

5. Diskussion

5.1. Methodenkritik

5.1.1. Fehleranalyse optische Datengewinnung

Prinzipiell weist das gewonnene Bild der Probekörper Fehlstellen auf, die zum einen von der Beschichtungsmethode herrühren und andererseits im Prinzip des Messaufbaus begründet liegen.

5.1.2. Grenzen des Messaufbaus

Im Bereich des Übergangs von der Palatinalfläche in das Plateau sind die Wände zu steil, das Streifenmuster ist nicht mehr differenzierbar und es kommt zu Abschattungen, hier zeigt sich deutlich die Verfahrensgrenze. [16]

Um diesen Bereich besser zu erfassen, könnte der Messplan dahingehend verändert werden, während der Vermessung das Objekt zu kippen. Bei ersten Messversuchen mit vorgegebenen Messplänen für Kiefermodelle der digiscan-Anlage[®] hatte sich aber gezeigt, dass die Bukkalflächen beim Kippen eine Schattenbildung auf der Palatinalwölbung verursachen. Das Messbild ist als Kompromiss zu betrachten, kann doch aus dem erhaltenen Objektbild deutlich die Tendenz der Bewegung der einzelnen Flächen abgeleitet werden.

Die beschriebenen Fehlstellen können sich aber nachteilig auf den Alignierungsprozess im Programm Amira[®] auswirken. Besteht keine Verbindung zwischen der Palatinalfläche und dem restlichen Prothesenkörper, so kann es zu einer unvollständigen Bearbeitung der Datensätze kommen. Bei der Auswertung trat in drei Messgruppen dieses Phänomen auf, als Ergebnis wurden unvollständige Differenzbilder ausgegeben, in denen die komplette Palatinalfläche fehlte. Durch manuellen Eingriff in den Alignierungs-Algorithmus konnte der Fehler behoben werden.

5.1.3. Einfluss der Beschichtungsmethode

Die Beschichtungsmethode der Probekörper erzeugt Schichten, die nicht reproduzierbar sind. Der Pulverfilm ist in seiner Auftragsstärke nicht homogen. Die Ursache hierfür ist in der Geometrie der Prothesen zu suchen, durch Dreh- und Kippbewegung während des Beschichtungsvorganges und Veränderung des Objekt-Spraydüsen-Abstandes variiert die Intensität des Auftrags. Pulverinseln mit stärkerem Auftrag können partiell Formveränderungen imitieren.

Ferner sind die Farbpartikel im Arti-Spot[®] mit dem leicht flüchtigen Isopropyl- und Ethylalkohol gelöst, so setzt sich die Spraydüse während der Beschichtung mehrerer Objekte in Folge schnell zu. Der Spraynebel verändert sich so merklich und wird intensiver.

Nach jedem Beschichtungsvorgang wurde die Air-Brush-Pistole zerlegt und mit Alkohol gereinigt. Beim anschließenden Zusammenfügen der Einzelteile konnte die Düsennadel, die die Düsenöffnung und damit den Durchsatz bestimmt, nur wieder annähernd an dieselbe Position gebracht werden. Es ist ein weiterer Grund für unterschiedliche Beschichtungsstärken.

Im Verlauf der Messreihe tritt ein leichter Abfall der Mittelwerte nach Beginn der ersten Messung auf, diese haben sich insgesamt als nicht signifikant ergeben. Der kurze zeitliche Abstand der Messungen und die scheinbaren Formänderungen stehen nicht im Verhältnis zueinander. Die Messungen vom 21. und 23. Tag und bis zu einem gewissen Grad auch die des 26. Tages können als Wiederholungsmessungen betrachtet werden. Die abnehmende Tendenz der Differenzen der ersten der Messtage kann auf einen Trainingseffekt beim manuellen Beschichten zurückgeführt werden. Hierfür spricht auch eine zunehmende Verbesserung der erfassten Oberfläche, insbesondere der Übergangsbereiche der Palatinalwölbung in das Plateau. Eine feine Beschichtung hat bessere Oberflächenbilder zur Folge.

5.1.4. Fehler bei der Datenverarbeitung und Differenzbildung

Die Differenzbilder wurden nach dem „Best-Fit“-Prinzip gewonnen. Mit einem entsprechenden Algorithmus wurden die zu vergleichenden Flächen-Datensätze wiederholt virtuell übereinandergelegt, bis eine möglichst geringe Differenz zwischen ihnen bestand. Dieser Vorgang ist in der Regel durch eine maximale Anzahl von Rechen-Durchgängen limitiert. Würde der Prozess nicht limitiert werden, so könnten die erhaltenen Differenzbilder in ihren Abweichungen minimiert und damit verbessert werden. Einhergehend hiermit ist eine Erhöhung des zeitlichen Aufwandes. Bei größeren Datenmengen wäre es zudem wenig praktikabel, um verhältnismäßig schnell zu einem Ergebnis zu gelangen.

Das Ergebnis hängt ferner vom verwendeten Prinzip des Algorithmus und der Art der Differenzbildung ab. Es können Punkte der Datensätze oder aus Punkten regenerierte Flächen miteinander verglichen werden. [4]

In welcher Größenordnung sich diese Parameter beim Alignieren auswirken ist der vorliegenden Literatur nicht zu entnehmen.

Insgesamt konnte aber gezeigt werden, dass es möglich ist, das Formverhalten von totalem Zahnersatz aus PMMA mit der optischen 3D-Messtechnik untersuchen zu können. Die digitale Messtechnik wird fortlaufend weiterentwickelt, so dass es sicherlich möglich sein wird mit reduziertem Aufwand die komplette Form zu erfassen. Bei der Suche nach einer geeigneten Messanlage erfolgten Probeaufnahmen mit Geräten der Firma GFM in Teltow. Diese Geräte arbeiten auch nach dem Prinzip der Streifenlichtprojektionstechnik und sind mit Mikrosiegeln ausgestattet. Es konnten so in relativ kurzer Zeit Objektbilder ohne Objektbewegung gewonnen werden. Die Anwendung der Anlage musste auf Grund der zu erwartenden Kosten verworfen werden.

5.1.5. Beurteilung des Aufbaus und der Auswertung

Die Reihenfolge von visueller Auswertung und anschließender quantitativer Auswertung mit Histogrammen hat sich als sinnvoll ergeben. Die Differenzbilder lassen keine genaue Auswertung zu, sondern können nur zur Angabe von Tendenzen herangezogen werden. Insbesondere die Legende der Fehlfarbskalierung limitiert auf Grund der geringen Werteangabe die genaue Auswertung. Eine Verbesserung der Software sollte überdacht werden. Zur Auswahl der Bereiche für die partielle Histogrammberechnung hat sich die visuelle Auswertung der Differenzbilder jedoch als sinnvoll erwiesen. Zusammen mit den Vektorenbildern ergibt sich insgesamt ein schlüssiges Bild zur Beurteilung des Formverhaltens während des Versuchsablaufs.

Aus den Histogrammen der einzelnen Flächen der Vorversuche resultieren für die einzelnen Bereiche unterschiedliche mittlere Fehler. Dieses korreliert zum einen mit der Objektgeometrie, so lassen sich die Palatinalflächen genauer erfassen als die Schrägflächen der Bukkalseiten. Zum anderen treten innerhalb der Bukkalfläche lokale Unterschiede auf, der Bereich B3/4 lässt sich genauer erfassen als die Flächen B1 und B6. Der Messplan und die nicht mittige Objektpositionierung dürften die Ursache hierfür sein.

5.2. Wertung der Ergebnisse

Insgesamt verhalten sich die Probekörper der beiden Untergruppen Wasserlagerung und Geschirrspüler der einzelnen Materialgruppen annähernd gleich. Die Streuung der Messwerte ist auf das herstellungsbedingte inhomogene Gefüge des PMMA jedes einzelnen Probekörpers zurückzuführen. Ebenso zeigt sich für beide Probekörpergruppen ein Aufweiten der Grundform. Die Flächen, die frei enden (B1 und B6), sind hiervon stärker betroffen als die Flächen, die innerhalb der Form liegen (B 3/4).

5.2.1. Vergleich des Ergebnisses mit vorhandenen Studien

Die vorliegende Untersuchung ist als Grundlagenarbeit zu betrachten, vergleichbare Arbeiten liegen nicht vor. Die in der Literatur zu findenden Studien untersuchen das Formverhalten von Prothesen aus PMMA ab dem Zeitpunkt der Entnahme vom Modell nach der Herstellung und der anschließenden Wasserlagerung. Die Modellpassung oder Maßänderungen, bezogen auf das Herstellungsmodell der Prothesen, werden untersucht. In der vorliegenden Arbeit wird die herstellungsbedingte Formänderung bezogen auf den Ur-Kiefer nicht berücksichtigt. Die beobachtete Formänderung kann aber mit anderen Studien zum Formverhalten von Prothesen aus PMMA verglichen werden.

Die Form des verwendeten Probekörpers orientiert sich an denen der Studien von GOODKIND, HUGGETT und JAGER. [27, 33, 32, 35] Es handelt sich um eine stilisierte Prothese, die bis auf die plane Fläche auf dem Kieferkamm weitgehend den Formverhältnissen einer totalen Oberkieferprothese entspricht.

Plane Flächen einer Prothese aus PMMA verhalten sich anders als gekrümmte. [9] Demnach ist zu erwarten, dass sich im Bereich des planen Kieferkammes andere Formänderungen im Vergleich zu Studien mit gerundeter Kieferkammformen ergeben.

Die Beobachtungen der Formveränderungen decken sich durchaus mit denen in der Literatur beschriebenen Ergebnissen zum Formverhalten.

Es kann aber nur ein direkter Vergleich der Bewegung der einzelnen Flächen der Prothese vorgenommen werden. Vergleiche der Größenordnung der Maßänderung sind nicht möglich, da keine vergleichbaren Studien vorliegen, die die gesamte Protheseninnenfläche betreffen.

Die deutlichste Formänderung findet an den distalen Bukkalflächen B1 und B6 statt. Die Wände der Prothesen biegen sich nach außen auf, die herstellungsbedingte Formabweichung vom Kiefermodell wird reduziert. Diese Beobachtung findet sich sowohl in den Studien zur dorsalen Randspaltvermessung als auch in den Studien mit Streckenmessung in der Protheseninnenseite wieder. [7, 27, 32, 35, 47, 48]

Die Aufweitung der Palatinalwölbung deckt sich mit den Beobachtungen von Bawendi, der Messungen mit U-förmigen Prüfkörpern aus PMMA durchführte. Diese

Probekörper wiesen direkt nach der Polymerisation eine Kontraktion auf, die unter Wässerung in eine starke Aufweitung umkehrte. [9]

5.2.2. Wertung des Ergebnisses hinsichtlich der Fragestellung

Die Untersuchung zeigt für die Prothesen aus Heißpolymerisat, dass erst ab etwa 40 Spülzyklen im Geschirrspüler eine stärkere Formveränderung eintritt. Das Ausmaß der Veränderung unterscheidet sich jedoch nicht von denen einer im Wasser gelagerten Prothese. Die Wasserlagerung von Zahnersatz entspricht den Bedingungen in vivo, der Zahnersatz wäre am Patienten einsetzbar. Entsprechend sind auch die im Geschirrspüler gespülten Prothesen weiterhin für den Patienten geeignet.

Die Probekörper aus Kaltpolymerisat weisen bereits vor Beginn der Geschirrspülzyklen eine größere Formänderung auf, die bis zum 62. Tag zunimmt. Die Gruppe mit Geschirrspülerbehandlung zeigt am Ende eine stärkere Formänderung auf, die schwach signifikant ist. Die Formänderung findet als Aufweitung statt, das heißt, der Prothesenkörper nähert sich wieder der ursprünglichen Kieferkammform. Dieses wird auch deutlich, wenn die Prothesen auf ein Gipsmodell aus der Herstellungsserie gesetzt werden, lassen sie sich leicht ohne „Klemmeffekt“ aufsetzen. Hingegen ist direkt nach der Herstellung eine deutliche Forminkongruenz erkennbar. Somit wären keine nachteiligen Folgen für den Patienten zu befürchten, wenn er diese Prothesen einsetzen würde. Es kann sogar davon ausgegangen werden, dass der Sitz der Prothesen bezüglich der Formkongruenz besser wäre.

Die Untersuchung umfasst aber nur eine zeitliche Anwendung eines Geschirrspülers zur Reinigung von Prothesen über zehn Wochen und vier Tage. Laut einer Studie von Balkenhol und Wöstmann liegen die Überlebenszeiten von totalem Zahnersatz zwischen 5 und 7 Jahren. [6] Um eine verlässliche Aussage zur Geschirrspülmaschinenreinigung treffen zu können, müsste über einen weitaus längeren Zeitraum getestet werden. Es kann somit nur eine Tendenz angegeben werden.

In diesem Zusammenhang ist auf den Gewichtsverlauf und die gleich bleibende Form hinzuweisen. In der Serie der Prothesen mit Geschirrspülmachineschienenbehandlung ist die Tendenz zu beobachten, dass das Gewicht mit steigender Anzahl von Spülgängen abnimmt. Dieses ist auf den Verlust von Wasser und weiteren flüchtigen Bestandteilen zurückzuführen. Das Formverhalten der Prothesen wird hierdurch scheinbar nicht beeinflusst, denn die Differenzwerte bleiben auf dem Niveau der gewässerten Vergleichsmuster.

Sollte sich dieser Sachverhalt in fortgesetzten Studien bestätigen, so ist mit einer Verschlechterung der Werkstoffeigenschaften zu rechnen. Zum einen wird der Effekt der Weichmachung vermindert, zum anderen kann es zu einer Versprödung des Materials kommen. Es ist zu klären, ob eine Reduzierung der Reinigung im Geschirrspüler auf eine Anwendung pro Tag und die damit verbundene Verlängerung der Wasserresorption der Austrocknung der Prothese entgegen wirkt.

Um eine eindeutige Empfehlung zur Reinigung von totalem Zahnersatz im Geschirrspüler aussprechen zu können, müssen weitere Untersuchungen angestellt werden. Bevor weitere Versuche zum Formverhalten über einen längeren Zeitraum oder der Reinigungsleistung unternommen werden, sollte ein Drei-Punkt-Biege-Versuch durchgeführt werden. Die Anzahl der Spülgänge könnte wie in dem vorliegenden Versuchsaufbau vorerst auf 80 begrenzt werden, da bei Vitron H bereits nach dieser Anzahl von Spülgängen ein Gewichtsabfall unter den Wert von 12 Tagen Wässerung zu beobachten ist. Sollten sich hierbei keine signifikanten Verschlechterungen der Materialeigenschaften feststellen lassen, so sollten Langzeitversuche zur Formänderung und der Biegefestigkeit stattfinden.

5.3. Ursachen für das beobachtete Formverhalten

Die unterschiedliche Gewichtszunahme zwischen den beiden Polymerisationsgruppen ist in ihrem unterschiedlichen Gehalt an vernetzenden Zusätzen und die damit verbundenen unterschiedlichen Aufnahme von Wasser zu suchen. Die im Verhältnis zum Kaltpolymerisat geringere Wasseraufnahme vom Vitron H lässt auf einen höheren Vernetzungsgrad schließen. Durch die Vernetzung

der Moleküle untereinander wird die Solvation erschwert. Beim Weropress ist auf Grund der geringeren Vernetzung die Solvation erleichtert. [17, 46]

Die Prothesenkörper hatten zu Beginn der Versuchsreihe eine herstellungsbedingte Eigenspannung. Durch die Temperatur und die Wasseraufnahme wurde diese innere Spannung abgebaut, die Prothesenkörper verformten sich hierdurch.

Die Reihe der Probekörper mit Geschirrspülerbehandlung verlieren mit dem Beginn der ersten Messung kontinuierlich an Gewicht. Jeder Geschirrspülgang schließt mit einem Trocknen des Spülgutes ab, so dass auch die Prothesen an Wasser verlieren werden. Die gewässerten Probekörper hingegen nehmen 0,2 % mehr an Gewicht zu, in beiden Materialgruppen ist das Niveau der Sättigung erreicht, da die letzten drei Messungen konstante Werte aufweisen. In der Gruppe der Wasserlagerung nimmt die Verformung trotz konstanten Gewichts zu.

Das Formverhalten der rein wassergelagerten und der Probekörper mit Geschirrspülmachinesbehandlung ist annähernd gleich. In der Gruppe des Kaltpolymerisates ist die Tendenz erkennbar, dass die Formveränderung der Gruppe mit Geschirrspülmaschinenbehandlung stärker ausfällt, als die der gewässerten.

Der Sachverhalt kann wie folgt erklärt werden:

Die Lagerung der Probekörper in auf 37°C temperiertem Wasser bewirkt einen Abbau der Eigenspannung und damit einhergehend eine Formänderung.

In einem Versuch mit biaxial gerecktem Plexiglas, welches bei unterschiedlichen Temperaturen und verschiedener Luftfeuchtigkeit gelagert wurde, zeigte sich, dass die Rückstellung am schnellsten und stärksten bei der höchsten Temperatur war. Eine hohe Luftfeuchtigkeit verzögerte die Rückstellung. Die Rückschrumpfung oder Rückstellung eines verformten Acrylkörpers ist demnach hauptsächlich temperaturbedingt. [17]

Damit lassen sich die Beobachtungen zum Formverhalten und zum Gewichtsverlauf erklären. Die Eigenspannung der Prothesen wird durch die Lagertemperatur abgebaut, das Wasser spielt eine untergeordnete Rolle. Der Abbau der inneren Spannung wird in der Gruppe der Probekörper mit Geschirrspülerbehandlung trotz Wasserverlustes fortgesetzt. Die kurzzeitig höheren Temperaturen im Geschirrspüler

bewirken keine messbare Beschleunigung des Vorganges beim Heißpolymerisat. In der Gruppe des Kaltpolymerisats kann die etwas stärkere Formveränderung über die Temperaturerhöhung erklärt werden.