochglanz poliert und an drei Stellen auf dem Kieferkamm mit einer runden Vertiefung von etwa 5 mm Durchmesser und 2 mm Tiefe versehen (Abb. 3.4. und 3.5.).

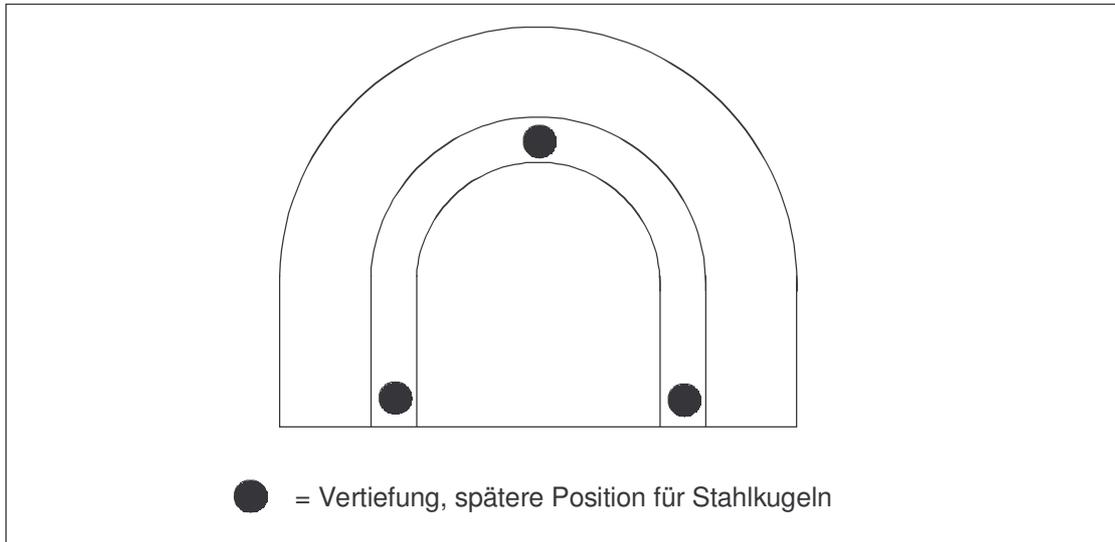


Abbildung 3.4.: Schematische Aufsicht auf Prothesenkörper mit Position der Vertiefung/ Kugeln



Abbildung 3.5.: Metallprothese Aufsicht

3.1.2. Herstellung der Probekörper

Es wurden nun Formen für die Kalt- und Heißpolymerisation mittels der oben genannten Metallprothese und den Kiefermodellen aus Hartgips hergestellt.

Für die Heißpolymerisation wurden Messingküvetten für das Stopf-Press-Verfahren verwendet. Die Modelle wurden in ein 1:1 - Gemisch von Hart- und Alabastergips eingebettet, die Urprothese an das Modell angewachst und anschließend der Konter gegossen.

Die Kaltpolymerisation fand als Injektionsverfahren in den Unipress[®]-Küvetten der Firma Schütz-Dental statt. Die Herstellung der Formen erfolgte analog der Heißpolymerisation. (Abb. 3.6.)

Für den Vor- und Hauptversuch wurden die Probekörper jeweils zeitgleich hergestellt. Zur Anwendung kam für die Heißpolymerisation der Dentalkunststoff Vitron H[®] der Firma 3MEspe[®], der bei 90 °C 10 Stunden lang polymerisierte. Für die Kaltpolymerisation wurde Weropress[®] der Firma Merz-Dental[®] verwendet. Die Verarbeitung erfolgte gemäß Herstellerangaben (siehe Anhang). Die Küvettenhälften wurden vor dem Einbringen des Kunststoffs mit zwei Schichten Isolant[®] der Firma Detrey-Dentsply isoliert.

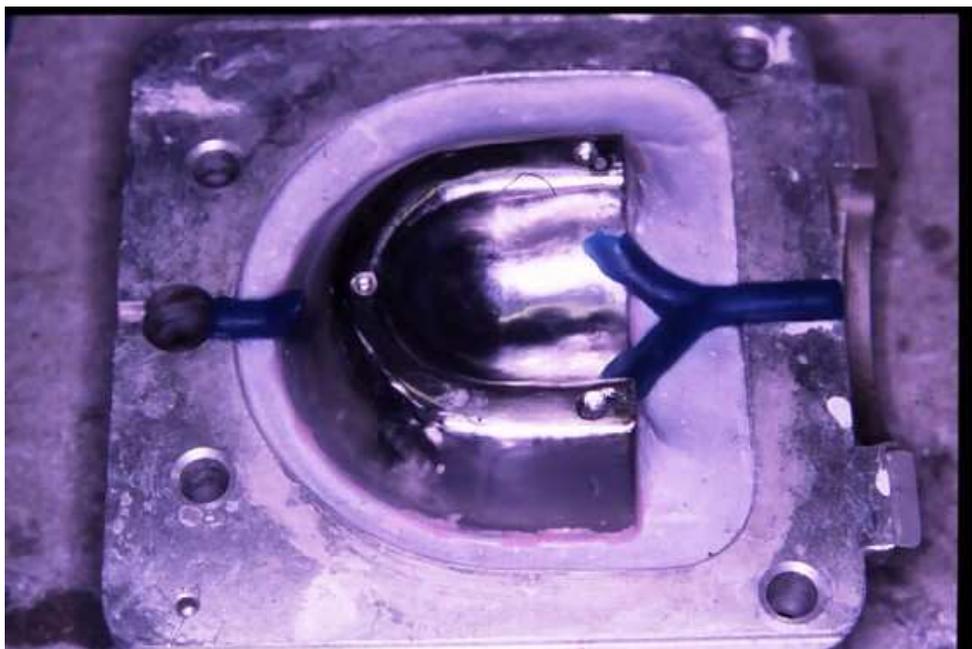


Abbildung 3.6.: Herstellung der Formen für die Probekörper (Unipress[®])

Nach der Polymerisation wurden die Prothesenkörper mit einer Fräse von Überschüssen und Pressfahnen befreit und nach Sandpapier- und Bimssteinbearbeitung auf Hochglanz poliert.

Anschließend wurden die drei runden Vertiefungen auf der Oberseite des Kieferkammes mit einer Fräse aufgeraut. Mit einem Einrichtschlüssel aus Hartgips, der durch Doublieren der späteren Messaufnahme gewonnen wurde, erfolgte das Einpolymerisieren schwerkorrodierbarer Stahlkugeln, die einen Durchmesser von 4 mm haben. Die Aufnahmen der Stahlkugeln wurden in dem Einrichtschlüssel durch 2 mm starke Kunststoffplättchen mit einer Bohrung von 4 mm ersetzt, um eine gesicherte Position der Stahlkugeln zu gewährleisten (Abb. 3.7.).

Für die Probekörper aus Vitron H[®] wurde das Kaltpolymerisat Vitron M[®] benutzt, für die aus Weropress[®] das gleiche Material. Vor der Polymerisation erfolgte eine Isolierung des Einrichtschlüssels mit Isolant[®]. Die Polymerisation erfolgte im



Abbildung 3.7.: Einrichtschlüssel für die Metallkugeln

Drucktopf im Wasserbad für die Dauer von 15 Minuten. Um genügend Retention zu schaffen, wurden die Stahlkugeln im äußeren Drittel einer Hälfte mittels einer Edelmetalltrennscheibe (22x1) zirkulär mit einem Schlitz versehen.

3.1.3. Optischer Scanner „digiscan®“

Für die Messungen wurde ein optischer Scanner, digiscan®, der Firma Girrbach verwendet.

Die Anlage besteht aus einer CCD-Kamera, einem Projektor für strukturiertes Licht und einer Objekthalterung. Auf einem exzentrisch an einem Drehtisch angebrachten Stativ ist die Kamera befestigt, in deren Focusbereich sich die Aufnahme für die Messobjekte befindet. Diese besteht wiederum aus einem Drehtisch, in dessen Aufnahme verschiedene Halter eingebracht werden können. Die Drehachse ist zur Focusebene um 30° geneigt. Außerhalb des Drehtisches mit der Kamera und der Objektaufnahme befindet sich ein Projektor, der im Winkel von 35° zur Kamera steht (Abb. 3.8.).

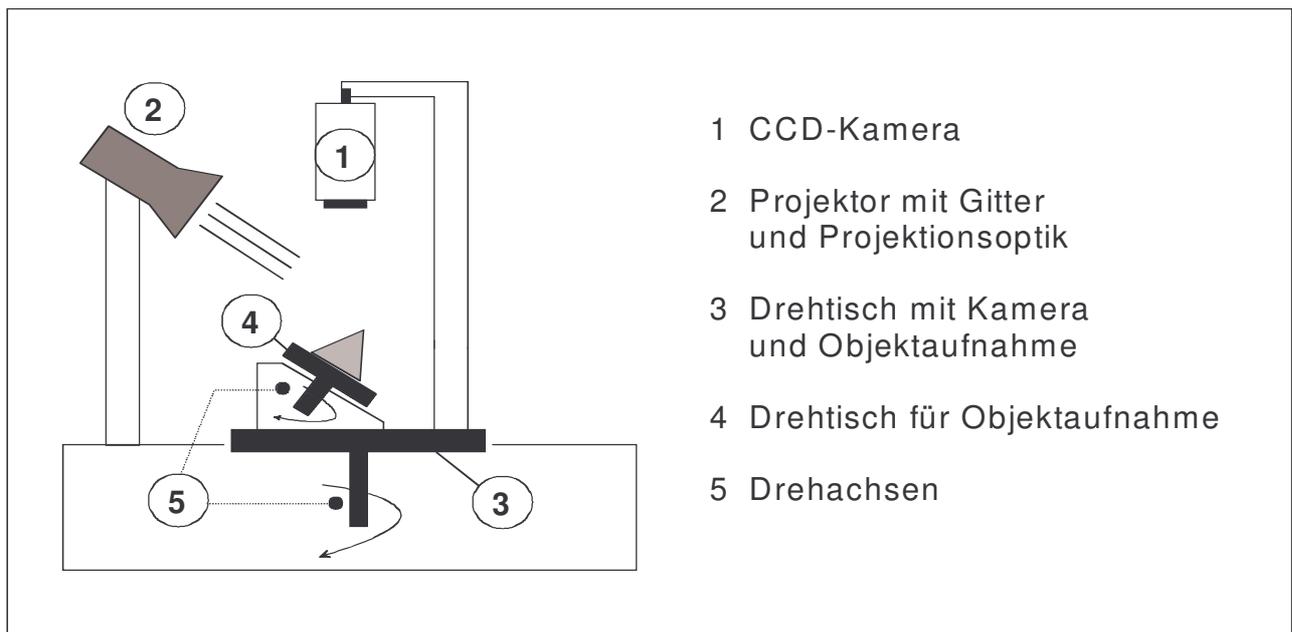


Abbildung 3.8.: Schematischer Aufbau des Messgerätes

Die gesamte Anlage ist mit einem Gehäuse gegen Umgebungslicht abgeschirmt. Es lassen sich Messvolumina mit einem Durchmesser von 30 - 90 mm und einer Höhe von 15 - 25 mm erfassen. Sie arbeitet mit einem speziellen Streifenprojektionsverfahren, das eine berührungslose, hochgenaue Vermessung ermöglicht.

Der Hersteller gibt die Messunsicherheit für die Koordinatenmessung mit $\pm 16 \mu\text{m}$ für den genannten Volumenbereich an. Für einen Messgang werden je nach Objektform und den gewünschten Anforderungen 200 bis 400 Sekunden benötigt.

Das Einmessen sowie die Messwertaufnahme und Koordinatenberechnung sind voll automatisiert und rechnergesteuert. Als Ergebnis erhält man ein Koordinatentripel der Messpunkte. Die Anzahl der Messpunkte ist durch die Anzahl der Empfängerelemente der Aufnahmekamera bestimmt und beläuft sich auf 512×512 Messpunkte je Teilansicht. Eine Objektdrehung bei der Erfassung ermöglicht auch eine weitgehende vollständige Vermessung geometrisch komplizierter Körper.

Die so gewonnenen Teilansichten werden automatisch zu einem Gesamtbild zusammengefügt. [45]

3.1.4. Präparation und Positionierung der Probekörper

Die Aufnahme für die Prothesen in der digiscan[®]-Anlage sollte möglichst eine sichere Lage bei der Vermessung ermöglichen, da das Objekt während des Messvorganges auf dem Drehtisch rotiert. Ebenso sorgt die reproduzierbare Objektposition bei wiederholten Messvorgängen für eine gleichbleibende Objektansicht und damit konstante Bedingungen für die optische Vermessung.

Die Protheseninnenseite wurde nach Rücksprache mit dem Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik mit den Kieferkämme parallel zur Focusebene vermessen. Hierzu wurde ein konfektionierter Halter mit einem 30° -Keil aus Aluminium ergänzt und auf diesen eine Aufnahme für die Prothesen gesetzt (Abb. 3.9. / 3.10.).

Zur sicheren Fixierung der Prothesen (Abb. 3.9a.) dienen die drei einpolymerisierten Stahlkugeln. Die Stahlkugeln werden durch Starkmagnete, die in der Aufnahmehalterung der digiscan[®]-Anlage eingelassen sind, gehalten. Zwei der Magnete sind mit einem Führungsschuh versehen, so dass eine Fixierung der Position gegeben ist, jedoch etwaige Streckenänderungen bei Verformung zwischen den Kugeln kompensiert werden können.

Um Reflexionen auf der spiegelnden Oberfläche auszuschalten, wurden alle Prothesen vor der Vermessung mit rotem Arti-Spot® beschichtet. Das Auftragen erfolgte mit einer Air-Brush-Pistole der Firma Efbe®, Typ Easy Action. Im Abstand von etwa 200 mm wurden die Protheseninnenseiten mit einem dünnen Film besprüht. Es wurde ein nicht flächendeckender Film aufgetragen, der das optische Abtasten der Objektoberfläche ermöglichte. Die Auftragsstärke erfolgte visuell. Vor Beginn der Versuchsreihe wurden Versuchskörper beschichtet und unter dem Mikroskop hinsichtlich der Deckungsintensität betrachtet. Es konnte so ein Vergleichsmuster zur visuellen Kontrolle gewonnen werden.

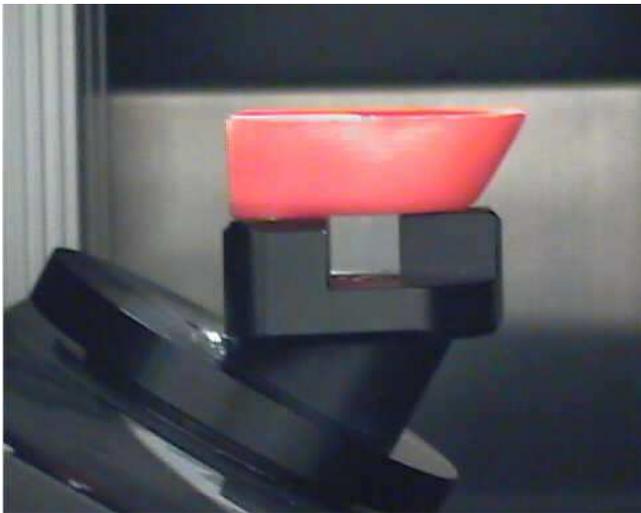


Abbildung 3.9:
Modifizierte Objektaufnahme mit
eingesetztem Probekörper in der
digiscan-Anlage®



Abbildung 3.9a:
Innen- und Aussenansicht
der Probekörper

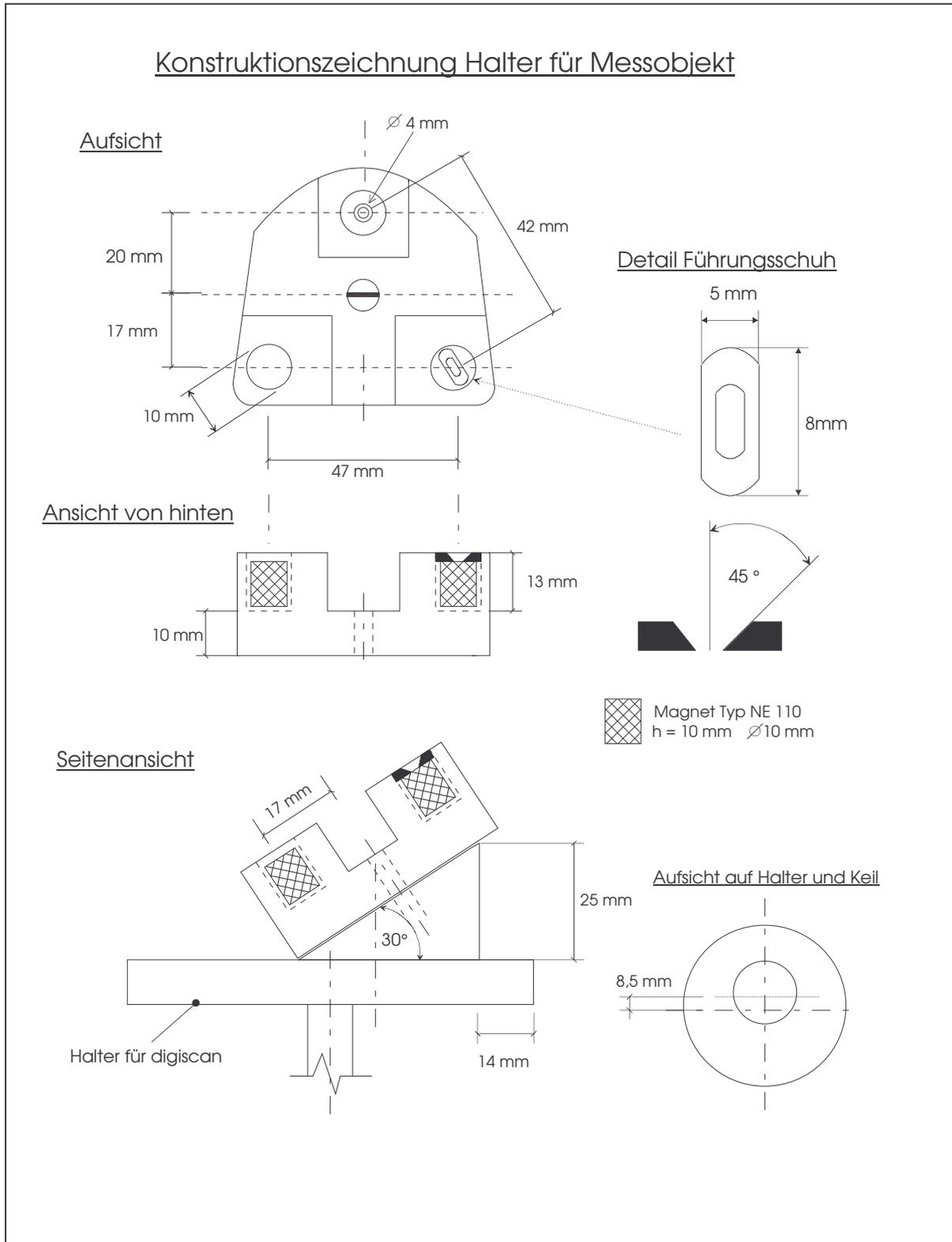


Abbildung 3.10.: Konstruktionszeichnung des Halters für die Messobjekte

3.1.5. Datensatzgewinnung und -weiterverarbeitung

Die digiscan[®]-Anlage wurde vor jeder Versuchsreihe neu eingeschaltet und automatisch mit den dafür vorgesehenen zwei Kalibrierkörpern eingemessen.

Für die Vermessung der Prothesen wurde ein spezieller Messplan im Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik (IOF) Jena erstellt. Mit diesem Messplan wird eine Prothese innerhalb von 2 Minuten und 23 Sekunden optisch erfasst. Der Messplan arbeitet mit einer Drehung des Objektes in der Ebene parallel zur Tischebene mit insgesamt 15 Positionswechseln im Abstand von $22,5^\circ$ zueinander.

Alle Bildeinstellungen, die von der Software vorgegeben sind, wurden übernommen. Lediglich die Blende wurde für die Messaufnahmen im Bereich $F = 65 - 70$ nach Bedarf variiert. Die Einstellung erfolgte über die visuelle Kontrolle auf dem Bildschirm. Eine softwaregesteuerte Einfärbung der Bezirke mit Über-, beziehungsweise Unterbelichtung stand als Hilfswerkzeug zur Verfügung.

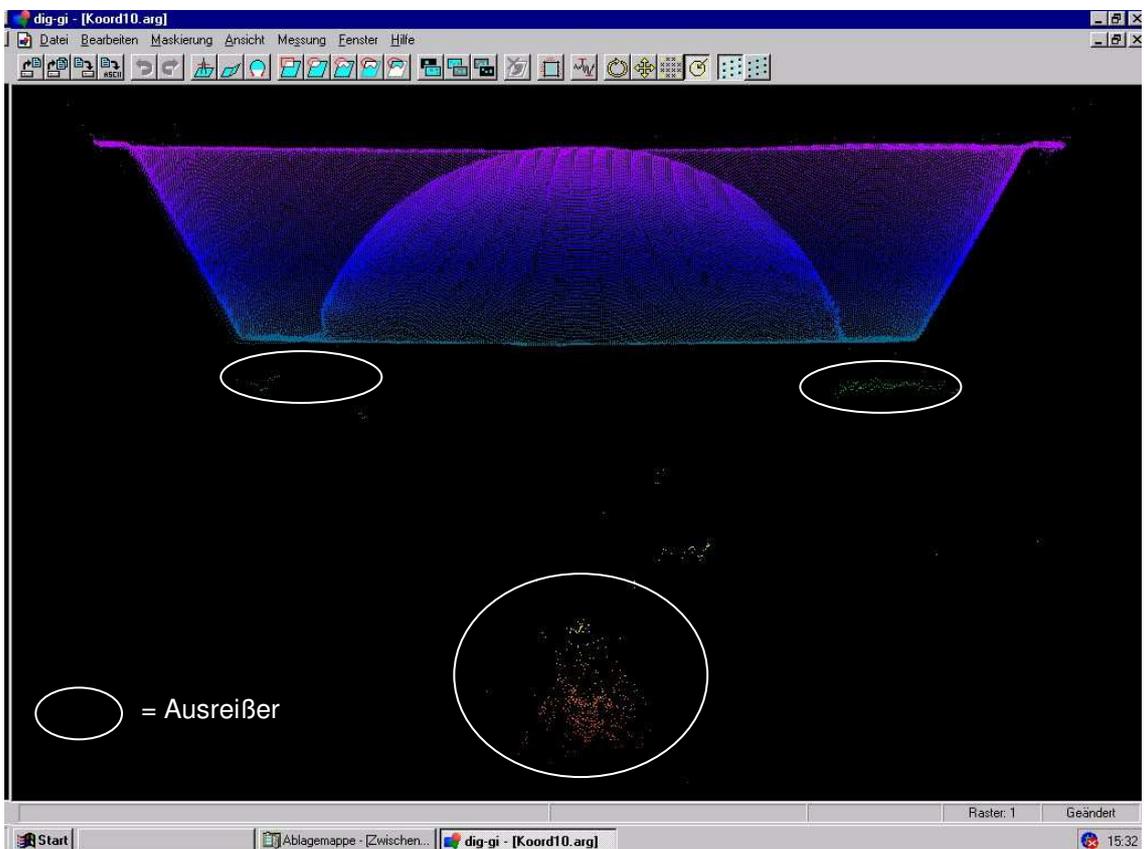


Abbildung 3.11.: Screenshot Rohdaten mit Ausreißern

Die auf dem Rechner gewonnenen Daten der optischen Abtastung wurden mit dem Programm „ARGUS“ weiterbearbeitet (Abb.3.11.). Zunächst wurden nach einem vorgegebenen Algorithmus Ausreißer entfernt, das heißt Punkte, die sich außerhalb der Objektwolke befanden. Mit einem Drehwerkzeug des Programms konnte nun das Objekt aus gewünschten Positionen betrachtet werden, es erfolgte so visuell eine Kontrolle der Aufnahme. Anschließend erfolgte die Datensicherung im Format „ARGUS“.

Zur Ermittlung der Formänderung sollten die gewonnen Datensätze miteinander verglichen, das heißt, rechnergestützt sollte ein Oberflächenvergleich vorgenommen und in geeigneter Form dargestellt werden.

Mit der im Konrad-Zuse-Institut Berlin entwickelten Software Amira[®] konnte dieser Gedankengang realisiert werden. Um die gewonnen Datensätze mit dieser Software verarbeiten zu können, musste die nachfolgende Formatumwandlung erfolgen:

Dateibezeichnung	Dateityp
ARGUS	3-D-Darstellung der gemessenen Punktwolke
↓ Umwandlung im ARGUS-Programm ↓	
ASCII	3-D-Koordinaten-Austauschformat
↓ Umwandlung mit einem Tool ↓	
PSI	für AMIRA

Für den Formenvergleich wurde aus den Punktwolken in AMIRA[®] eine aus Dreiecken bestehende Fläche regeneriert.

Zwei so gewonnene Polygonflächen konnten nun miteinander verglichen werden. Gewöhnlich folgt eine Abstandsmessung der Flächen zueinander, orientiert am 3-D-Koordinatensystem. Hierbei können allerdings Fehler auftreten, die aus der nicht exakt reproduzierbaren Objektposition bei wiederholter Messung resultieren. Aus diesem Grunde wurden die Flächen über einen Algorithmus aligniert, das heißt, der Rechner versucht die zwei zu vergleichenden Flächen so lange in ihrer Position zueinander zu verschieben, bis eine größtmögliche Übereinstimmung der Formen besteht. Die gemessenen Abweichungen können mit den entsprechenden Rechenoperationen minimiert werden, dieser Vorgang wird auch als „Best-Fit-Methode“ bezeichnet.

Die Ausgabe der Differenzen erfolgte mit einer Fehlerfarbdarstellung: einem bestimmten Messwert wird eine entsprechende Farbe zugeordnet, mit einer Farbskala kann das erhaltene Bild visuell ausgewertet werden (Abb.3.12.). Mit Histogrammen können die angezeigten punktuellen Abweichungen quantifiziert werden. Ferner ist die Projektion von Richtungsvektoren auf der Objektoberfläche möglich, so kann die Richtung der Formänderung ermittelt werden.

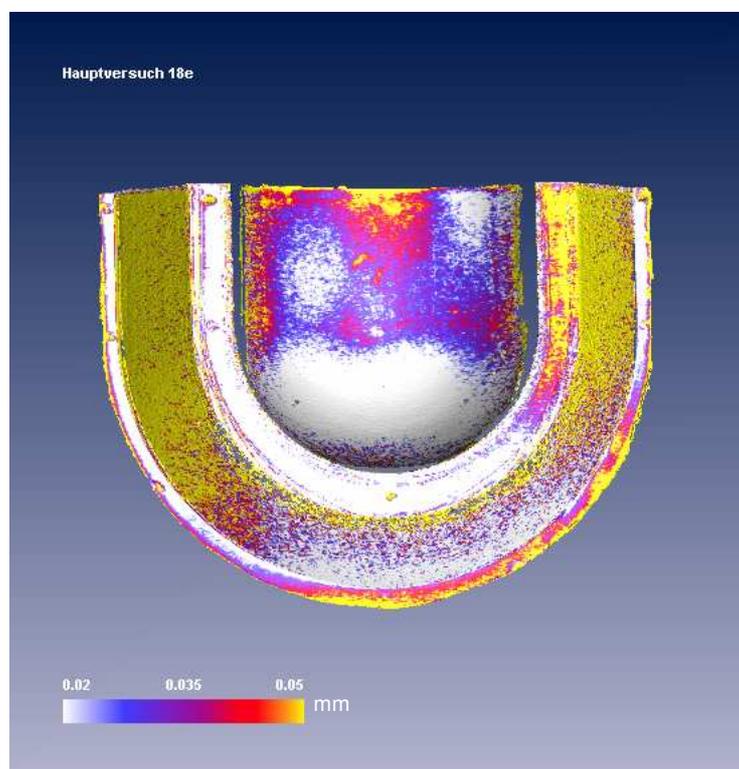


Abbildung 3.12.: Fehlerfarbdarstellung mit dem Programm Amira

3.2. Vorversuche

3.2.1. Prüfung von PMMA und der Stahlkugeln im Geschirrspüler

In einem einfachen Vorversuch sollte geklärt werden, ob und in welcher Größenordnung Veränderungen bei dentalem PMMA im Geschirrspüler auftreten. Im Rahmen dieses Versuches wurde auch die Korrosionsfestigkeit der Stahlkugeln für die Halteraufnahme in einer Geschirrspülmaschine getestet und deren Verbundfestigkeit am Ort der Einpolymerisation. Die verwendeten Stahlkugeln sind als schwer korrodierbar ausgewiesen und weisen einen hohen Anteil an Eisen auf. Für den Vorversuch wurden acht Plättchen (Abb. 3.13.) aus Vitron H[®] mit den Abmessungen von 40 x 60 mm und einer Stärke von 2 mm zwischen zwei Glasplatten von 5 mm Stärke im Paladon-Verfahren gepresst. Die gewonnenen Plättchen wiesen bereits nach der Polymerisation einen Hochglanz auf und mussten nur noch an den Rändern mit einer Fräse entgratet werden. Die Plättchen lagen makroskopisch spaltfrei auf der Glasplatte auf.

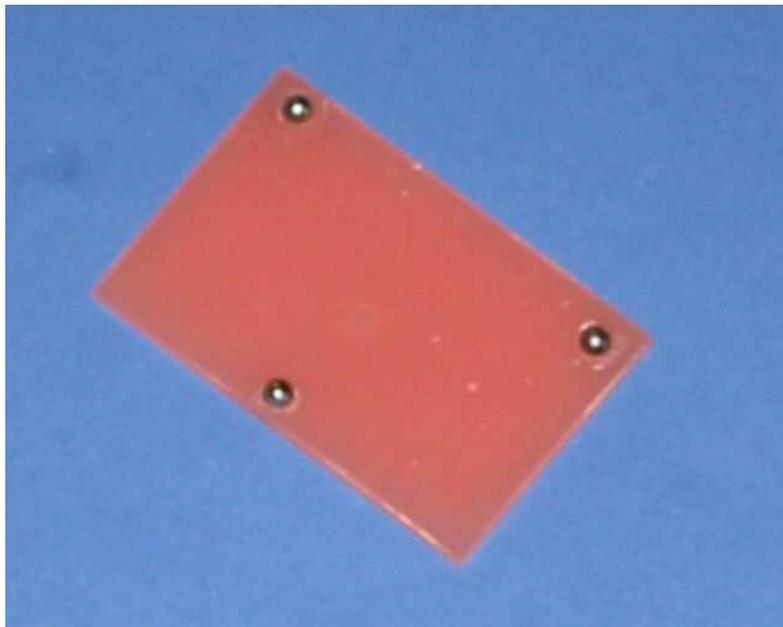


Abbildung 3.13.: PMMA-Plättchen für den Vorversuch

Für die Aufnahme der Stahlkugeln wurden die Platten mit drei Mulden von 5 mm Durchmesser und etwa 1,5 mm Tiefe versehen. In diese Vertiefungen wurden geschlitzte Stahlkugeln mit Vitron M[®] einpolymerisiert.

Fünf dieser Plättchen wurden in den Besteckkorb eines Haushaltsgeschirrspülers gegeben und unter Zuladung von anfallendem Geschirr und Besteck täglich einem Normal-Spülgang unterzogen. Die drei verbliebenden Plättchen wurden als Rückstellmuster am Aufstellort der Geschirrspülmaschine gelagert. Im wöchentlichen Intervallen erfolgte eine visuelle Kontrolle des PMMA, der Stahlkugeln und deren Verbundstellen sowie der Versuch des Lösens der Kugeln mit einer Zange. Ferner wurden die Plättchen auf eine Glasplatte gelegt und auf Planizität überprüft. Die Plättchen blieben insgesamt einen Monat durchgehend im Haushaltsgeschirrspüler.

3.2.1.1. Ergebnis des Vorversuchs

Das PMMA, die Stahlkugeln und die Verbundstelle zeigten auch nach einem Monat makroskopisch keine Stellen von Korrosion. Keine der Kugeln hatte sich gelöst. Sie konnten auch nicht durch abziehende Kräfte gelöst werden. Die Plättchen lagen plan auf der Glasplatte auf. Es konnte keine stärkere Formveränderung makroskopisch festgestellt werden. Die glänzende Oberfläche war ohne sichtbare Veränderungen.

3.2.1.2. Schlussfolgerung

Dentales PMMA vom Typ Vitron H[®] erfährt in Plattenform in der beschriebenen Größe im Geschirrspüler makroskopisch keine Formänderung oder Materialschädigung sichtbar als Trübung, Glanzverlust oder in Form von Rissen.

Die Stahlkugeln sowie die gewählte Befestigungsmethode sind für weitere Versuche in der Geschirrspülmaschine geeignet.

3.2.2. Optische Vermessung von Zahnersatz aus PMMA

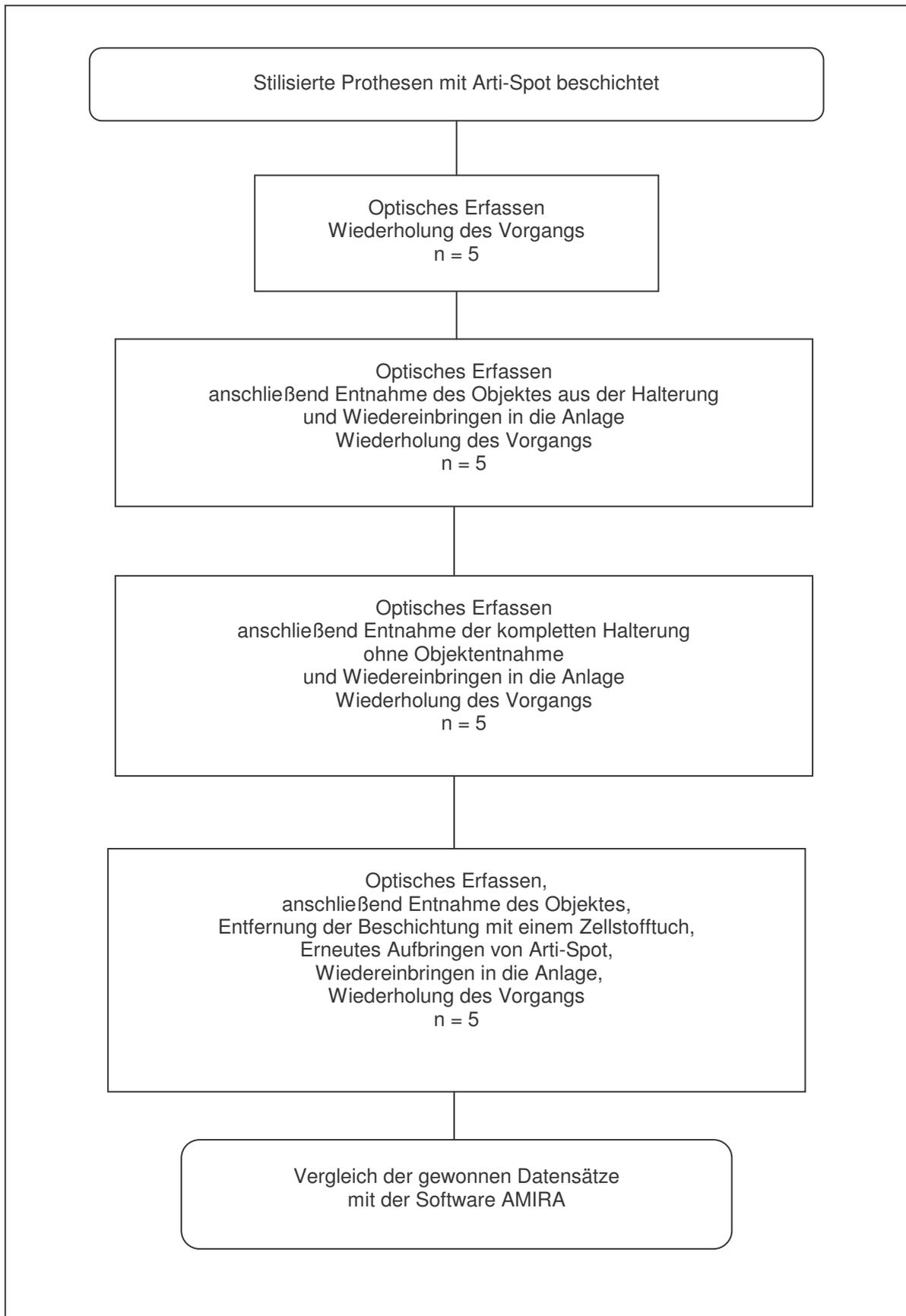
In einem weiteren Vorversuch sollte geklärt werden, ob eine optische Vermessung von Prothesen aus PMMA überhaupt möglich und ob die Reproduzierbarkeit des gewählten Messaufbaus gegeben ist. Eine Schwierigkeit stellte das rosa gefärbte dentale PMMA durch seine Transparenz und die Spiegelung der polierten Oberfläche in Verbindung mit der strukturierten Beleuchtung dar.

Für die Vorversuche wurden fünf der oben genannten Probekörper hergestellt und mit dem digiscan[®] optisch erfasst. Es wurden an mehreren Tagen Messserien durchgeführt, die eine Entnahme der Probekörper und deren Halter sowie einen Wechsel der Beschichtung vorsahen (Tab. 3.1.). Die gewonnen Datensätze wurden einem Formvergleich unterzogen. Dabei stellte der erste Datensatz einer jeden Prothese das Master dar. Die nachfolgend gewonnenen Formdaten wurden jeweils einem Vergleich mit ihrem Master unterzogen. Die Ergebnisse wurden visuell und durch Erstellung von Histogrammen ausgewertet. Am Ende erfolgte die Ermittlung des Systemfehlers der Messmethode.

Im Laufe der Vorversuche wurde die Serie mit Beschichtungswechsel wiederholt und durch Veränderung der Beschichtungsmethode das Messergebnis optimiert.

Die Düsenöffnung der Air-Brush-Pistole wurde auf ein Minimum reduziert. Nach dem Beschichten erfolgte ein Abblasen der Prothesen mit Druckluft. Der Belag wurde auf diese Weise sichtbar reduziert und Pulverinseln beseitigt.

Tabelle 3.1.: schematischer Ablauf des Vorversuchs



3.2.2.1. Ergebnisse des Vorversuchs

Um bei der weiteren Auswertung der Daten und deren Beschreibung eine Orientierung am Messobjekt zu haben, wurde eine Parzellierung am Messobjekt vorgenommen, die der Abbildung 3.14. entnommen werden kann.

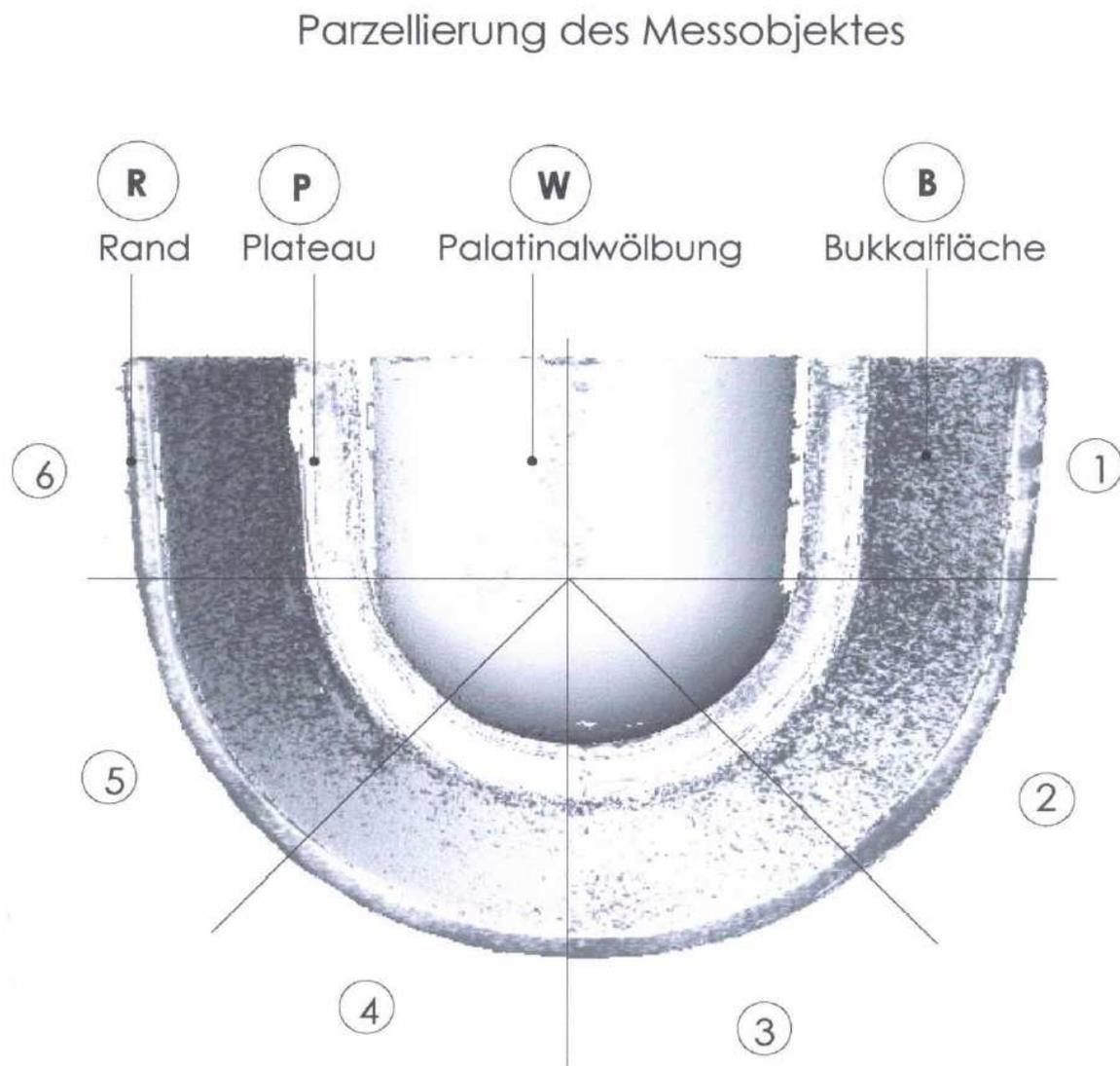


Abbildung 3.14.: Parzellierung des Messobjektes. Aus der Kombination von Buchstabe und Zahl ergibt sich die Feldbezeichnung.

Bei der Betrachtung der Differenzbilder der Probekörper aus dem Vorversuch ist ersichtlich, dass die Objekte nicht vollständig optisch erfasst werden können (Abb.3.15.).

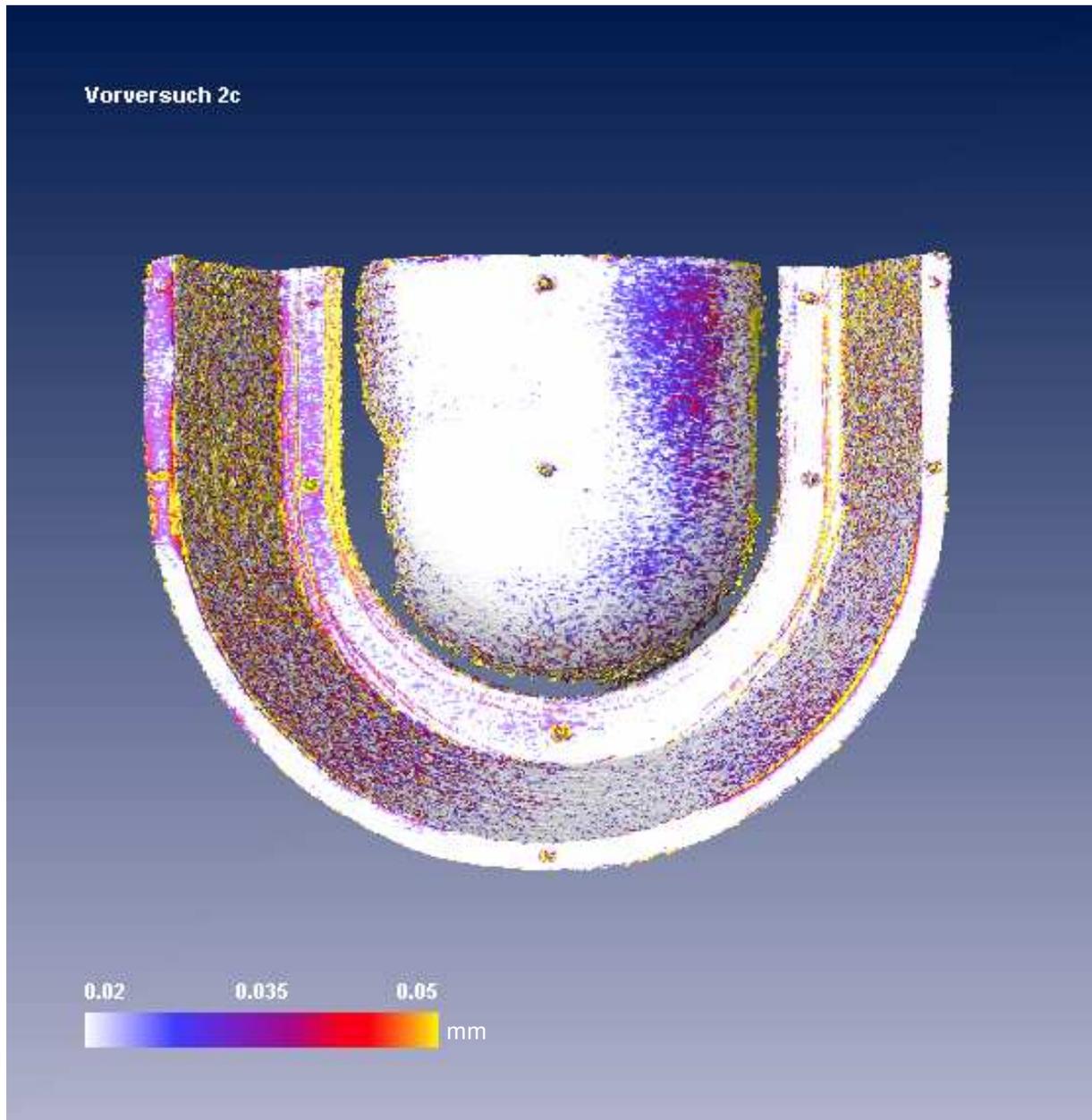


Abbildung 3.15.: Ansicht einer Prothese (Nr. 2) aus dem Vorversuch

Es treten Fehlstellen am Übergang der steilen Wände der Flächen W1 und W6 in die angrenzenden Flächen P1 und P2 auf (Abb.3.16.). Die Defekte in Form von Löchern in den Flächen können sich zirkulär um die gesamte Palatinalwölbung

erstrecken. Sie sind allerdings meistens auf einen schmalen Bereich von etwa 1 - 2 mm begrenzt. Weiter treten am oberen Rand der Prothese Defekte in Form von Löchern auf. Die Übergänge der Defekte sind meist gekennzeichnet von Ausreißern, das heißt, die Messpunkte weichen stark von der eigentlichen Objektgeometrie ab und befinden sich relativ weit gestreut vom Polygonverbund.

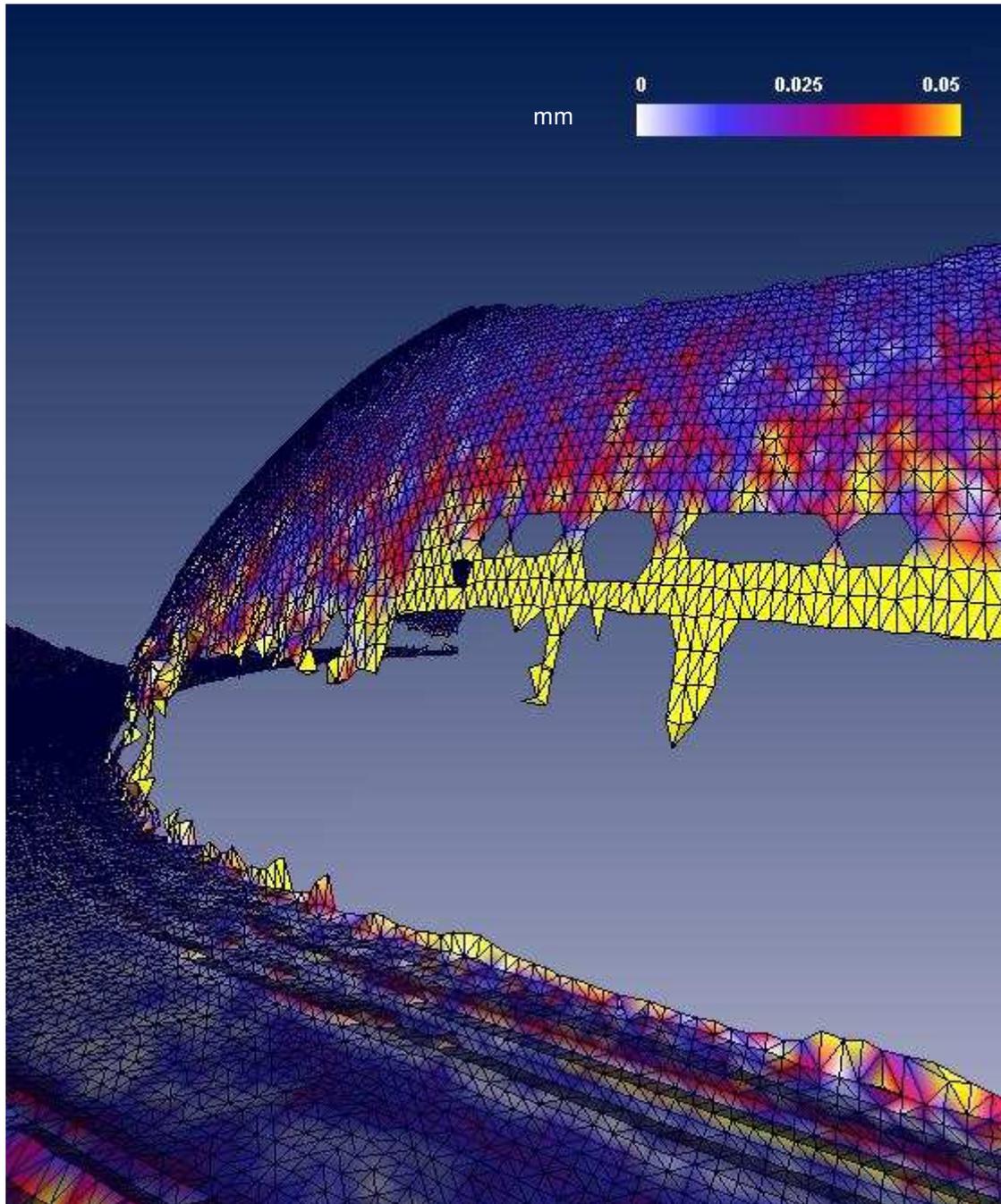


Abbildung 3.16.: Detailansicht einer Fehlstelle, Übergang Palatinalwölbung W1/2 zum Plateau P1/2
(Gitternetzdarstellung der Probekörperoberfläche)

Insgesamt weist keine Fläche eine homogene Farbverteilung auf, neben Null-Stellen treten auch Farbmarkierungen bis zu 50 µm und größer auf. An den Bukkalflächen B1 und B6 sind diese Beobachtungen verstärkt auszumachen. Insgesamt weisen die Flächen aber keine großen Distanzen auf, die eine Formveränderung imitieren würden.

Im Rahmen der Vorversuche wurden die Differenzbilder der einzelnen Messzyklen visuell miteinander verglichen. Hierbei zeigte sich, dass die geringsten Differenzen bei den Messungen ohne Objektbewegung auftraten und die größten bei den Messreihen mit Beschichtungswechseln.

Nach Modifizierung der Beschichtungsmethode wurden diese Differenzen deutlich reduziert. Des Weiteren wurden Histogramme der Differenzmessungen erstellt und der mittlere Fehler für den Versuchsaufbau errechnet.

Mit einer Messung werden etwa 138.000 Messpunkte erfasst, für die Histogramme und die Ermittlung des mittleren Fehlers wurden 99,5% dieser Punkte herangezogen. Im Vorversuch bewegte sich die Punkteverteilung von 0 bis 125 µm. Die außerhalb dieses Bereichs liegenden Punkte sind als Ausreißer zu bezeichnen und sollten keine Berücksichtigung finden. In der Abbildung 3.17. ist in Form eines Häufigkeitspolygons die Verteilung der Differenzen der Messpunkte wiedergegeben.

Der mittlere Fehler des Messaufbaus wurde über die folgende Formel ermittelt:

$$\frac{\text{Tatsächlicher Fehler} \times \text{Häufigkeit des Fehlers}}{\text{Gesamtzahl der gemessenen Fehlstellen}}$$

Für den Messaufbau konnte so aus 16 Differenzmessungen ein Systemfehler von ±19 µm ermittelt werden.

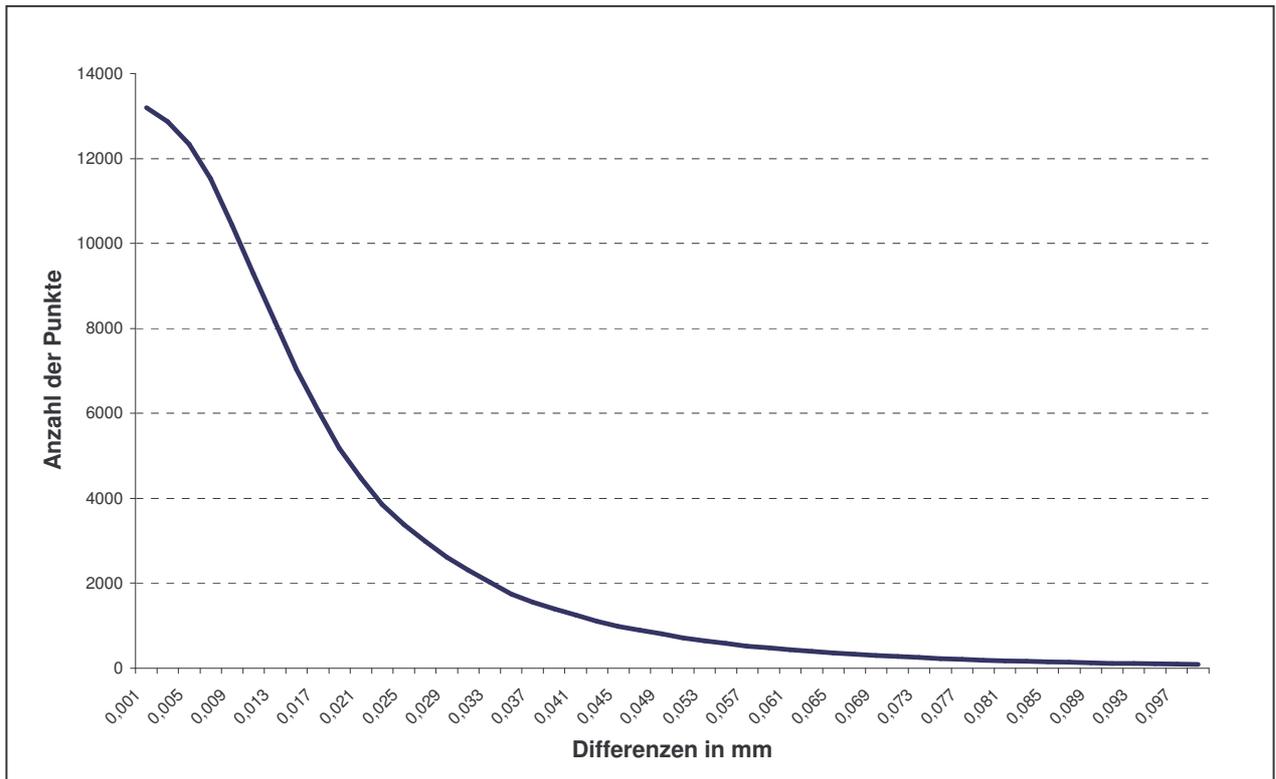


Abbildung 3.17.: Mittlere Verteilung der Messpunkte bei Beschichtungswechsel ohne Objektdeformation aus den Vorversuchen

3.2.2.3. Diskussion und Schlussfolgerung

Die Vorversuche haben gezeigt, dass es möglich ist, Prothesen aus PMMA mit der digitalen 3D-Messtechnik zu vermessen und die Messanlage reproduzierbare Ergebnisse liefert.

Geringe Fehler ergeben sich durch die Magnethalterung der Prothesen, wie sich bei den Durchgängen mit der Objektentnahme zeigte. Der weitaus größere Fehler ergibt sich aus dem Beschichtungswechsel, die Präparation der Objektoberfläche erfolgt nicht immer reproduzierbar. Insgesamt kann der ermittelte Systemfehler mit $19 \mu\text{m}$ als klein bezeichnet werden, gibt doch der Hersteller der Messanlage eine Genauigkeit von $16 \mu\text{m}$ an.

3.3. Hauptversuch

3.3.1. Versuchsablauf des Hauptversuchs

Im Hauptversuch sollte der Fragestellung nachgegangen werden, welches Formverhalten Totalprothesen in Haushaltsgeschirrspülmaschinen zeigen. Hierzu wurden insgesamt 30 Probekörper je zur Hälfte aus einem Heiß- und einem Kaltpolymerisat hergestellt. Die Herstellung aller Probekörper erfolgte zeitgleich an einem Tag. Drei Tage nach der Herstellung wurden alle stilisierten Prothesen mit der digiScan[®]-Anlage optisch erfasst. Die gewonnenen Datensätze sind als Referenzdatensätze zu bezeichnen, da mit ihnen die aus den folgenden Messungen resultierenden Datensätze verglichen wurden (Abb. 3.18.).

Anschliessend erfolgte die Einlagerung der Probekörper für 3 Wochen in auf 37 °C temperiertes Leitungswasser, welches wöchentlich gewechselt wurde und sich zusammen mit den Prüfkörpern im Wärmeschrank befand.

Der Geschirrspüler schließt sein Spülprogramm mit einem Trockengang ab. Um die sich hieraus ergebenden möglichen Konsequenzen für den Wassergehalt der Prothesen in den Versuchsbedingungen mit zu berücksichtigen, sollten sich die Probekörper möglichst nahe dem Sättigungszustand befinden.

SCHWICKERATH konnte in Studien feststellen, dass die Wasseraufnahme von PMMA in den ersten 2 Wochen am stärksten ist. [58]

Nach den drei Wochen Wässerung wurden je zehn Prothesen einem Prüfzyklus im Geschirrspüler unterzogen. Die je fünf verbleibenden Prothesen wurden weiterhin im temperierten Wasser gelagert.

Nach der Wässerung und später zu vorgegebenen Intervallen wurden die Probekörper mit der digiscan[®]-Anlage optisch erfasst.

Ferner erfolgte eine Messung des Gewichtes der Prothesen mit einer Analysenwaage vor und nach der dreiwöchigen Wässerung und vor jeder optischen Erfassung.

Für den Prüfzyklus im Haushaltsgeschirrspüler wurde sich an einem fiktiven Tagesablauf einer älteren Person orientiert. Nach einer Mittagsmahlzeit erfolgte um

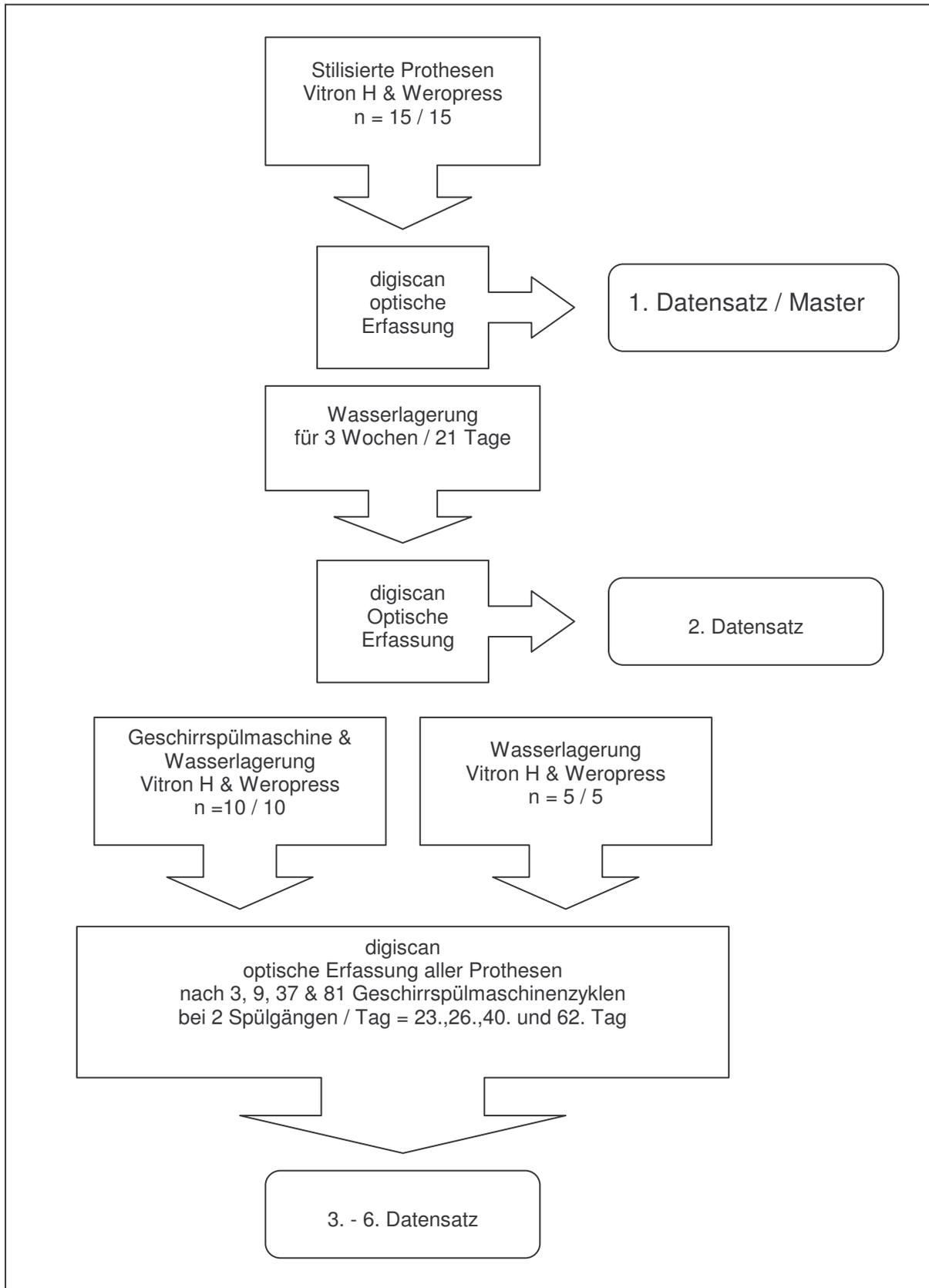


Abbildung 3.18.: schematischer Ablauf der Hauptversuche

13:00 Uhr das Einbringen der Prothesen in die Maschine, sowie nach der Nahrungsaufnahme am Abend um 20:00 Uhr. In der übrigen Zeit wurden die Prothesen entsprechend des oralen Gebrauchs im 37 °C warmen Wasser gelagert. Die Haushaltsgeschirrspülmaschine wurde fünf Minuten nach Beendigung des Reinigungsprogramms geöffnet und die Tür in Anlehnung an den Entwurf der DIN 50 275, Teil 2 in 45° - Position mit einem Keil aus Karton gebracht. [21] Nach einer halben Stunde wurden die Prothesen entnommen und in das auf 37 °C temperierte Wasser überführt. Der Geschirrspüler wurde mit Calgonit-Tabs[®] der Firma Benckiser bestückt, das Salz und auch der Klarspüler kamen ebenso aus der Calgonit[®]-Serie.

Die Prothesen wurden im Besteckkorb und in Plastikkörben der Firma Prince Lionheart INC. bewegungssicher im Spülraum gelagert. Die Position wurde für jeden Spülzyklus nach dem Zufallsprinzip bestimmt, so dass die Prothesen in Bezug auf den vorhergehenden Durchgang an einem anderen Ort befanden. Der Geschirrspüler wurde mit weiterem Spülgut in Anlehnung an den Entwurf der DIN 50 275, Teil 2 aufgefüllt, um möglichst reale Bedingungen zu imitieren.

Zur Messung wurden die Probekörper aus dem Wasser entnommen, mit Papiertüchern vom Wasser befreit und mit ihrer dorsalen Kante auf Tücher gestellt. Die Prothesen der Geschirrspülerserie wurden direkt aus der Maschine genommen. Nach vorhergehendem Abblasen mittels Druckluft erfolgte die Beschichtung der Probekörper mit Artispot[®] analog der optimierten Methode aus dem Vorversuch. Nach dem Messvorgang wurde mit Papiertüchern die Beschichtung wieder entfernt und die Prothesen erneut in auf 37 °C temperiertem Wasser gelagert.

3.3.2. Auswertung der Daten des Hauptversuchs

Am Ende der Versuchsreihe lagen für jeden Testkörper 6 Datensätze vor. Mit dem Programm Amira[®] wurden mit dem Referenzdatensatz der ersten Messung alle nachfolgenden Datensätze einer Differenzbildung unterzogen. Als Ergebnis wurden fünf Dateien mit der Bezeichnung a bis e regeneriert, die sich in Form von farbcodierten Differenzbildern darstellen ließen (Abb. 3.19.).

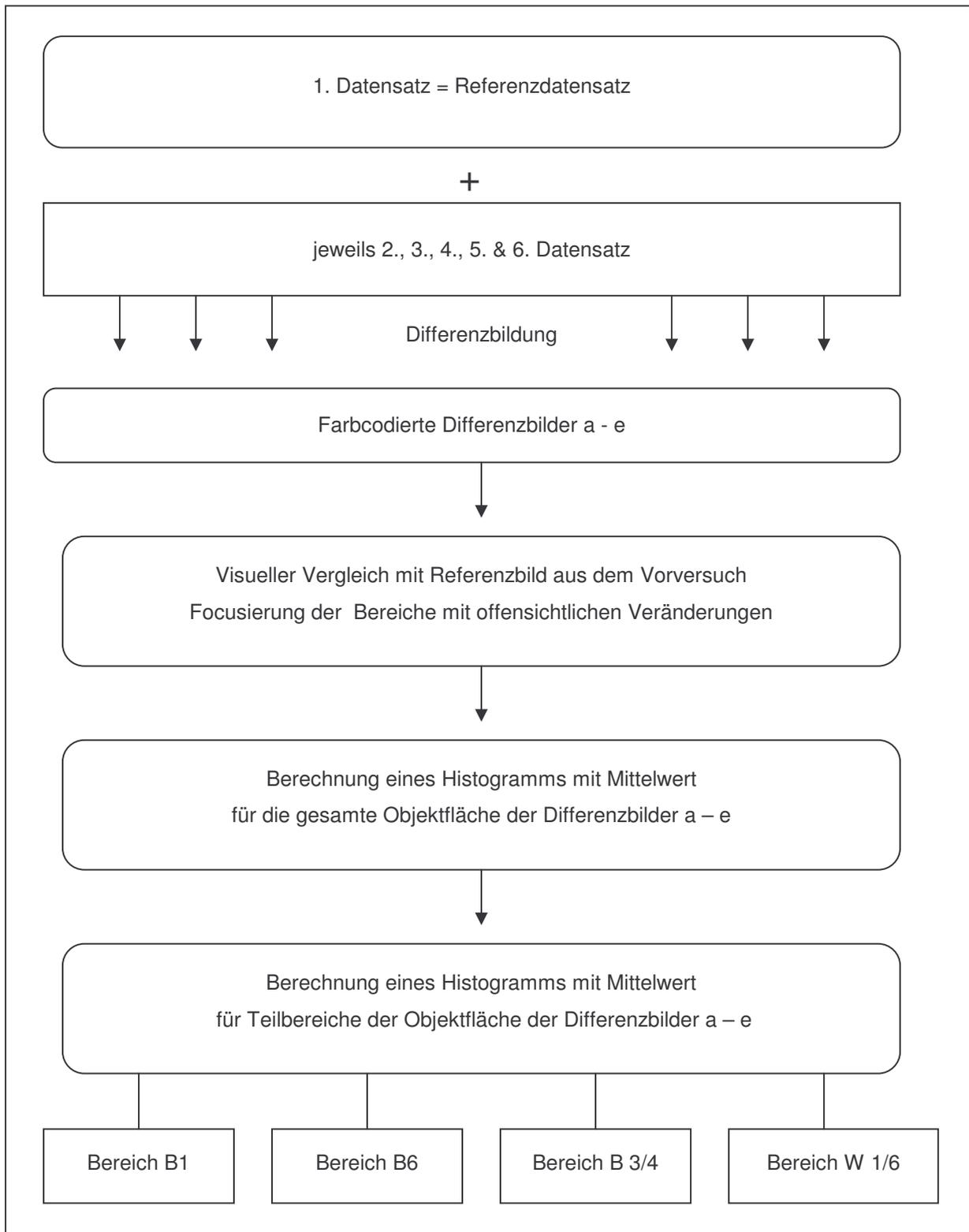


Abbildung 3.19. : Verarbeitung und Auswertung der Datensätze eines Prüfkörpers

3.3.3. Visuelle Auswertung

Bei der Auswertung der Differenzbilder im Hauptversuch sollte das charakteristische Differenzbild aus den Vorversuchen berücksichtigt werden, insbesondere die Defekte und Bereiche B1 und B6 mit erhöhter Wertestreuung sollten nicht überinterpretiert werden. Aus diesem Grunde sollten in einem ersten Schritt die gewonnenen farbcodierten Differenzbilder mit Referenzaufnahmen aus den Vorversuchen verglichen werden und die Selektion der offensichtlichen Formveränderungen erfolgen.

Hierzu wurde die Farbcodierung auf einen Bereich von 20 μm bis 50 μm eingestellt. Anschließend wurden von allen Bildern Screenshots angefertigt und gespeichert. Drei Referenzaufnahmen aus den Vorversuchen wurden ebenfalls auf einen Bereich von 20 μm bis 50 μm eingestellt und als Screenshot gesichert. Bei den Referenzaufnahmen handelte es sich um drei repräsentative Messbilder, die von ihrem Histogramm her einen mittleren Fehler von 15 μm , 19 μm und 21 μm aufwiesen.

In dem Programm Xn-Viewer wurden dann in drei Durchgängen je eine Referenzaufnahme (Abb. 3.20.) einer Aufnahme aus dem Hauptversuch gegenübergestellt und visuell auf Veränderungen hin verglichen. Abschließend wurden die Differenzbilder als Vektorbild dargestellt und mit virtuellen Schnitten versehen, so dass die Flächenbewegungen gut sichtbar wurden. Von den Ansichten wurden Screenshots zur Dokumentation angefertigt.

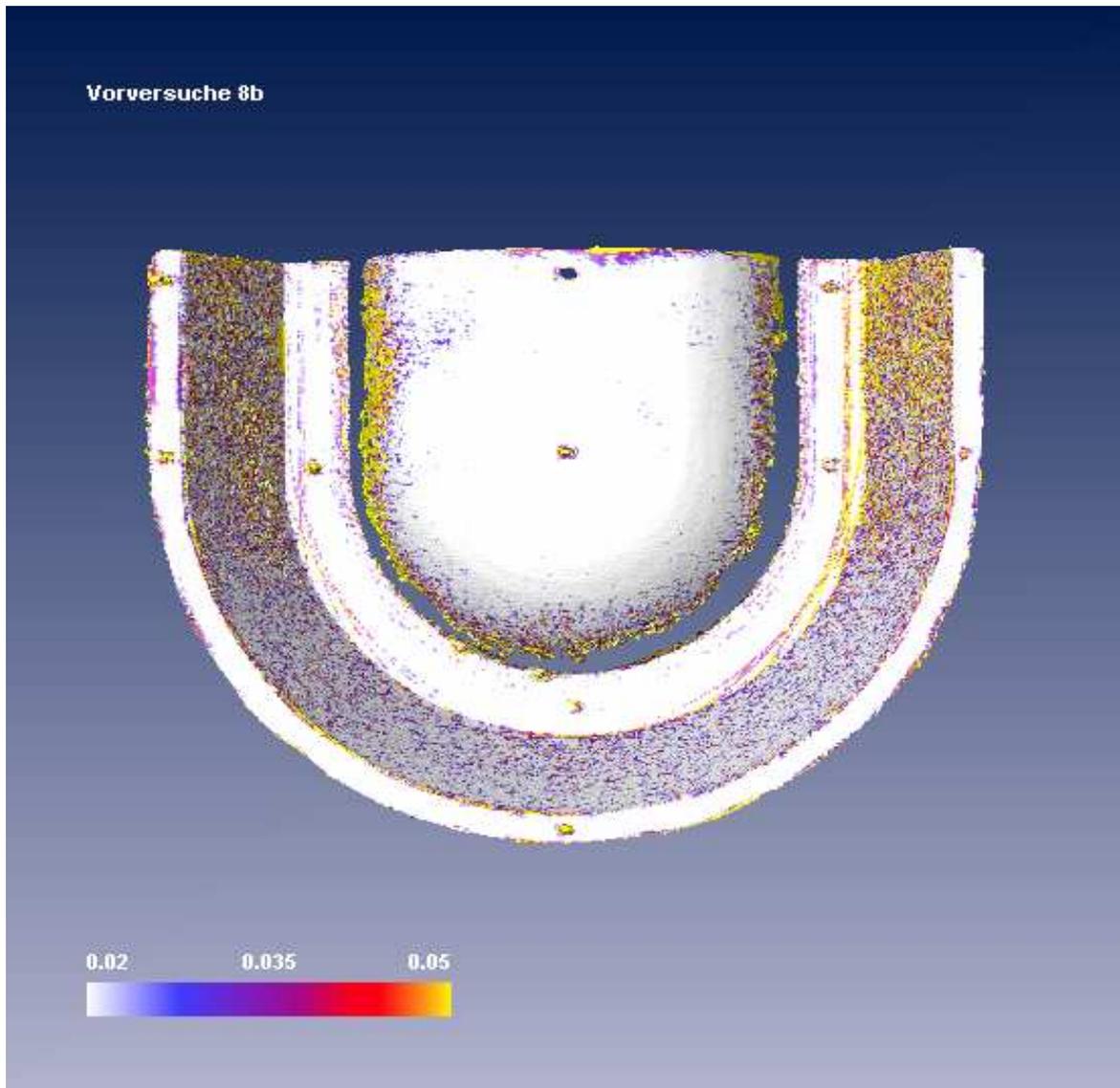


Abbildung 3.20.: Screenshot aus dem Vorversuch für den Bildvergleich im Hauptversuch.

3.3.4. Quantitative statistische Auswertung der Daten

Mit den Differenzdateien wurden im Programm Amira® auch Histogramme mit ihrem Mittelwert für alle Messungen berechnet.

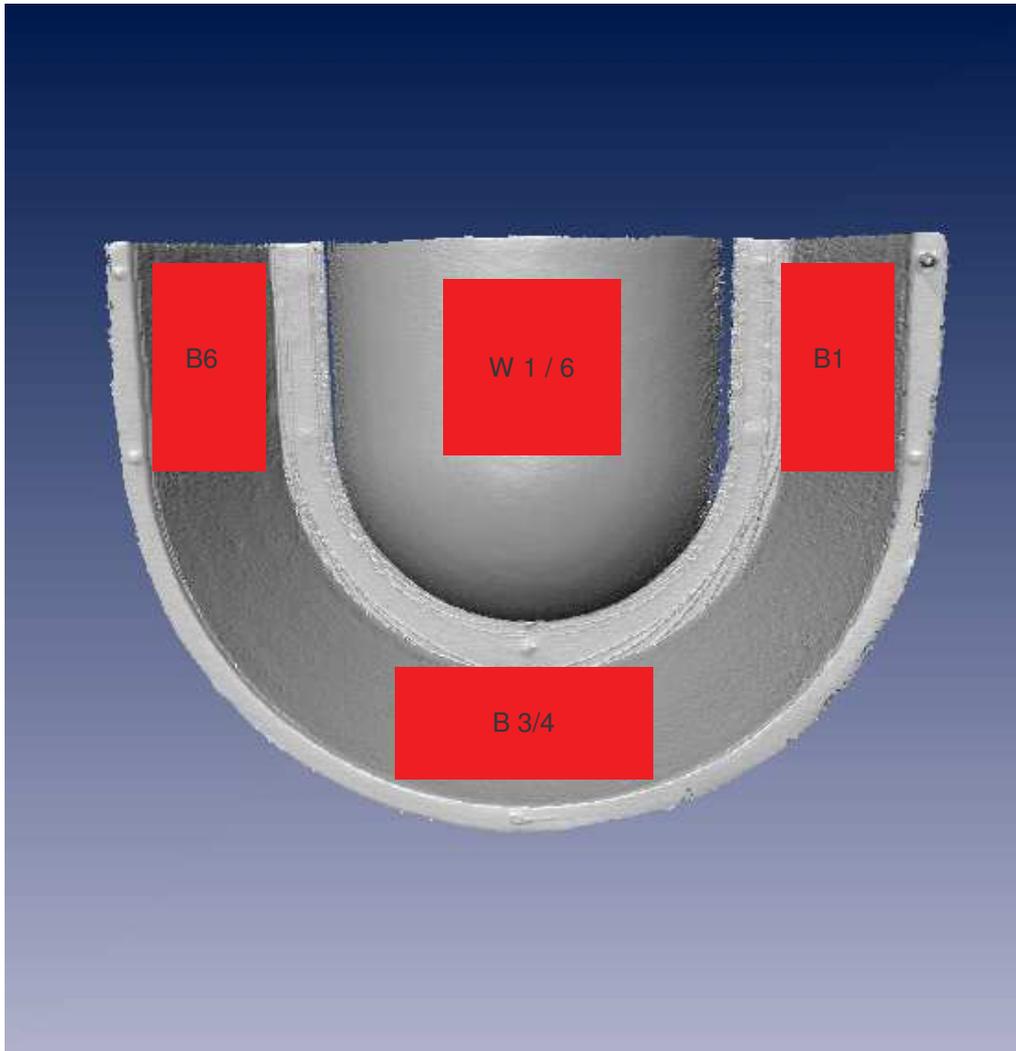


Abbildung 3.21.: Lokalisierung der Teilbereiche für die quantitative Auswertung

Nach der visuellen Auswertung erfolgte in vier Teilbereichen mit offensichtlichen Veränderungen eine gesonderte Berechnung der Histogramme sowie der Mittelwerte ebenfalls für alle Probekörper. Hierzu wurde aus den farbcodierten Differenzbildern an festgelegten Stellen (Abb.3.21.). mit einem virtuellen Werkzeug eine Fläche mit durchschnittlich 8.000 Punkten ausgeschnitten.

Die Mittelwerte wurden in eine entsprechende Tabelle in das Programm Microsoft-Excel® übertragen. Zur Auswertung wurden die Daten in die Gruppen Heiß- und

Kaltpolymerisat getrennt. In den Gruppen wurde differenziert nach der Behandlungsart (wassergelagert / Geschirrspüler), den fünf verschiedenen Oberflächen sowie den fünf Versuchstagen (Abb. 3.22.)

Mit dem Zusatzprogramm Win-Stat[®] wurden dann die Daten statistisch aufbereitet und Box-Plots angefertigt (Abb. 3.23.).

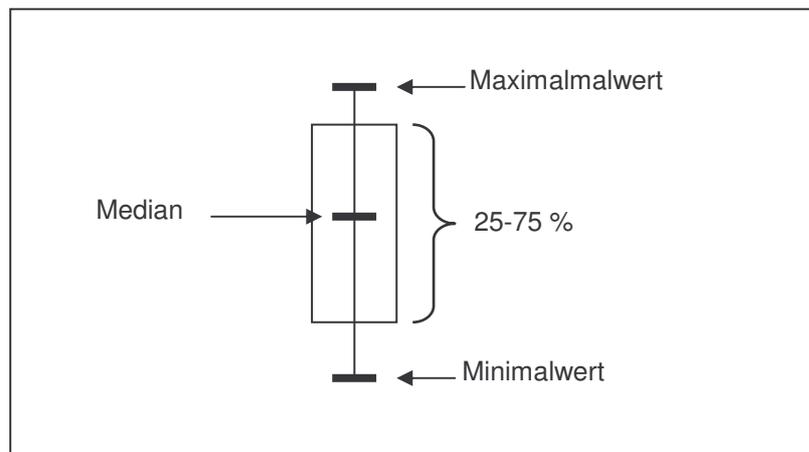


Abbildung 3.23.: Erklärung der Boxplotsaufteilung

BENDER et al. empfiehlt für den Vergleich von mehr als zwei Mittelwerten das Prinzip der Varianzanalyse (ANOVA) um zu ermitteln, ob überhaupt signifikante Differenzen zwischen Gruppen auftreten. Ist dieses der Fall, so können gezielt mit den entsprechenden Tests (t-Test oder U-Test) paarweise Vergleiche vorgenommen werden. [10]

Zur Gewinnung von Aussagen bezüglich der Signifikanz der gewonnenen Daten wurden gemäß des Schemas der Abbildung 3.24. innerhalb der Materialgruppen und deren Oberflächengruppen die Differenzmessungen der einzelnen Tage statistisch gegeneinander ausgewertet. Das Signifikanzniveau für alle Tests wurde mit $\alpha = 0,05$ angesetzt.

Die Ergebnisse der statistischen Auswertung wurden in Tabellen mit Aussagen zur Signifikanz aufgetragen. In den Tabellen findet sich bei einem signifikanten Ergebnis die Aussage „ ja “, entsprechend bei einem nicht-signifikanten Unterschied die Aussage „ nein “.

Wurde zusätzlich zur Varianzanalyse ein paarweiser Vergleich durchgeführt, so findet sich neben der Aussage „ ja / nein “ noch der Buchstabe des angewendeten Tests (U für U-Test, t für t-Test) sowie das Ergebnis mit der Größenangabe von p. In den Box-Plots-Diagrammen und Tabellen erfolgte die Abkürzung der Probekörpergruppen in der nachfolgenden Weise:

Abkürzung:	Erklärung:
HW	Heisspolymerisat wassergelagert (Vitron H)
HG	Heisspolymerisat im Geschirrspüler (Vitron H)
KW	Kaltpolymerisat wassergelagert (Weropress)
KG	Kaltpolymerisat im Geschirrspüler (Weropress)

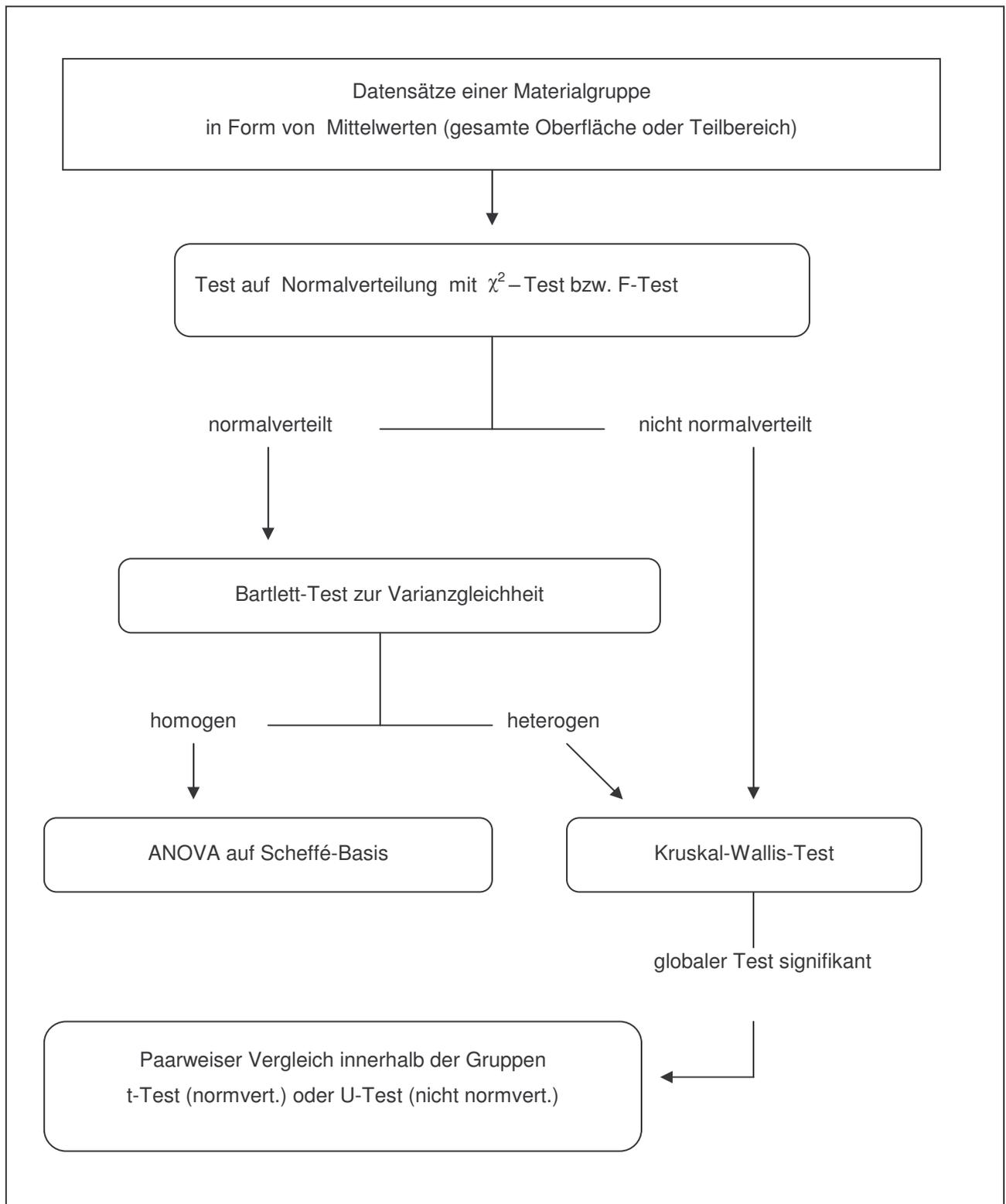


Abbildung 3.24. : Vorgehensweise der statistischen Auswertung