

## **2. Literatur**

### **2.1. Allgemeines zu PMMA**

Polymethylmethacrylat (PMMA) gehört zu den thermoplastischen Kunststoffen. PMMA besteht in seiner Grundstruktur aus linear unverzweigten Kettenmolekülen, diese sind untereinander nicht durch Hauptvalenzen miteinander verknüpft. Die innere Kettenbeweglichkeit und die gleichmäßige Molekülstruktur reicht für den Aufbau eines Kristallgitters nicht aus. PMMA ist aufgrund dieser Eigenschaft in die Gruppe der amorphen Thermoplaste einzuordnen. [17]

Dentales PMMA ist modifiziert und enthält 3 bis 8 % vernetzende Monomere wie Dimethacrylate, Glycolmetacrylate und Urethandimethacrylat, genaue Angaben werden von den Firmen nicht gemacht. [22, 60]

Die Vernetzung des Kunststoffes erhöht seine Beständigkeit gegenüber chemischen Agenzien und Lösungsmitteln sowie gegenüber erhöhten Temperaturen. Des Weiteren wird das Auftreten von Craquelésprüngen (Crazes) vermindert. [17, 56]

### **2.2. Formverhalten von dentalem PMMA**

Prothesen aus PMMA sind keine getreuen Negative ihrer Herstellungsmodelle. Werden sie direkt nach der Herstellung vom Modell entfernt, lassen sie sich nicht mehr spaltfrei auf ihr Modell reponieren. Ein Grund für diesen Sachverhalt liegt einerseits in der Polymerisationsschrumpfung bei der Herstellung, sie wird in der Literatur mit 0,2 bis 0,5 % angegeben und variiert je nach Verfahren.[49, 63]

Andererseits ist der etwa vierfach höhere Wärmeausdehnungskoeffizient des Kunststoffes gegenüber dem des Modellgipses, es entstehen je nach angewandeter Prozesstemperatur unterschiedlich ausgeprägte Eigenspannungen innerhalb des Prothesenkörpers. [59]

Während der weiteren Bearbeitung kann es erneut zu Formveränderungen kommen, durch Materialabtrag kann die Spannung innerhalb des Gefüges reduziert werden.

Während der Gebrauchsperiode erfährt die Form durch Belastung eine geringe Veränderung, Wasseraufnahme, beziehungsweise –abgabe beeinflussen ebenfalls das Formverhalten. [41]

### **2.3. Einflüsse von Temperatur auf PMMA**

Die Struktur im Mikrobereich des PMMA sorgt für die charakteristischen mechanischen und physikalischen Eigenschaften. Die Formbeständigkeit ist unabhängig vom Molekulargewicht.

Beim Durchlaufen der Temperaturskala von tiefen Temperaturen bis zur Zersetzungstemperatur verändert sich das innere Gefüge grundlegend und somit einhergehend der Werkstoffcharakter.

PMMA liegt entweder im festen, thermoplastischen oder thermoelastischen Zustand vor. Die Zustände wechseln nicht sprunghaft, sondern innerhalb breiter Temperaturintervalle. Der Übergang zwischen festem und thermoelastischem Zustand wird als Einfriertemperatur oder Glasübergangstemperatur  $T_g$  bezeichnet. Er liegt bei technischem PMMA im Mittel bei 105 °C. [17, 18]

In einer experimentellen Untersuchung von Finger zur Glasübergangstemperatur von dentalem PMMA wurde deutlich, dass Heißpolymerisate höhere Werte aufweisen als Kaltpolymerisate. Wasser und erhöhter Monomeranteil bewirken eine Weichmachung des PMMA, die Glasübergangstemperatur wird vermindert. Die ermittelten Werte bewegen sich im Bereich zwischen 98 °C und 125 °C. [23]

PMMA besteht aus einem dichten, regellos geflochtenen Netzwerk langer Molekülketten. Die thermodynamisch wahrscheinlichste Gestalt eines einzelnen Moleküls besitzt die Form eines lockeren, kugelförmigen Knäuels. Jedes Knäuel wird von benachbarten durchdrungen, somit ergibt sich eine nur geringe thermische Bewegungsfreiheit. Die Starrheit des Verbundes wird durch die relative Steifigkeit der PMMA-Hauptkette verstärkt. Es können nur Abschnitte der Molekülkette zu thermischen Bewegungen angeregt werden, längere Segmente zwischen

Verknotungen der Hauptkette kommen hierfür in Frage. Die Starrheit des inneren Gefüges wird mit zunehmender Temperatur aufgelockert. Die erhöhte thermische Anregung bewirkt eine Vergrößerung der Amplitude und der mittleren Abstände benachbarter Molekülgruppen. Hierdurch verringern sich auch die gegenseitigen Behinderungen und die zwischenmolekularen Wechselwirkungskräfte. Die Zahl der gerichteten Bewegungen nimmt zu, inneren oder äußeren Zwängen wird nachgegeben, Spannungen werden abgebaut. [17]

Die PMMA-Moleküle befinden sich vor Einwirkung eines äußeren Zwanges in optimaler Lage. Durch Belastung kommt es zu einer Verschiebung in eine Zwangsposition. Die thermische Agitation hat die Tendenz unter den veränderten Bedingungen die günstigste Lage herzustellen. Unter längerer Belastung bei isothermen Bedingungen kann es zu Änderungen der Molekülposition kommen, die nach Beendigung des Zwanges nicht mehr rückgängig gemacht werden. Die hauptsächlich bei Langzeitbelastungen zu beobachtenden, scheinbar irreversiblen Deformationen erweisen sich größtenteils als reversibel, wenn man die betreffenden Proben tempert. Das ursprüngliche Netzwerk mit seinen Nachbarschaftsbeziehungen wird wieder hergestellt. Die erhöhte Temperatur dient lediglich dazu, die alte thermodynamische Position schneller zu erreichen. Die thermische Agitation erleichtert das Überspringen hindernder Potentialschwellen. [17]

Der E-Modul und die Bruchdehnung weisen im festen Zustand eine geringe Temperaturabhängigkeit auf. Beim Übergang in den thermoelastischen Zustand verändern sich die Werte sprunghaft. Der E-Modul fällt in einem engen Bereich um etwa 3 Zehnerpotenzen ab, die Bruchdehnung nimmt auf das 60-fache im Vergleich zur Zimmertemperatur zu. Neben dem hohen Dehnungsvermögen und dem kleinen Widerstand gegen deformierende Kräfte ist die Kautschukelastizität bemerkenswert, das heißt, Dehnungen von 250 % und mehr sind weitgehend reversibel. [17]

Bei Annäherung an die Glasübergangstemperatur und im thermoelastischen Bereich fällt der Elastizitätsmodul so stark ab, dass die oben genannten Kräfte Formänderungen bewirken.

Jeder Gegenstand, der aus thermoplastischem Kunststoff hergestellt ist, besitzt eine maximale Gebrauchstemperatur. Wird diese Temperatur überschritten, so treten

durch innere und äußere mechanische Spannungen, wie Eigengewicht, eingefrorene Spannung, Einbauspannung oder Betriebslast, bleibende Deformationen auf.

Der Grad der Deformation hängt hauptsächlich von folgenden Faktoren ab [17] :

1. Temperatur
2. Zeit
3. deformierende Kraft
4. sorbierte Feuchtigkeit
5. Gehalt niedermolekularer Bestandteile

Die Firma Heraeus Kulzer empfiehlt für die Pflege und Vergütung von Prothesen aus PMMA nach der Herstellung eine Lagerung in 60 °C bis maximal 70 °C warmem Wasser. Laut Firmenangaben entspannt sich hierbei der Werkstoff, Restperoxid wird abgebaut und die Nachpolymerisation wird unterstützt, so dass der Restmonomergehalt minimiert wird. Kurzzeitig können die angegebenen Temperaturen zur Reinigung mit dem Dampfstrahler überschritten werden, ohne dass es zur Schädigung der Prothesen kommt. [22]

Die Empfehlung sollte aber relativiert werden, denn nach MICHLER reduziert eine Temperung in der Regel die Spannungsrisskorrosion bei Polymeren, bei PMMA hat die Temperung diesbezüglich jedoch kaum einen Einfluss. [42]

Acrylgläser zeigen bei höheren Temperaturen Zersetzungen, die mit Gewichtsverlust einhergehen, in der Literatur sind Werte von 160 °C angegeben. [17]

#### **2.4. Einflüsse von Wasser und Speichel auf PMMA**

Wassermoleküle lagern sich an Oberflächen von Polymeren bevorzugt an polare Regionen an. Die Wechselwirkung der polaren Gruppen des Polymers und des polaren Wassers wird als Solvation bezeichnet. Durch ein Konzentrationsgefälle schreitet die Solvation fort, Wassermoleküle dringen in PMMA ein,

Nebervalenzbindungen werden gelockert und der Kunststoff quillt. Die Solvation geht in eine intermizellare Quellung über. Bei vernetzten Molekülen bleibt sie begrenzt. Bei Molekülen, die nicht durch Hauptvalenzen verbunden sind, würde sie zur vollständigen Lösung führen. [52]

Die Wasseraufnahme von PMMA bewirkt eine Änderung der mechanischen Eigenschaften, ähnlich wie ein Weichmacher, das heißt Zug- und Biegefestigkeit sowie E-Modul nehmen ab, Schlagzähigkeit und Biegewinkel werden erhöht.

Ferner seien Maßänderung und Pigment- und Weichmacherwanderung aufgrund ungleichmäßiger Feuchtigkeitsaufnahme genannt.

Die Wasseraufnahme hängt von folgenden Faktoren ab:

<b>Materialbedingt</b>	<b>Umweltbedingt</b>
Diffusionskonstante	Form und Geometrie des Körpers
Sättigungskonstante	Konzentration und Druck
	Temperatur und Lagerzeit

Die Sättigung ist im Temperaturbereich von 2 °C bis 60 °C nicht temperaturabhängig, wohl aber die Absorptions- und Diffusionsgeschwindigkeit.

Die Wasseraufnahme und -abgabe kann mathematisch mit dem Fick'schen Diffusionsgesetz dargestellt werden. Die Temperatur beeinflusst den Diffusionskoeffizienten. Es ergeben sich somit bestimmte Zeiten für Formänderungen. [15, 17]

SCHWICKERATH hat in einer Untersuchung zur Wasseraufnahme von dentalem PMMA festgestellt, dass innerhalb der ersten 14 Tage der größte Teil an Wasser aufgenommen wird und nach 200 Tagen dieser Vorgang abgeschlossen ist. [58]

Vergleichende Untersuchungen zur Lagerung von Probekörpern aus PMMA in Wasser und künstlichem Speichel weisen keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich des Formverhaltens und der Materialeigenschaften auf. [47]

## 2.5. Chemische Beständigkeit

Bis zu einem gewissen Grad kann man über die chemische Struktur eines Polymers die chemische Beständigkeit bestimmen. In erster Linie erfolgt jedoch die Aussage bezüglich der Beständigkeit experimentell. Üblicherweise wird in den entsprechenden Medien ein Prüfkörper eingebracht und dieser nach bestimmten Zeiträumen hinsichtlich Gewichtsveränderungen, Aussehen und gegebenenfalls auf mechanische und physikalische Eigenschaften untersucht. Je nach Einsatzbedingungen ist das Medium zu temperieren, da mit zunehmender Temperatur die chemische Beständigkeit abnimmt.

Wird der betreffende Kunststoff chemisch angegriffen, so erfolgt primär eine Quellung des Kunststoffes infolge von Diffusion, diese drückt sich durch eine Gewichtszunahme aus.

Ist die Substanz im Kunststoff unlöslich, so wird bei durchsichtigen Materialien eine Trübung sichtbar. Wird der Kunststoff angelöst, so geht dieses mit einer Gewichtsabnahme einher, es kann zur vollständigen Auflösung kommen. [17]

PMMA ist beständig gegen anorganische Substanzen, Säuren, Laugen, Salze und ihre Lösungen, größtenteils auch in konzentrierter Form. Mitunter ist die Einwirkung mit einer Gewichtszunahme verbunden, die auf einer Wasseraufnahme beruht.

Dagegen greifen organische Verbindungen, insbesondere Chlorkohlenwasserstoffe, Ketone und Ester PMMA an.

Mit steigendem Molekulargewicht und Vernetzungsgrad nimmt die Beständigkeit geringfügig zu. [17, 18, 29] Nach Auskunft der Firma Heraeus Kulzer GmbH sind die dentalen PMMA-Materialien beständig gegenüber Tensiden und Detergenzien. Es werden teilweise ähnliche Komponenten, wie beispielsweise Natriumstearat, dem Perlpolymerisat zugegeben, um die Werkstoffeigenschaften zu verändern. [22]

## 2.6. Korrosionsvorgänge an PMMA - Spannungsrissbildung

Die sogenannte Spannungsrisskorrosion äußert sich durch eine ausgedehnte Rissbildung, in der Literatur häufiger als Crazes bezeichnet. Ursache hierfür sind primär chemische Angriffe in Kombination mit einer mechanischen Spannung. [17]

Ein besonders starkes Ansteigen der Crazedicken erfolgt bei PMMA mit polydispenser Molekulargewichtsverteilung, wobei die Anwesenheit eines Anteils sehr kurzer Ketten eine größere Defektdichte und damit eine leichtere Verstreckbarkeit des Materials bewirkt. [42]

Folgende Parameter beeinflussen die Spannungsrissbildung nach der DIN 53 449, Teil 2 vom Mai 1984:

- Geometrische Form der Probe
- Zustand des Formstoffes in der Probe (Orientierung, Struktur, Eigenspannung)
- Höhe der äußeren Spannung oder Dehnung
- Temperatur während der Lagerung
- Umgebungsmedium
- Dauer der Einwirkung des Umgebungsmediums

## 2.7. Theorie zum maschinellen Geschirrspülen

Die Anwendung von Geschirrspülmaschinen dient dem Zweck, Speise- und Getränkereste von benutztem Geschirr und Besteck zu entfernen und anschließend zu trocknen.

Reinigungsverfahren werden durch vier Faktoren in ihrem Ergebnis bestimmt: Chemie, Mechanik, Zeit und Temperatur. Je nach Reinigungsverfahren erfolgt eine unterschiedliche Gewichtung. In Geschirrspülmaschinen kommt dem Medium Wasser eine wichtige Funktion zu, es wird mit schwachem Druck auf das Spülgut befördert und überträgt so die zum Reinigen nötige thermische, chemische und mechanische Energie. [28] Die Pumpen in Geschirrspülmaschinen erzeugen einen Wasserdruck von 0,15 bis 0,2 bar. [50]

Die geringe mechanische Energie beim maschinellen Reinigen wird durch den Faktor Chemie in Form von starken Reinigungsmitteln und mit erhöhten Temperaturen von 45 °C bis 70 °C kompensiert.

Die Reiniger haben während des Spülvorganges die Aufgabe, die Anschmutzungen des Spülgutes zu lösen und zu dispergieren sowie Härteionen aus dem Wasser zu binden. Hierbei ist der unterschiedlichen Zusammensetzung und Intensität der Anschmutzung Rechnung zu tragen. Ferner darf keine Schädigung des Spülgutes erfolgen.

Die Geschirrspülmaschinen unterstützen durch die entsprechenden Programmabläufe die komplexen Aufgaben des Reinigungsmittels, die Geräte besitzen meist mehrere Programme für die unterschiedlichen Anschmutzungsgrade. Die Spülprogramme beginnen in der Regel mit einem Vorspülgang zur groben Belagsablösung, je nach Gerätehersteller wird mit kaltem oder warmem Wasser gearbeitet. Anschließend erfolgt nach einem Wasserwechsel der Hauptspülgang, dieser beginnt mit der Zugabe des Reinigungsmittels, die Spülflotte wird im Programmverlauf bis zur Reinigungstemperatur erwärmt. Die Endtemperatur wird etwa zehn Minuten gehalten. Nach einem Zwischenspülgang, der der Entfernung der Reinigerrückstände dient, schließt sich der Klarspülgang an. Im Laufe des Klarspülganges wird das Spülwasser bis auf 70 °C erwärmt und mit 3 bis 5 ml Klarspüler versetzt. Die Wasserkalkfleckenbildung auf dem Spülgut soll in dem letzten Spülgang verhindert werden, in der Regel werden Tenside als Klarspüler eingesetzt (siehe Tab. 2.9.). Das Spülprogramm schließt mit einem Trocknungsgang ab. [28]

Die Abbildung 2.7. soll exemplarisch einen Überblick über den Ablauf eines Spülprogrammes verschaffen, es handelt sich hierbei um das Programm „Normal 65 °C“ der im Hauptversuch verwendeten Maschine des Typs SG 5332 der Firma Bosch. Die Temperatur wurde mittels Thermologger aufgezeichnet und mit den Programmdateien der Firma Bosch ergänzt. [14, 55]



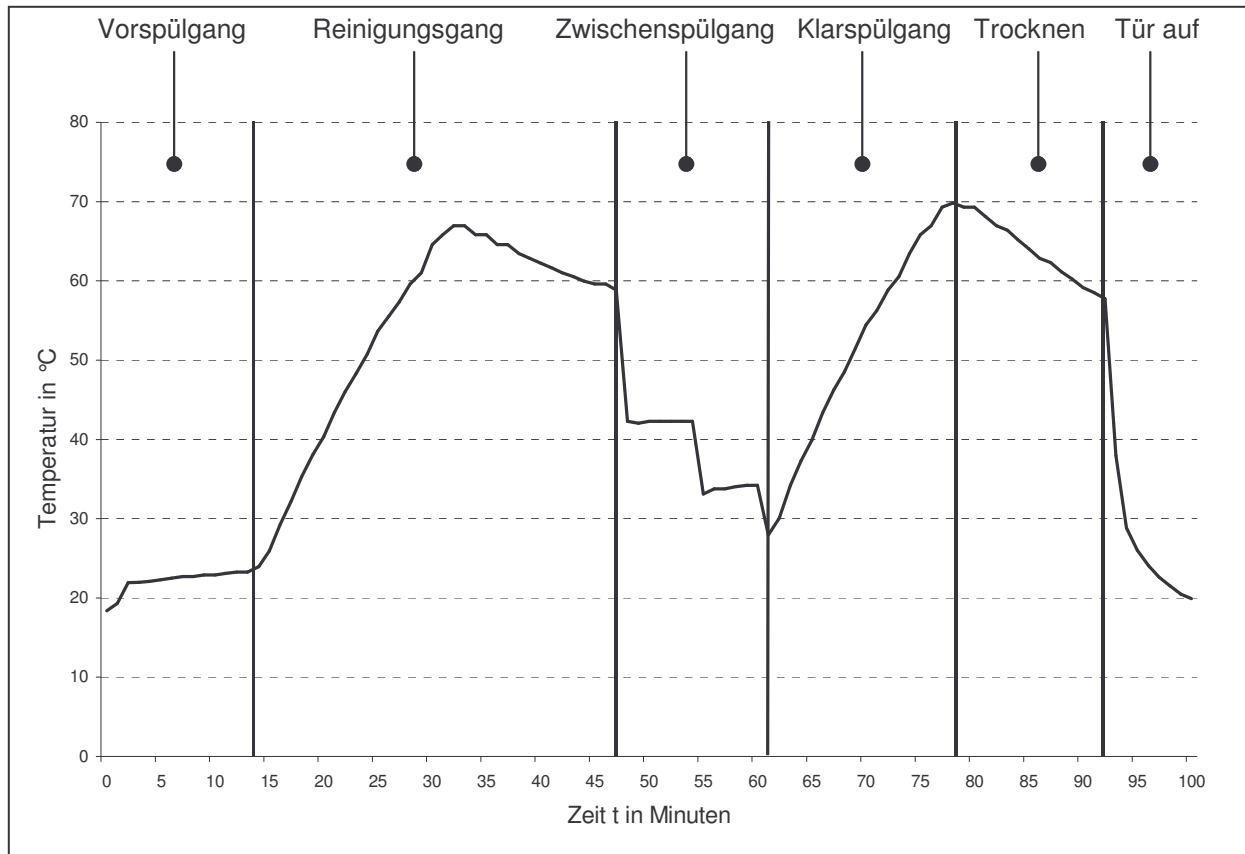


Abbildung 2.7.: Überblick Temperaturverlauf für das Spülprogramm „Normal 65 °C“

Die maschinellen Geschirrspülmittel setzen sich aus verschiedenen Komponenten zusammen, die auf die einzelnen Schmutzpartikel abgestimmt sind. Die Tabelle 2.8. gibt einen kurzen Überblick hierzu.

Tabelle 2.8.: Rahmenrezeptur klassischer und niederalkalischer Reiniger [28]

<b>Inhaltsstoffe</b>	<b>Klassische Reiniger</b>		<b>Niederalkalische Reiniger</b>	
Alkaliträger	Metasilikate Soda	30 – 70 % 0 – 10 %	Soda Hydrogencarbonat Disilikate	0 – 40 % 0 – 40 % 0 – 40 %
Komplexbildner & Dispergiermittel	Triphosphate	15 – 40 %	Citrat Polycarboxylat Triphosphate Phosphonate	0 – 45 % 0 – 15 % 0 – 50 % 0 – 1 %
Bleichmittel	Aktivchlorträger	0 – 2 %	Aktivsauerstoffträger	3 – 20 %
Bleichaktivator	Keine		TAED	0 – 6 %
Netzmittel	Tenside	0 – 2 %	Tenside	1 – 4 %
Biowirkstoffe	Keine		Enzyme	0,5 – 4 %
Hilfsstoffe	Paraffinöl	< 5 %	Paraffinöl	< 5 %
pH-Wert (1%)		12 - 13		9 – 11

Tabelle 2.9.: Rahmenrezeptur Klarspüler [28]

Inhaltsstoffe	Beispiele	Anteile in Gewichts-%
Niotenside	Alkanol-EO- bzw. EO-PO-Addukte	10- 20
Organische Säuren	Zitronensäure	0 – 15
Lösungsvermittler	Alkohole Arylsulfonate	0 –15
Duftstoffe	Parfümöle	< 1
Wasser		Rest

## 2.8. PMMA in Haushaltsgeschirrspülmaschinen

Die Frage, ob Zahnersatz aus dentalem PMMA geschirrspülmaschinenfest ist, kann mit der gesichteten Literatur und den Firmenanfragen nicht eindeutig geklärt werden. Die Aussagen beziehen sich alle auf die chemische Beständigkeit, das Formverhalten findet keine Berücksichtigung.

Die Firma Henkel weist PMMA in einer Verbraucherbroschüre [31] als nicht geschirrspülmaschinengeeignet aus. Die Angabe beruht auf einer Information der Firma Buchsteiner, die wiederum ihre Angaben aus einem Tabellenwerk bezieht, in der zu PMMA bezüglich der Spannungsrissbeständigkeit folgende Aussage getätigt wird: „Spannungsrisse können unter Umständen auftreten (z.B. Spülmittel)“. [1] Die Landesgewerbeanstalt -Bayern- hat 1994 Plexiglas der Typen „zk 30“ und „zk 50“ der Firma Röhm GmbH einer Untersuchung hinsichtlich der Geschirrspülmaschinenfestigkeit in Anlehnung der Vornorm DIN 50 275, Teil 2 unterzogen. Die Probekörper in Form von Platten und Bechern wurden 500 Spülzyklen bei 65 °C in einer Geschirrspülmaschine unterzogen, anschließend erfolgte ein visueller Vergleich mit Rückstellmustern. Die Prüfmuster erhielten die Bezeichnung „geschirrspülmaschinenfest“. [40]

Bei dem Plexiglas der Materialbezeichnung “zk 30“ und “zk 50“ handelt es sich um

schlagzähes, modifiziertes PMMA mit Acryl-Elastomeranteil, es ist daher vergleichbar mit dentalem PMMA . [30]

## **2.9. Untersuchungen zum Formverhalten von ZE aus PMMA**

Vorab sei die Begriffsdefinition der Formgenauigkeit und des Formverhaltens erläutert. Die Formgenauigkeit bezeichnet die Genauigkeit, mit der ein Formteil hergestellt werden kann. Sie wird zu einem bestimmten Zeitpunkt festgestellt und ist von den bestehenden Faktoren der Umgebung abhängig (z.B. Wasseraufnahme, Temperatur, mechanische Beanspruchung).

Die Änderung der Formgenauigkeit in Abhängigkeit von der Zeit und den oben genannten Faktoren wird als Formverhalten bezeichnet. [9] Zahnprothesen sollten eine hohe Formbeständigkeit aufweisen, jedoch finden sich in der Literatur nur wenige Aussagen bezüglich der maximalen, tolerablen Formabweichung. In vielen Studien wird sich aber in der Diskussion auf diese Aussagen berufen.

JAHNKE führte 1962 aus, dass Formveränderungen der Schleimhautseite den Halt verschlechtern sowie Auswirkungen auf das umgebende Gewebe haben. So führt eine Schrumpfung lateraler Prothesenteile um 1/3 mm bei längerer Tragezeit zu Durchblutungsstörungen der Schleimhaut in dem betroffenen Gebiet. [38]

Es werden diffuse Aussagen zur Ah-Linie getroffen, größere Spalten in diesem Bereich verschlechtern den Sitz und die Saugfähigkeit. Treten Änderungen auf der Zungenseite auf, so kann die Okklusion gestört werden. [20]

WOELFEL und PAFFENBERGER kamen 1959 zu dem Schluss, dass eine Verkleinerung der Distanz zwischen den Molaren in transversaler Richtung bis zu 0,5 mm den Sitz und Tragekomfort von Totalprothesen nicht beeinflussen. Erst ab einer Kontraktion von 0,9 mm treten Störungen auf. [64]

## 2.10. Bisherige Untersuchungen zum Formverhalten

Die Mehrzahl der Methoden zur Ermittlung der Formänderung arbeitet mit der Vermessung von Strecken zwischen Referenzpunkten. Gemäß einem Literaturüberblick zur Ermittlung des Formverhaltens von Totalprothesen von ZISSIS et al. verwenden 60 % der bisherigen Studien ein Messmikroskop und 25 % einfache Greifzirkel. [65]

Vereinzelt werden Versuche mit anderen Messeinrichtungen beschrieben, beispielsweise dem Röntgen von Prüfkörpern und anschließendem Vermessen von Strecken zwischen Referenzpunkten. [12]

Bereits 1943 wurden Untersuchungen zum Formverhalten von Zahnprothesen während einer Tragedauer von zwei bis drei Jahren angestellt. Mit einem Spezialmikroskop, welches Messungen im Dreikoordinatensystem zulässt, wurde die Raumlage von Referenzpunkten an Prothesen ermittelt. Mit diesen Punkten wurden Messstrecken gebildet, durch zeitlich versetzte Messungen erfolgte ein Vergleich der Daten.

Die Prothesen wurden über drei Punkte in der Außenfläche reproduzierbar auf dem Messtisch des Mikroskops gelagert. Die Genauigkeit der Messapparatur wurde mit 1/20 mm angegeben. [20]

In der angelsächsischen Literatur findet man eine ähnliche Methode zur Ermittlung des Formverhaltens. Es werden standardisierte Prüfkörper hergestellt, die in ihrer Form an eine Oberkieferprothese angelehnt sind, jedoch keine Zahnreihen aufweisen. Des Weiteren ist die Form der Kieferkämme auf eine kantige geometrische Form reduziert, so dass Ebenen entstehen. Die Prüfkörper sind mit Referenzpunkten versehen, die zur Streckenmessung mit dem Messmikroskop herangezogen werden. Die Messung erfolgt nur in einer Ebene, Höhenabweichungen werden nicht berücksichtigt. Die Genauigkeit variiert in

Abhängigkeit vom verwendeten Messmikroskop und liegt im Mittel bei 1/100 mm. [27, 32, 33, 35]

In der Literatur findet sich eine weitere Methode, die im deutschsprachigen Raum bevorzugt angewendet wird: die Vermessung des dorsalen Randspaltes von Oberkieferprothesen auf den zugehörigen Kiefermodellen. Mittels Messmikroskops werden an Referenzpunkten Strecken vermessen, die sich aus dem Abstand der Prothesenbasis zum hinteren Modellrand ergeben.

Die Versuchsaufbauten variieren in der Form der Prüfkörper, weisen aber alle keine Kunststoffzähne auf. Nach einer Untersuchung von RETTERATH beeinflusst ein künstlicher Alveolarfortsatz den dorsalen Randspalt kaum. [53] Es werden teilweise nur dorsale Segmente verwendet [61], zum anderen aber auch komplette Prothesen. [41, 47, 48]

Eine weitere Methode arbeitet auf der Okklusalseite von Prothesen und vergleicht Strecken, die sich durch Referenzpunkte an Zähnen ergeben. [8, 51]

PEROZ et al. erhalten nach dreiwöchiger Wasserlagerung von Prothesenkörpern Randspaltwerte von rund 50 µm bis hin zu 650 µm. Die Differenzwerte zu den Messungen, die direkt nach dem Ausbetten erfolgten, liegen im Bereich von -100 µm bis 155 µm. [47]

In vielen Studien konnte gezeigt werden, dass die Kontraktion des Basismaterials nach der Herstellung etwa 0,5 % beträgt, bei einer Strecke von 50 mm beträgt die zu messende Differenz 0,25 mm; ZISSIS et al. kommen zu dem Schluss, dass es ausreichend ist, eine Messapparatur zu verwenden, die eine Genauigkeit von 50 µm aufweist. [65]

BAWENDI gibt die Genauigkeit des Messmikroskopes mit 10 µm an, das zur Prüfung des Formverhaltens unter Einfluss der Temperatur und Feuchtigkeit von Prothesen verwendet werden sollte. [9]

## 2.11. Digitale 3D-Messtechnik

Mit der rasanten Entwicklung in der Video- und Computertechnologie ist die digitale Bildverarbeitung und 3D-Visualisierung zu einem Standardwerkzeug in Wissenschaft und Industrie geworden.

Folgende Komponenten bilden die Grundlage zur digitalen Bildverarbeitung [ 37] :

### 1. **Bildaufnahmesystem**

Häufig werden Halbleiter-Bildsensoren eingesetzt, die am weitesten verbreitet sind, die sogenannten charge coupled devices (CCDs). Es finden auch elektro-mechanische Taster Anwendung (Koordinatenmessmaschine).

### 2. **Bildspeicher, auch als Framegrabber bezeichnet**

Elektrische Signale des Bildaufnahmesystems werden zur Verarbeitung im Computer in ein digitales Bild umgewandelt.

### 3. **Personalcomputer**

Diese müssen mit genügend Arbeitsspeicher und einer geeigneten Grafikkarte ausgerüstet sein.

### 4. **Bildverarbeitungssoftware**

Spezielle Computerprogramme dienen als Werkzeug zur Manipulation und Analyse der gewonnenen Bilder.

Die existierenden digitalen 3D-Messverfahren unterscheiden sich hauptsächlich durch das Prinzip des Bildaufnahmesystems, exemplarisch seien hier die drei gängigsten aufgeführt:

### **2.11.1. Photogrammetrie**

Die Idee, Objekte optisch dreidimensional zu vermessen, wird seit Mitte des 19. Jahrhunderts in Form der Photogrammetrie umgesetzt und weiterentwickelt.

Aus zwei Kamerapositionen werden von dem betreffenden Objekt Bilder gewonnen. Mit mathematischen Rechenoperationen lassen sich aus den Beziehungen der jeweiligen Kameraposition zur Objektposition und den Aufnahmewinkeln und Kalibrierkörpern die Messwerte gewinnen.

In den 80er Jahren des letzten Jahrhunderts wurde die digitale Photogrammetrie, insbesondere die Nahbereichsphotogrammetrie, stärker vorangetrieben. Nach der optischen Erfassung liegen die Messobjekte in numerischer Form virtuell als 3D-Modell am Computerbildschirm vor und lassen sich so rechnergestützt bearbeiten und vermessen. [16, 57]

### **2.11.2. Koordinatenmessmaschine**

Bauteile lassen sich auch mit Koordinatenmessmaschinen digitalisieren. In diesen Geräten werden die Bewegungen eines mechanischen Tasters im 3-Koordinatensystem über einen Sensor in elektrische Impulse umgewandelt und lassen sich so rechnergestützt digitalisieren.

Die Koordinatenmessgeräte zeichnen sich durch eine sichere Kalibrierung aus und liefern so exakte Messergebnisse, die in vielen Studien als Standard herangezogen werden.

Der Nachteil dieser Geräte ist darin zu sehen, dass die zu messenden Oberflächenpunkte einzeln angefahren werden müssen, somit ist das Verfahren sehr zeitaufwendig. [16]



### 2.11.3. Triangulationstechnik und strukturiertes Licht

In den letzten Jahren wurden optische 3D-Messanlagen entwickelt, die mit tastenden Lasersystemen oder der Projektion von strukturiertem Licht arbeiten.

Eine Grundlage dieser Systeme bildet die Triangulationstechnik. Das zu vermessende Objekt wird mit einer geeigneten Lichtquelle punkt-, linien- oder flächenhaft beleuchtet. Das projizierte Licht wird mit einem optoelektronischen Sensor (z.B. CCD-Kamera) aufgenommen, Lichtquelle und Sensor stehen in einem definierten Projektionswinkel zueinander, dieser wird als Triangulationswinkel bezeichnet.

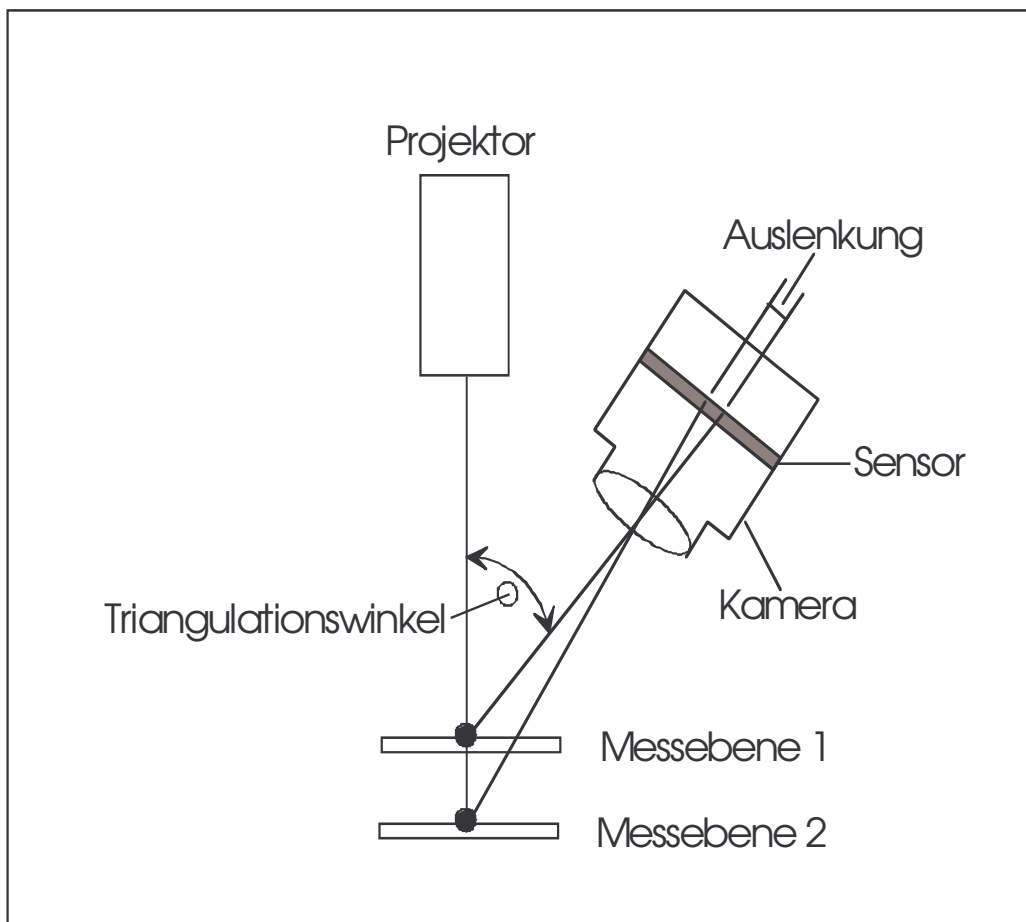


Abbildung 2.10.: Prinzip der Triangulationstechnik

Schräg projiziertes Licht wird je nach Gestalt der 3D-Objektoberfläche unterschiedlich stark ausgelenkt, diese Auslenkung wird von dem optischen Sensor

registriert. Über den Triangulationswinkel und das Maß der Auslenkung lassen sich so mathematisch Profilhöhen bestimmen (Abb. 2.10.).

Bei der Laserabtastung findet eine Bewegung des Objektes oder der Messapparatur statt, das heißt, ähnlich wie bei Koordinatenmessgeräten wird die Oberfläche punktuell abgetastet. Mit der flächenhaften Triangulationstechnik kann gleichzeitig ein größerer Objektbereich erfasst werden. Hierzu werden parallele äquidistante Linien auf die zu messende Oberfläche projiziert, über die Erfassung der Auslenkung der Streifen kann der Oberflächenprofilverlauf bestimmt werden.

Hinsichtlich der Messpunktzahl und der Messzeit sind diese optischen Systeme mechanisch oder optisch tastenden Geräten überlegen.

Die Messgenauigkeit bei den optischen 3D-Messanlagen wird durch die Größe des Lichtspots und der Pixel des CCD-Sensors sowie durch den Pixelabstand bestimmt. Ferner können sich Unterschnitte und der Zustand der Objektoberfläche nachteilig auf das Messergebnis auswirken. Mit definierten Bewegungen zwischen Objekt und Kamera bei den Messaufnahmen werden diese Nachteile kompensiert, aus den einzelnen Messaufnahmen wird am Ende rechnergesteuert ein Gesamtprofil erstellt. [16, 25, 26]

In Bereichen mit zunehmendem Triangulationswinkel und steigender Objektliniendichte (senkrechte Wände) kann es zu Abschattungen oder Überlagerung der Streifenstruktur kommen, so dass hier keine Vermessung erfolgen kann. [16]

Häufig beschränken auch glänzende Oberflächen die Einsatzmöglichkeit der 3D-Topometrie. Bei der Bestrahlung einer spiegelnden Oberfläche mit strukturiertem Licht wird in Glanzlichtern das projizierte Muster in der im Spiegelbild sichtbaren Focusebene beobachtet, die vor oder hinter der tatsächlichen Objektoberfläche liegen kann. Es können so Phantomflächen entstehen, die die Messung verfälschen. In solchen Fällen können zur Glanzvermeidung die Oberflächen mattiert werden.

Eine entsprechende Präparation kann irreversibel in Form von Sandstrahlen erfolgen oder reversibel mittels Auftrag von Pulverfilmen, beispielsweise Titandioxid. Es sollten möglichst dunkle Mattierungen weißen vorgezogen werden, um diffuse Interreflexionen innerhalb der Schicht auszuschließen. [13]

### **2.12. Formprüfung**

In der Industriellen Fertigungskontrolle werden auf der Basis von CAD-Datensätzen Bauteile auf ihre Übereinstimmung mit der Sollform überprüft. Die mit einem Bildaufnahmesystem gewonnenen digitalen Tiefenbilder können mit geeigneter Software auf unterschiedliche Weise miteinander verglichen werden. Neben der Ermittlung von Distanzen oder Winkel einzelner Merkmale oder Flächen können auch die einzelnen Oberflächenpunkte der Messobjekte miteinander verglichen werden. In der Regel werden die Messobjekte bezogen auf ein 3-Koordinatensystem vermessen. Ist eine eindeutige Objektpositionierung nicht gewährleistet, so können über drei Passmarken die Objekte präzise zueinander positioniert werden.

Ein weiterer Ansatz ist das sogenannte Best-Fit-Verfahren, hierbei wird über einen Algorithmus für jeden Oberflächenpunkt der nächstliegende des anderen Messobjektes ermittelt. Der Rechenvorgang wird wiederholt durchgeführt, bis die Differenz der zu vergleichenden Objekte relativ gering ist.

Aus den Oberflächenpunkten lassen sich auch Flächen regenerieren, die nach dem gleichen Prinzip miteinander verglichen werden.

Die Ausgabe der gemessenen Differenzen wird auf die Objektbilder projiziert in Form von Höhenlinien, Fehlerfarben oder Vektoren. Eine statistische Auswertung kann über Histogramme erfolgen. [4, 16, 24]

### **2.13. Fragestellung**

Mit einem Versuchsaufbau sollte geklärt werden, ob es möglich ist, Formveränderungen von Totalprothesen mit einer 3-D-Messeinrichtung zu ermitteln. Im Falle eines positiven Resultates sollte das Verfahren zur praktischen Anwendung kommen, um der Fragestellung des Formverhaltens von Totalprothesen in Geschirrspülmaschinen nachzugehen. Idee war es, die Basis von stilisierten Prothesen vor und nach der Behandlung im Geschirrspüler mit einem digitalen Scanner optisch zu erfassen. Anschließend sollte ein Vergleich der gewonnenen Datensätze erfolgen. Als Referenz diente in Wasser gelagerter totaler Zahnersatz, dessen Formverhalten in vitro annähernd den Bedingungen in vivo entspricht und somit zeitunabhängig als einsetzbar am Patienten zu bezeichnen ist.