

Aus der Klinik für Zahnärztliche Prothetik des  
Zentrums für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde am Universitätsklinikum Ulm

Ärztlicher Direktor: Prof. Dr. med. dent. Ralph G. Luthardt

Digitalisierung von Kiefermodellen zur Analyse  
von Änderungen der Zahnstellung und an der  
Zahnhartsubstanz in Rahmen des DFG  
geförderten Projekts: Multizentrische  
randomisierte Studie zahnärztlich-prothetischer  
Therapieformen der verkürzten Zahnreihe

Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades der Zahnmedizin

der Medizinischen Fakultät der Universität Ulm

vorgelegt von

Ruyi Ding

Geboren in Guizhou, China

2015

**Amtierender Dekan: Prof. Dr. Thomas Wirth**

**1. Berichterstatter: Prof. Dr. Ralph G. Luthardt**

**2. Berichterstatter: Prof. Dr. Dr. Alexander Schramm**

**Tag der Promotion: 15.12.2016**

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1	Therapeutische Konzepte .....	1
1.2	Multizentrische, randomisierte Studie zahnärztlich-prothetischer Therapieformen der verkürzten Zahnreihe .....	2
1.3	Digitalisierung und dreidimensionale Analysemethoden .....	6
1.4	Problemstellung.....	6
<b>2</b>	<b>Material und Methoden.....</b>	<b>7</b>
2.1	Fotodokumentation .....	8
2.2	Vorbereitung und Bearbeitung der Modelle.....	15
2.3	Digitale Datenerfassung und Dokumentation.....	15
2.4	Bearbeitung der digitalen Modelldaten.....	16
2.5	Räumliche Zuordnung der Vergleichsdaten .....	17
2.6	Dreidimensionale Modellanalyse.....	19
2.7	Statistik.....	21
<b>3</b>	<b>Ergebnisse .....</b>	<b>22</b>
3.1	Modellqualität .....	22
3.2	Visuelle Analyse.....	22
3.3	Graphische Darstellung der dreidimensionalen Modellanalyse der Studienkiefer .....	31
3.3.1	3D-Analyse der Studienkiefer der Therapie-Gruppe A .....	34
3.3.2	3D-Analyse der Studienkiefer der Therapie-Gruppe B .....	40

3.4	Analyse der Gegenkiefer und Vergleich mit den Studienkiefern .....	45
3.4.1	3D-Analyse der Gegenkiefer der Therapie-Gruppe A.....	46
3.4.2	3D-Analyse der Gegenkiefer der Therapie-Gruppe B.....	51
<b>4</b>	<b>Diskussion .....</b>	<b>56</b>
4.1	Dreidimensionale Analyse der Veränderungen der Zahnstellung und der Morphologie der Zähne und Übereinstimmung mit der makroskopischen Modellanalyse .....	59
4.2	Schlussfolgerung .....	62
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>64</b>
<b>6</b>	<b>Literatur .....</b>	<b>66</b>
<b>7</b>	<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>71</b>
<b>8</b>	<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>76</b>
	<b>Lebenslauf.....</b>	<b>77</b>
	<b>Danksagung .....</b>	<b>78</b>

# Abkürzungsverzeichnis

1. **3D**: dreidimensional
2. **ANOVA**: Analysis of Variance; Varianzanalyse
3. **ASCII**: American Standard Code for Information Interchange; Amerikanischer Standardkode für den Informationsaustausch.
4. **BOP**: Bleeding on probing; Bluten auf Sondieren, klinisches Zeichen von parodontaler Entzündung
5. **CAD**: Computer-aided design; Rechnerunterstütztes Konstruieren, das Konstruieren eines Objekts, beispielsweise einer dentalen Restauration, mittels elektronischer Datenverarbeitung.
6. **DFG**: Deutsche Forschungsgemeinschaft; Die zentrale Organisation zur Förderung der Forschung an Hochschulen und öffentlich finanzierten Forschungsinstituten in Deutschland.
7. **HIV**: Human immunodeficiency virus; Menschliches Immunschwäche-Virus oder auch Menschliches Immundefekt-Virus, befällt Zellen des menschlichen Immunsystems.
8. **ISO**: International Organization for Standardization, Internationale Organisation für Standardisierung
9. **MW**: Mittelwert; Tritt in der Mathematik und in der Statistik auf. Ein Mittelwert wird aus zwei oder mehr Zahlen als Durchschnittswert berechnet.
10. **PAR**: Parodontal, den Zahnhalteapparat betreffend
11. **PCP12**: periodontal color-coded probe; farbkodierte Parodontalmesssonde Nummer 12
12. **RaSDA**: The Randomized Shortened Dental Arch study; Randomisierte Studie zahnärztlich-prothetischer Therapieformen der verkürzten Zahnreihe.

13. **RMS**: Root Mean Square; Wurzel, die aus dem Mittelwert der Quadrate aller Abweichungen berechnet wird. Kann als Gütemaß für die Zuordnungsgenauigkeit bzw. die Übereinstimmung von Punktwolken und Flächen genutzt werden.
14. **SD**: Standardabweichung; zeigt die durchschnittliche Entfernung vom gemessenen Mittelwert.
15. **SDA**: The Shortened Dental Arch; Die verkürzte Zahnreihe, wird als Prämolarenokklusion, bevorzugt den Kontakt von mindestens 10 okkludierenden Zahnpaaren, definiert.
16. **STL**: Stereolithography Interface Format, auch: Standard Tessellation Language; Ursprüngliches CAD Datenformat, welches in ASCII oder in binärer Form vorkommen kann. Beschreibung von Flächen als vernetzte, triangulierte Punktwolke.
17. **z.B**: zum Beispiel

# 1 Einleitung

## 1.1 Therapeutische Konzepte

Fehlen alle Molaren in einem Kiefer gibt es drei Therapiemöglichkeiten, um das Problem zu beheben: (1) die sichere Prämolaren-Okklusion zu erhalten oder zu ermöglichen mit dem Konzept der verkürzten Zahnreihe (Shortened dental arch, SDA) [20, 21, 38] oder (2) durch herausnehmbaren Zahnersatz die fehlenden Molaren zu ersetzen, oder (3) Molarenersatz durch Implantat getragene, festsitzende Restaurationen zu schaffen. Aber nur die letzten zwei Versorgungsarten können die fehlenden Molaren wieder ersetzen. 1981 beschrieben Käyser et. al. das minimale Therapiekonzept für fehlende Molaren [16]. Dieses Konzept hat das Ziel, eine sichere und funktionelle Bezahnung mit 10 Zähnen in jedem Kiefer zu erreichen, beziehungsweise als minimale Lösung mit allen Frontzähnen und Prämolaren. Die Versorgung mit Implantat getragenen Zahnersatz bei fehlenden Molaren, mit Kronen oder Brücken, hat den Vorteil, dass der weitere Abbau von Alveolarfortsätzen und Kieferknochen aktiv vermieden oder mindestens für längere Zeit verzögert werden kann. Jedoch ist diese Therapie auf Implantaten meist mit hohen Kosten für die Patienten verbunden.

Die andere Therapiemöglichkeit mit herausnehmbarem Zahnersatz, nämlich die Prothese, erfüllt den Ersatzwunsch der fehlenden Molaren der Patienten und kann die Zufriedenheit und Lebensqualität der Patienten noch verbessern [21]. Jedoch ist bekannt, dass herausnehmbarer Zahnersatz mit verstärkter Belagbildung, einem hohen Kariesrisiko und fortschreitender parodontaler Schädigung einhergeht [14, 36, 37].

In einer multizentrischen, randomisierten Studie zur zahnärztlich-prothetischen Therapie der verkürzten Zahnreihe [20] werden die beiden Konzepte der Prämolarenbezahnung ohne

Molarenersatz und des Molarenersatzes mit herausnehmbaren Prothesen dokumentiert, um die Unterschiede und Veränderungen nach der Therapie zwischen den beiden Gruppen zu analysieren.

In der hier vorgestellten Studie wurde an einem Teil der Baseline-, Drei- und Fünf-Jahres-Modelle, die im Rahmen der RaSDA-Studie erstellt wurden, die Aspekte der möglichen Zahnstellungsänderungen und des Zahnhartsubstanzverlusts (durch z.B. Abrasion/Attrition) über die Zeit bei den verschiedenen Therapieformen analysiert und verglichen.

## **1.2 Multizentrische, randomisierte Studie zahnärztlich-prothetischer Therapieformen der verkürzten Zahnreihe**

Untersuchungen zum prothetischen Therapiekonzept der bilateralen verkürzten Zahnreihe durch randomisierte klinische Studien haben bislang noch gefehlt [21].

Eine multizentrische Studie zu zwei verschiedenen Versorgungskonzepten wurde unter Leitung der Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik der Technischen Universität Dresden durchgeführt. In dieser prospektiven, randomisierten, multizentrischen (in 14 Universitäten in Deutschland), klinischen Studie gemäß der aktuellen Deklaration von Helsinki [20] und den Guidelines of Good Clinical Practice in Europe [20] wurden Patienten nach bestimmten Einschlusskriterien entweder mit Attachment-verankertem Zahnersatz (partieller Zahnersatz mit Molarenersatz → Therapie A) oder nach dem Konzept der verkürzten Zahnreihe (Prämolarenokklusion durch festsitzenden Zahnersatz → Therapie B) prothetisch versorgt [20].

Die Ein- und Ausschlusskriterien waren wie folgt festgelegt:

Einschlusskriterien:

Patienten, die über 35 Jahre alt sind und eine bilaterale verkürzte Zahnreihe aufweisen, entsprechend einer Kennedy-Klasse I mit erstem Prämolare und/oder zweitem Prämolare als endständigem Zahn bei vorhandenen Eckzähnen. Die Situation musste mit konventionellen zahnärztlich-prothetischen Konzepten zu versorgen sein.

Weiterhin war eine schon abgelehnte implantologische Therapie durch den Patienten nach vorheriger Aufklärung erforderlich.

Eine erfolgreiche parodontologische Therapie der Pfeilerzähne war Voraussetzung. Sondierungstiefen durften nicht größer als 4mm (PAR-Sonde PCP12) sein. Es durfte kein Bleeding on probing (BOP), Blutung bei Sondierung, auftreten. Der Lockerungsgrad der Pfeilerzähne durfte nicht mehr als Grad II betragen. Bei der röntgenologischen Diagnostik mussten die Pfeilerzähne noch mindestens mit einem Drittel der Wurzellänge im Knochen stehen. Die Pfeilerzähne mussten vital sein oder durch eine suffiziente endodontische Behandlung versorgt werden, welche im röntgenologischen Bildverfahren frei von pathologischen Veränderungen und ohne klinische Symptomatik sein musste. Auch der Gegenkiefer musste suffizient versorgt sein oder auch im Zuge der Therapie versorgt werden.

#### Ausschlusskriterien:

Die folgende Patienten Gruppen wurde von der Teilnahme an der Studie ausgenommen: Alkoholiker und Drogenabhängige, psychisch instabile Patienten, Patient mit akuten Symptomen einer Funktionsstörung entsprechend Grad II des anamnestischen Dysfunktionsindex nach Helkimo [15] bzw. klinischem Dysfunktionsindex Grad III. Weiterhin ausgeschlossen waren Patienten mit Dysgnathien der Angle Klasse II und III mit einem Distal- bzw. Mesialbiss von mehr als einer Prämolarenbreite, Patienten, die kieferorthopädisch behandelt wurden oder behandelt werden sollten, Patienten, bei denen

eine suffiziente Versorgung bestand und Patienten, die auf eine herausnehmbare Versorgung mit Molarenersatz zur Wiederstellung der Zahnreihe bestanden.

Patienten mit nachfolgenden Allgemeinerkrankungen: juveniler und nicht medikamentös eingestellter Diabetes, unbehandelte endokrine Erkrankungen, aktive Tuberkulose, chronischen Herzerkrankungen, Erkrankungen der Herzklappen, akute und chronische Hepatitis, HIV, Nierenversagen, Kollagenosen, Lymphogranulomatose, schwere Störungen des Blutbildes, chronische Erkrankungen mit einer Lebenserwartung unter 5 Jahren, Leberdysfunktionen, Osteoporose, sowie Patienten mit Antikoagulantien-Therapie, Antikonvulsiva-Therapie, immunsuppressiver Therapie, langandauernder Steroidgabe oder Strahlentherapie wurden ebenfalls von der Teilnahme ausgeschlossen.

Patienten, bei denen im Nachhinein eine schwere systemische Erkrankung respektive eine Krankheit mit maßgeblichem Einfluss auf das Behandlungsergebnis festgestellt wurde, wurden bei der Auswertung der Studie nicht berücksichtigt.

Patienten, die die Ein- und Ausschlusskriterien erfüllten, wurden durch ein randomisiertes Verfahrenes verschiedenes Therapiekonzept (Therapie A oder Therapie B) zugeteilt.

Hauptzielgröße der Studie ist weiterer Zahnverlust [38]. Nebenzielgrößen sind neben dem Zusammenbruch des Versorgungskonzeptes, dem Auftreten dauernder oder rezidivierender Schmerzen entsprechend des anamnestischen Helkimo-Index Grad II oder des anamnestischen Index nach Dworkin [11], der Adaptation der prothetischen Versorgung, der funktionellen Gesundheit (Kiefergelenke, Kaumuskulatur), der Mundhygiene, der parodontalen Gesundheit, der Zahngesundheit, der Patientenzufriedenheit und der Funktion der prothetischen Versorgung, die Veränderungen der Zahnstellung und -morphologie sowie die Veränderung der zahnlosen Kieferabschnitte nach Versorgung mit partiellem Zahnersatz

mit Molarenersatz (Therapie A) oder nach dem Konzept der verkürzten Zahnreihe (Prämolarenokklusion durch festsitzenden Zahnersatz, Therapie B).

Hinsichtlich der Veränderungen der Zahnstellung und -morphologie wurden klinisch folgende Befunde im Rahmen der Studie erhoben:

Abrasion/Attrition:

0: Keine Facetten;

1: Facetten im Schmelz;

2: Facetten im Dentin;

3: Starke Attritionen im Dentin;

Auffächerung:

Durch Prüfung der Approximalkontakte mit Metallehren (Fühlerlehren) unterschiedlicher Stärke (0,1mm; 0,5mm; 1mm) kann dessen Breite gemessen und bewertet werden.

0: <0,1mm

1: <0,5mm

2: 0,5-1mm

3: >1mm

### **1.3 Digitalisierung und dreidimensionale Analysemethoden**

Digitalisierungsverfahren werden zur Messung des Verschleißes von Füllungswerkstoffen beim Vorher-Nachher-Vergleich [5], oder zur Ermittlung der Spaltbreiten von Kronen [19] eingesetzt. Sie können auch zur Analyse von Veränderungen an Gipsmodellen über die Zeit [26] oder zur Ermittlung der Präzision von Abformungen mit unterschiedlichen Materialien, Konsistenten und Techniken und den daraus resultierenden Meistermodellen eingesetzt werden [19, 22, 23, 25, 27]. Diese Methodik lässt sich auf Veränderungen der Zahnstellung und -morphologie übertragen.

### **1.4 Problemstellung**

Ziel der hier vorgestellten Untersuchungen war es, Veränderungen der Zahnstellung und -morphologie bei einem Teil, der in der DFG-geförderten, multizentrischen, randomisierten Studie zahnärztlich-prothetischer Therapieformen der verkürzten Zahnreihe (RaSDA) eingeschlossenen Patienten objektiv zu erfassen und möglichst exakt zu quantifizieren, sowie die Lokalisation der Änderungen in farbkodierten Differenzbildern darzustellen.

## 2 Material und Methoden

Die Modelle der RaSDA-Studie wurden zentral gesammelt (Universität Dresden). Dort erfolgte die Modellauswahl zufällig. Ein Testfall für die Erarbeitung des Analyse-Prozederes und 10 weitere Fälle, je fünf mit Molarenersatz und fünf mit verkürzter Zahnreihe wurden nach Ulm gesandt.

Auswahlkriterien dabei waren vollständige Modellsätze über 5 Jahre, ausreichende Modellqualität, Abformung mit eingegliedertem Zahnersatz, und eindeutige Zuordnung von Ober- und Unterkiefermodellen des zugehörigen Falles.

Vier bis acht Wochen nach Eingliederung der definitiven prothetischen Versorgung fand die erste Baseline-Untersuchung statt. Auch bei den nachfolgenden Drei- und Fünf-Jahreskontrollen wurden die Studienkiefer und die entsprechenden Gegenkiefer mit Rimlock-Löffeln und Alginat abgeformt und mit Superhartgips Fuji-Rock (Typ IV), der unter Vakuum angemischt wurde, in den jeweiligen Studienzentren ausgegossen.

Die Ausgangs-, 3-Jahres- und 5-Jahresmodelle wurden zur Bewertung der Veränderungen an den Zahnhartsubstanzen und Zahnstellungen digitalisiert und zwar sowohl die Studien- als auch die jeweiligen Gegenkiefer. Alle Ausgangsmodelle der Patienten wurden nach Digitalisierung von Punktwolken in ein Flächenmodell rückgeführt. Die 3- und 5-Jahres-Modelle wurden nach Digitalisierung als Punktwolken den jeweiligen Flächenmodellen des Ausgangsmodells zugeordnet. Damit ist es möglich, die dreidimensionalen räumlichen Veränderungen errechnen, visualisieren und vergleichen zu können. Aus diesen Daten lassen sich die Morphologie und Stellungsänderungen der Zähne dreidimensional (3D) ermitteln.

## **2.1 Fotodokumentation**

Bei den 11 ausgewählten Patientenfällen waren drei der Studienkiefer Oberkiefer und 8 waren Unterkiefer. Alle erhaltenen Ausgangsmodelle der 11 Patientenfälle wurden fotodokumentiert (Abb. 1 – 11).



Abb. 1: Fall 1 der ausgewählten Modelle aus der Multizentrischen Studie zur Therapie der verkürzten Zahnreihe; Studienkiefer (Oberkiefer) in der Aufsicht (oben) und von frontal (unten), von links nach rechts: Baseline, 3-Jahre, 5-Jahre, Versorgung: partielle Prothese, Therapie Gruppe A.



Abb. 2: Fall 2 der ausgewählten Modelle aus der Multizentrischen Studie zur Therapie der verkürzten Zahnreihe; Studienkiefer (Unterkiefer) in der Aufsicht (oben) und von frontal (unten), von links nach rechts: Baseline, 3-Jahre, 5-Jahre, Versorgung: festsitzender Zahnersatz, Therapie Gruppe B



Abb. 3: Fall 3 der ausgewählten Modelle aus der Multizentrischen Studie zur Therapie der verkürzten Zahnreihe; Studienkiefer (Oberkiefer) in der Aufsicht (oben) und von frontal (unten), von links nach rechts: Baseline, 3-Jahre, 5-Jahre, Versorgung: partielle Prothese, Therapie Gruppe A



Abb. 4: Fall 4 der ausgewählten Modelle aus der Multizentrischen Studie zur Therapie der verkürzten Zahnreihe; Studienkiefer (Oberkiefer) in der Aufsicht (oben) und von frontal (unten), von links nach rechts: Baseline, 3-Jahre, 5-Jahre, Versorgung: festsitzender Zahnersatz, Therapie Gruppe B



Abb. 5: Fall 5 der ausgewählten Modelle aus der Multizentrischen Studie zur Therapie der verkürzten Zahnreihe; Studienkiefer (Unterkiefer) in der Aufsicht (oben) und von frontal (unten), von links nach rechts: Baseline, 3-Jahre, 5-Jahre, Versorgung: festsitzender Zahnersatz, Therapie Gruppe B



Abb. 6: Fall 6 der ausgewählten Modelle aus der Multizentrischen Studie zur Therapie der verkürzten Zahnreihe; Studienkiefer (Unterkiefer) in der Aufsicht (oben) und von frontal (unten), von links nach rechts: Baseline, 3-Jahre, 5-Jahre, Versorgung: festsitzender Zahnersatz, Therapie Gruppe B



Abb. 7: Fall 7 der ausgewählten Modelle aus der Multizentrischen Studie zur Therapie der verkürzten Zahnreihe; Studienkiefer (Unterkiefer) in der Aufsicht (oben) und von frontal (unten), von links nach rechts: Baseline, 3-Jahre, 5-Jahre, Versorgung: partielle Prothese, Therapie Gruppe A



Abb. 8: Fall 8 der ausgewählten Modelle aus der Multizentrischen Studie zur Therapie der verkürzten Zahnreihe; Studienkiefer (Unterkiefer) in der Aufsicht (oben) und von frontal (unten), von links nach rechts: Baseline, 3-Jahre, 5-Jahre, Versorgung: partielle Prothese, Therapie Gruppe A



Abb. 9: Fall 9 der ausgewählten Modelle aus der Multizentrischen Studie zur Therapie der verkürzten Zahnreihe; Studienkiefer (Unterkiefer) in der Aufsicht (oben) und von frontal (unten), von links nach rechts: Baseline, 3-Jahre, 5-Jahre, Versorgung: festsitzender Zahnersatz, Therapie Gruppe B



Abb. 10: Fall 10 der ausgewählten Modelle aus der Multizentrischen Studie zur Therapie der verkürzten Zahnreihe; Studienkiefer (Unterkiefer) in der Aufsicht (oben) und von frontal (unten), von links nach rechts: Baseline, 3-Jahre, 5-Jahre, Versorgung: partielle Prothese, Therapie Gruppe A



Abb. 11: Fall 11 (Pilotfall) der ausgewählten Modelle aus der Multizentrischen Studie zur Therapie der verkürzten Zahnreihe; Studienkiefer (Unterkiefer) in der Aufsicht (oben) und von frontal (unten), von links nach rechts: Baseline, 3-Jahre, 5-Jahre, im Studienkiefer Bezzahnung von 35-45 belassen (keine Restauration mit festsitzendem Zahnersatz notwendig, mit natürlicher verkürzten Zahnreihe)

## **2.2 Vorbereitung und Bearbeitung der Modelle**

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden alle Studien- und Gegenkiefer-Modelle zunächst visuell erfasst und bewertet. Beurteilt wurden dabei die Oberflächenqualität, das Vorhandensein von Alginatrückständen auf dem Gips, Gipsperlen sowie Blasen im Modell. Visuell erkennbare Modellfehler wurden vor der berührungslos-optischen Digitalisierung geschwärzt (Abb. 1-11), um eine negative Beeinflussung der Messdaten zu vermeiden. Die so vorbereiteten Gipsmodelle (je Patientenfall mit Baseline-, Drei- und Fünf-Jahres-Kontrollmodellen von jeweils Studienkiefer und Gegenkiefer) wurden von allen 11 Patienten, insgesamt also 66 Gipsmodelle, digitalisiert und einander räumlich korrekt zugeordnet und dreidimensional analysiert.

## **2.3 Digitale Datenerfassung und Dokumentation**

Die Ganzkiefermodelle wurden mit dem hochauflösenden optischen Digitalisiersystem digiSCAN (digiDent GmbH, Pforzheim, Deutschland) berührungslos-optisch vermessen. Dabei handelt es sich um ein Weißlicht-Streifenprojektionsverfahren (Messunsicherheit laut Hersteller  $\sim 16\mu\text{m}$ ). Dazu wurden alle Modelle auf dem Objektträger des Digitalisiergerätes mit Gips in der optimalen Höhe fixiert, die genau 67mm über der Unterkante des Objektträgers und in der Mitte des Messvolumens liegt, damit die beste Messposition und der kleinstmögliche Messfehler erreicht werden konnten. Mit einem intern entwickelten Messplan (11x12sym QL von einem Mitarbeiter der Klinik für Zahnärztliche Prothetik, Ulm), welcher je 11 Phasenshift-Aufnahmen in 12 verschiedenen Positionen des großen Drehtisches des Digitalisiergerätes liefert, wurden alle Gipsmodelle hochpräzise digitalisiert. Der Vorteil dieses Messplans liegt darin, dass bei Ganzkiefermodellen auch Hinterschnitte

weitgehend erfasst werden können. Für jede Ganzkiefer-Modellvermessung wurde eine Messzeit von ca. einer halben Stunde benötigt.

Die resultierenden Datensätze, sogenannte Messpunktewolken, wurden dann anschließend mit einer Visualisierungs- und Bearbeitungssoftware (Argus, Fraunhofer Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik, IOF, Jena) kontrolliert. In den Punktewolken ist jeder Punkt durch seine Koordinaten X, Y und Z, dreidimensional definiert und die Punkte repräsentieren in ihrer Gesamtheit die Oberfläche des jeweiligen Gipsmodelles. Die Daten wurden im Anschluss von digitalisierungsbedingten Ausreißer- und Streupunkten befreit. Anschließend wurden die Datensätze grob beschnitten. Ausreißerpunkte wurden automatisch mit einem Software-integrierten Filter entfernt (Einstellung: Toleranz 300, Mindestgröße der Inseln 100, Mindestgröße der Startinseln 4). Zur weiteren Bearbeitung wurden dann die Daten im ASCII-Format exportiert. Eine weitere Optimierung der Qualität der digitalen Datensätze erfolgte in einer dreidimensionalen CAD-Software (Surfacer, Version 10.6 SDRC Imageware, Neu-Inselberg). Die Daten wurden im STL-Datenformat exportiert und für die weitere Bearbeitung gespeichert.

## **2.4 Bearbeitung der digitalen Modelldaten**

Nach Optimierung der vorbereiteten Datensätze der Gipsmodelle wurden zuerst alle Baseline-Modelle von Punktewolken zu Flächenmodellen zurückgeführt, um einen Vergleich mit den Daten der Drei- und Fünf-Jahresmodelle zu ermöglichen, da eine mathematische Berechnung zwischen zwei ungeordneten Punktewolken nicht möglich ist. Die Flächenrückführung der Baselinedaten erfolgte mit der Software Geomagic Studio 9 (Geomagic Inc., Research Triangle, NC, USA) mit den vorbereiteten STL-Datensätzen. Die

Fläche entstand durch die Triangulation einzelner Punkte der Punktwolken, wobei je drei benachbarte Punkte der Wolke ein Dreieck bilden, und die vielen kleinen Dreiecke wiederum die Oberfläche des entsprechenden Modelles beschreiben.

## **2.5 Räumliche Zuordnung der Vergleichsdaten**

Die 3-Jahres und 5-Jahres-Datensätze wurden mit derselben, zuvor beschriebene Methode digitalisiert und gefiltert. Die dreidimensionalen Punktwolken der 3- und 5-Jahresmodelle wurden den jeweiligen Baseline-Flächenmodellen zugeordnet. Da jeder Datensatz zunächst in seinem eigenen, von anderen Datensätzen stets verschiedenen Messkoordinatensystem vorliegt, mussten alle zu vergleichenden Datensätze zunächst in ein gemeinsames Koordinatensystem eingeordnet werden (Abb. 12). Diesen Vorgang nennt man auch Registrierung (oder englisch „alignment“). Hierbei versucht die Software (Geomagic Studio 9), die beiden zu vergleichenden Datensätze mit dem kleinstmöglichen Fehler in Übereinstimmung zu bringen, das heißt, die beiden möglichst exakt zu überlagern. Dazu wurde eine Kopie der zu bewegenden Punktwolke erstellt und aus dieser alle veränderlichen oder deutlich abweichenden Bereiche herausgeschnitten. Der Vorgang des Beschneidens und Zuordnens erfolgte iterativ und wurde mehrfach wiederholt. Für die Bewegung der Punktwolke zum Baseline-Flächenmodell hin wurde der jeweilige Vektor in Form einer Transformationsmatrix gespeichert.

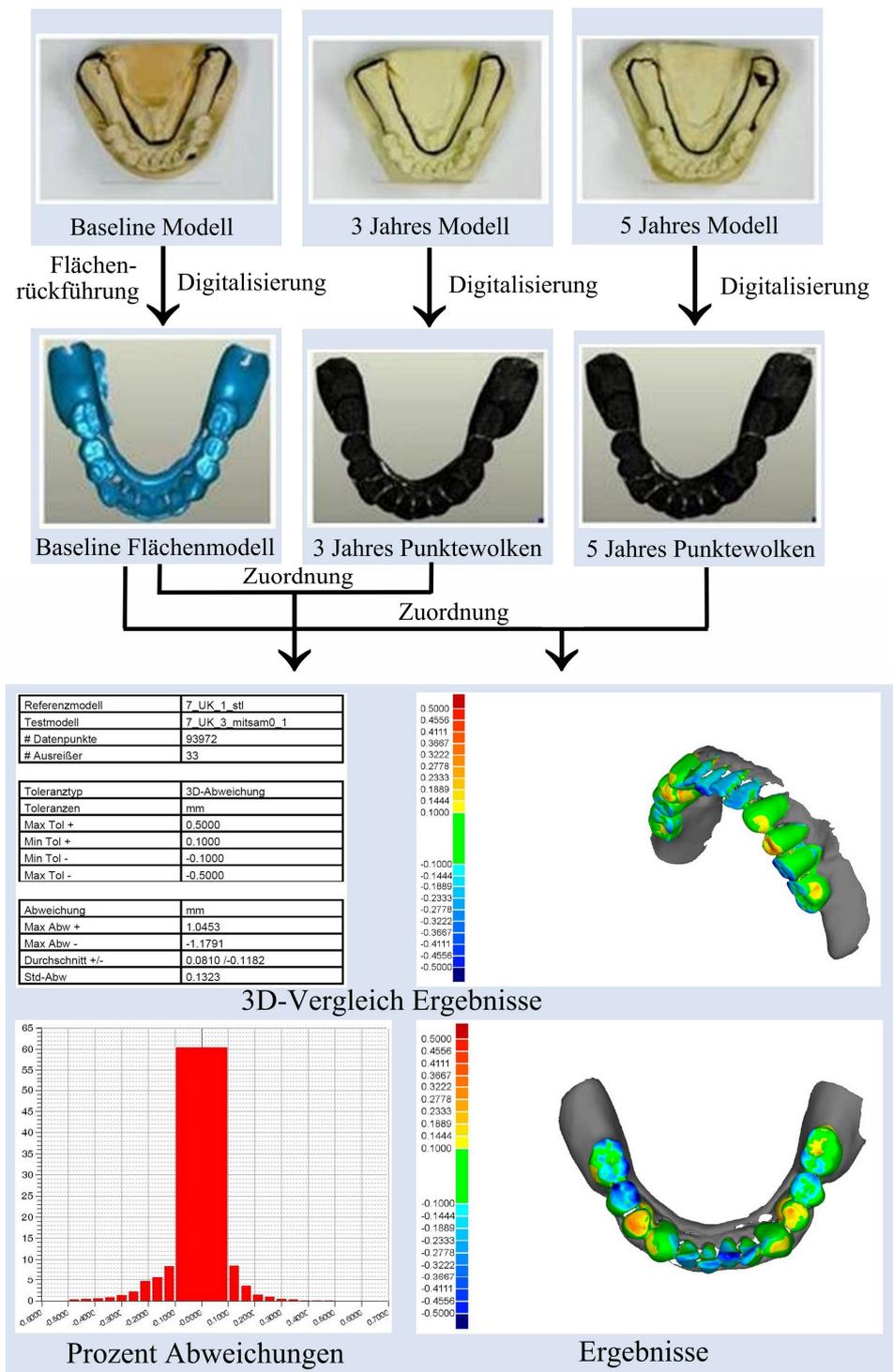


Abb. 12: Versuchsaufbau zur Analyse von Zahnstellungs- und -morphologieänderungen nach Eingliederung von Zahnersatz über die Zeit mittels Digitalisierung, Flächenrückführung, Zuordnung und 3D-Analyse. Die Ergebnisdarstellung erfolgt quantitativ (einschließlich Häufigkeitsverteilung) und qualitativ in farbkodierten Differenzbildern, wobei Blautöne negative Abweichungen und gelb-orange-rote Töne positive Abweichungen im Vergleich zur Referenz darstellen.

Diese Transformationsmatrix konnte erneut aufgerufen und zum Zweck der identischen Verschiebung auf die unbeschnittene Punktwolke angewendet werden.

Um den Einfluss der Zuordnung auf den systematischen Fehler der Analyse beurteilen zu können, wurde dabei der RMS-Fehler (englisch „root mean square“, Wurzel der mittleren quadratischen Abweichung) erfasst. Diese Zuordnung nach dem Best-fit-Prinzip wurde mehrfach wiederholt, bis sich keine weitere Verminderung des RMS-Fehlers erzielen ließ. Es wurden möglichst kleine RMS-Werte angestrebt. Die Endpassung wurde auch qualitativ bei starker Vergrößerung am Monitor kontrolliert. Die nach Zuordnung noch vorliegende Abweichung beinhaltet für die weitere Analyse dabei die mögliche Abweichung der Zahnstellung und die Veränderung der Morphologie.

## **2.6 Dreidimensionale Modellanalyse**

Nach Digitalisierung und Zuordnung wurden alle 3- und 5-Jahres-Studienkiefer-Modelle, also die jeweilige Situation nach Eingliederung des Zahnersatzes, im Vergleich zum jeweiligen CAD-Baseline-Flächenmodell dreidimensional analysiert (Geomagic Qualify 9, Geomagic Inc. Research Triangle, NC, USA). Mit den visuell dargestellten farbkodierten Differenzen wurde die Abweichung zwischen den beiden Datensätzen dargestellt. Die Veränderung hinsichtlich der Zahnstellung und morphologischen Abweichungen konnten nachvollzogen werden.

Die Funktion der 3D-Analyse in dem CAD-Programm Geomagic Qualify 9 erlaubt es, die räumliche Abweichung im Dreidimensionalen hinsichtlich der Veränderung der Zahnstellung und Morphologie von der Baseline zu den Drei- und Fünf-Jahresmodellen zu berechnen und farbkodiert zu visualisieren. Die Software gibt die Differenz der

Punktewolken zum Baseline-Flächenmodell in Minima, Maxima, Mittelwerten und Standardabweichung an. Es erfolgt zusätzlich eine Darstellung im farbkodierten Bild. Aus diesen Daten ließen sich dreidimensionale Stellungsänderungen und Verlust von Hartsubstanz (Abrasion) der Zähne ermitteln.

Die qualitative Analyse mit der Software Geomagic Qualify kann mit einem farbkodierten Bild dargestellt werden. Die Abweichungen jeder Punktewolke der 3- und 5-Jahres-Modelle zum CAD-Baseline-Flächenmodell kann man deutlich mit der Verteilung von verschiedenen Farbtönen nachvollziehen. Die Darstellungsfarbtöne wurden einheitlich für die gesamte Analyse auf 15 Farbtöne eingestellt. Um eine deutliche und möglichst exakte Darstellung der Unterschiede zwischen den gefilterten 3- oder 5-Jahres-Punktewolken und den jeweiligen Baseline-Flächenmodellen zu erreichen, wurden die zugeordneten Wolken jeweils für Hartsubstanz mit Zahnkranz und mit Weichteilen und/oder Kunststoff-Prothesenbasis getrennt analysiert. Bei der Zuordnung der Zahnhartsubstanz/Zahnkranz-Punktewolken wurde die Farbdifferenz-Skala auf 0,05mm (50µm) Schritte eingestellt. Wegen der dort auftretenden größeren Variabilität wurde hingegen bei der Zuordnung mit den Weichteilen oder dem Prothesenkunststoff (den Punktewolken) die Farbdifferenz-Skala auf 0,1mm (100µm) Schritte eingestellt.

Die Differenzen zwischen den 3- oder 5-Jahres-Modellen zu den Baseline-Flächenmodellen wurden im positiven und negativen Bereich wiedergegeben.

Bei der Hartsubstanz/Zahnkranz-Analyse wurde ein Toleranzbereich (grün) von -0,1mm bis +0,1mm eingestellt. Bei der Analyse von Weichteilen/Kunststoff wurde dieser Bereich auf -0,2mm bis +0,2mm eingestellt. Alle im Positiven darüberhinausgehenden Differenzen wurden mit Farbtönen von gelb über orange bis rot dargestellt, die Farbtöne von hellblau bis

dunkelblau bedeuteten dagegen, dass negative Abweichungen im Vergleich zum Baseline-Modell vorlagen.

Die qualitativen Analyse-Ergebnisse der Software Geomagic Quality konnten anschließend noch aus den verschiedenen ISO-Ansichten (vorne, hinten, links, rechts, oben unten, schräg von vorne, schräg von hinten) gut beobachtet und ausgewertet werden.

## **2.7 Statistik**

Die Statistische Auswertung des RMS-Fehlers erfolgte deskriptiv anhand der Maxima, Minima, Mittelwerte und Standardabweichung getrennt für die Studien- und die Gegenkiefer. Ebenfalls deskriptiv erfolgte die quantitative und qualitative 3D-Analyse der Studien- und Gegenkiefer über die Zeit, wobei jeweils die mittleren Differenzen vom 3-Jahres-Modell zum Baseline-Modell und die Differenzen zwischen 5-Jahres-Modell und Baseline-Modell betrachtet wurden. Lokalisation und Richtung der Abweichungen, lokale Maxima und Minima, wurden den farbkodierten Differenzbildern entnommen.

## **3 Ergebnisse**

### **3.1 Modellqualität**

Die Forschungsmodelle sind multizentrisch nach den gleichen Arbeitsanweisungen hergestellt worden. Die Modellqualität der ausgewählten Fälle wurde für gut befunden. Alle Modelle der 11 Patientenfälle konnten verwendet werden.

### **3.2 Visuelle Analyse**

Mittels visueller Beurteilung wurden bei den Studienkiefern in drei Fällen (Patient 1, 5 und 11) eine Zahnstellungsänderung und in fünf Fällen (Patient 2, 4, 5, 10, 11) Zähne mit Abrasionen makroskopisch beobachtet. Bei den Gegenkiefern wurde in vier Fällen (Patient 2, 3, 4 und 6) eine Zahnstellungsänderung und in neun Fällen (Patient 1, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 10 und 11) eine Abrasion vorgefunden (Tabellen 1-4).

Tab. 1: Modellqualität und visuelle vergleichende Beurteilung der 3- und 5-Jahres-Modelle mit dem jeweiligen Baseline-Modell (Modell-Nr.: 1-3)

Modell-Nr.	Modell-Qualität Verwendbar(ja/nein)	Kiefer Studie/Gegen	Versorgungsart	Zahnstellungsänderung sichtbar Wo?	Abrasion sichtbar Wo?	Front protrudiert	Bemerkung
1-OK-1	gut/ja	Studien	Oberkiefer partielle Prothese				
1-OK-3	gut/ja		Geschiebe an 14,24	11,21			
1-OK-5	gut/ja		Ersatz 17,16,15,25,26,27	11,21			
1-UK-1	gut/ja	Gegen	Unterkiefer Teleskopprothese				
1-UK-3	gut/ja		Teleskopkronen 34,33,43		33 inzisal		
1-UK-5	gut/ja		Ersatz 36,35,44,45,46		UK Front		
2-OK-1	gut/ja	Gegen	Oberkiefer partielle Prothese				
2-OK-3	gut/ja		Ersatz 14,25,26				große Perlen auf Okklusalflächen
2-OK-5	gut/ja						unklare Schwarzfärbung an 13 und Gingivalen über 11
2-UK-1	gut/ja	Studien	Unterkiefer festsitzende Versorgung			ja	33 Abplatzung in Gips
2-UK-3	gut/ja		Brücke 35,34,33		34	ja	
2-UK-5	gut/ja		Brücke 43,44,45		34,33	ja	
3-OK-1	gut/ja	Studien	Oberkiefer partielle Prothese			ja	partielle Prothese entfernt schaumige Erscheinung
3-OK-3	gut/ja		Brücke 14-24; Geschiebe an 14,24			ja	große Blase an 11
3-OK-5	gut/ja		Ersatz 16,15,25,26			ja	zwei "gefüllte" Blasen an 11,21; zervikal u. regio 23 vestibulär Frässpuren
3-UK-1	gut/ja	Gegen	Unterkiefer festsitzende Versorgung				
3-UK-3	gut/ja		Brücke 44-46	35 zu 36; 31,41			
3-UK-5	gut/ja		3 u, 5 Jahre zusätzliche Brücke 37-35	31,41,42	34		

Tab. 2: Modellqualität und visuelle vergleichende Beurteilung der 3- und 5-Jahres-Modelle mit dem jeweiligen Baseline-Modell (Modell-Nr.: 4-6)

Modell-Nr.	Modell-Qualität Verwendbar(ja/nein)	Kiefer Studie/Gegen	Versorgungsart	Zahnstellungsänderung sichtbar Wo?	Abrasion sichtbar Wo?	Front protrudiert	Bemerkung
4-OK-1	gut/ja	Studien	Oberkiefer festsitzende Versorgung				
4-OK-3	gut/ja		Brücke 15-25		14,24,25		
4-OK-5	gut/ja				14,24,25		
4-UK-1	gut/ja	Gegen	Unterkiefer festsitzende Versorgung	Front		ja	
4-UK-3	gut/ja		Brücke 43-45; neue Versorgung 35-45		35, 33, 32	ja	
4-UK-5	gut/ja		neue Versorgung 35-45				
5-OK-1	gut/ja	Gegen	Oberkiefer Totalprothese				
5-OK-3	gut/ja		Ersatz: 17-27		16, 15		
5-OK-5	gut/ja				16, 15, 13		
5-UK-1	gut/ja	Studien	Unterkiefer festsitzende Versorgung	32, 31, 41, 42		ja	
5-UK-3	gut/ja		Brücke 35-33; 43-45		42	ja	
5-UK-5	gut/ja				42	ja	
6-OK-1	gut/ja	Gegen	Oberkiefer festsitzende Versorgung	Lücke 22-23			16 distobukkale Ecke angeklebt; Modelloberflächen porös
6-OK-3	gut/ja		Brücke 25- 23; zusätzliche Brücke 13-15				neue Versorgung Brücke 15-13
6-OK-5	gut/ja		zusätzliche Brücke 13-15				zusätzliche Brücke 26-27
6-UK-1	gut/ja	Studien	Unterkiefer festsitzende Versorgung				
6-UK-3	gut/ja		Brücke 35-33				
6-UK-5	gut/ja						

Tab. 3: Modellqualität und visuelle vergleichende Beurteilung der 3- und 5-Jahres-Modelle mit dem jeweiligen Baseline-Modell (Modell-Nr.: 7-9)

Modell-Nr.	Modell-Qualität Verwendbar(ja/nein)	Kiefer Studie/Gegen	Versorgungsart	Zahnstellungsänderung sichtbar Wo?	Abrasion sichtbar Wo?	Front protrudiert	Bemerkung	
7-OK-1	gut/ja	Gegen	Oberkiefer partielle Prothese					
7-OK-3	gut/ja		Ersatz 14,15,24-26		11			
7-OK-5	gut/ja				16		Oberflächen schaumig, porös	
7-UK-1	gut/ja	Studien	Unterkiefer partielle Prothese				große Blasen regio sublingualbügel	
7-UK-3	gut/ja		Ersatz 36, 46				Front dünner als Baseline	
7-UK-5	gut/ja				Prothese Zähne			
8-OK-1	gut/ja	Gegen	Oberkiefer festsitzende Versorgung			ja	Zahn 21 geklebt	
8-OK-3	gut/ja		Brücke 16-14; 24-27			ja		
8-OK-5	gut/ja				Lücke 21, 22	ja		
8-UK-1	gut/ja	Studien	Unterkiefer partielle Prothese			ja	31, 41 lingual gesamte Oberfläche inhomogen	
8-UK-3	gut/ja		Ersatz 36, 46			ja	Blasen 44 mesial	
8-UK-5	gut/ja					ja		
9-OK-1	gut/ja	Gegen	Oberkiefer festsitzende Versorgung					
9-OK-3	gut/ja		Krone 14-15; Brücke 12-21					11 vestibulär, inzisal Absplitterung
9-OK-5	gut/ja				23 inzisal			11 massiger, verzogene Abformung, defekte Verblendung
9-UK-1	gut/ja	Studien	Unterkiefer festsitzende Versorgung					
9-UK-3	gut/ja		Brücke 36-33, Anhang 36					
9-UK-5	gut/ja							

Tab. 4: Modellqualität und visuelle vergleichende Beurteilung der 3- und 5-Jahres-Modelle mit dem jeweiligen Baseline-Modell (Modell-Nr.: 10-11)

Modell-Nr.	Modell-Qualität Verwendbar(ja/nein)	Kiefer Studie/Gegen	Versorgungsart	Zahnstellungsänderung sichtbar Wo?	Abrasion sichtbar Wo?	Front protrudiert	Bemerkung		
10-OK-1	gut/ja	Gegen	Oberkiefer Totalprothese 16-26		13, 21, 25, 26		regio 21 vestibulär "Delle" auf Modell		
10-OK-3	gut/ja								
10-OK-5	gut/ja							zusätzlich 12, 22, 24	
10-UK-1	gut/ja	Studien	Unterkiefer partielle Prothese			ja			
10-UK-3	gut/ja					Ersatz 36, 46, Brücke 33-43		ja	
10-UK-5	gut/ja							ja	
11-OK-1	gut/ja	Gegen	Oberkiefer Totalprothese 16-26			ja	Umschlagfalte fehlt, Front nur Zahnkranz, im Gaumen Frässpuren		
11-OK-3	gut/ja					15, 24, 25		ja	
11-OK-5	gut/ja					15, 14, 24, 25		ja	
11-UK-1	gut/ja	Studien	Unterkiefer native Einzel Zähne 35-45						
11-UK-3	gut/ja							31, 32	35, 45
11-UK-5	gut/ja							31, 32; Lücke 32, 33	45

In dieser Studie wurden fünf Patienten mit partiellen Prothesen zum Molarenersatz aus der Therapiegruppe A und fünf Patienten mit feststehendem Zahnersatz für die Rekonstruktion zum SDA, der verkürzten Zahnreihe, aus der Gruppe B, sowie ein zusätzlicher Pilotfall von einem Patienten mit eigenen, natürlichen Zähnen im Unterkiefer und verkürzter Zahnreihe untersucht.

Für alle räumlichen Zuordnungen mit der Software Geomagic Studio wurde die Zuordnungsgenauigkeit (RMS, Wurzel der mittleren quadratischen Abweichung) ermittelt. Die Größenordnung der RMS-Werte ist in Millimetern angegeben (Tabellen 5 und 6). Es zeigt sich die Formabweichung nach drei und fünf Jahren im Vergleich zum Baseline-Modell.

Tab. 5: RMS (Root Mean Square) - Fehler, Mittelwert (MW) und Standardabweichung (SD) der Zuordnung der 3- und 5-Jahres-Vergleichsdaten zum Baseline-Modell des Studienkiefers zwischen Therapie Gruppe A (partieller Zahnersatz mit Molarenersatz) und B (Prämolarenokklusion durch Festsitzenden Zahnersatz). Bei divergierender Zahnstellung wurden Front- und Seitenzähne zeitlich getrennt in jeweils optimaler Positionierung digitalisiert.

Studienkiefer	Versorgungsgruppe	RMS Werte(mm)	Gruppe MW(mm)	Gruppe SD	Gesamte MW(mm)	Gesamte SD
3 Jahre zum Baseline	A_Gruppe_Prothesen	0.1153	0.085	0.035	0.103	0.050
		0.0809				
		0.1495				
		0.0966				
		0.0694				
		0.0677				
		0.0676				
		0.0350				
	B_Gruppe_Brücken	0.0340	0.118	0.057		
		0.1296				
		0.0629				
		0.1439				
		0.1786				
		0.0651				
		0.0908				
		0.1558				
0.2010						
5 Jahre zum Baseline	A_Gruppe_Prothesen	0.1444	0.124	0.056	0.149	0.058
		0.1546				
		0.1786				
		0.1032				
		0.1627				
		0.1664				
		0.0356				
		0.0476				
	B_Gruppe_Brücken	0.1943	0.172	0.053		
		0.0893				
		0.1511				
		0.1602				
		0.2149				
		0.1309				
		0.1298				
		0.2214				
0.2520						

Tab. 6: RMS (Root Mean Square) - Fehler, Mittelwert (MW) und Standardabweichung (SD) der Zuordnung der 3- und 5-Jahres-Vergleichsdaten zum Baseline-Modell des Gegenkiefers zwischen Therapie Gruppe A (partieller Zahnersatz mit Molarenersatz) und B (Prämolarenokklusion durch festsitzenden Zahnersatz).

Gegenkiefer	Versorgungsgruppe	RMS Werte(mm)	Gruppe MW(mm)	Gruppe SD	Gesamte MW(mm)	Gesamte SD
3 Jahre zum Baseline	A_Gruppe_Prothesen	0.0991	0.093	0.014	0.091	0.030
		0.1126				
		0.0902				
		0.0774				
		0.0843				
	B_Gruppe_Brücken	0.1331	0.089	0.043		
		0.0551				
		0.0623				
		0.0580				
		0.1390				
5 Jahre zum Baseline	A_Gruppe_Prothesen	0.1206	0.112	0.035	0.113	0.037
		0.1571				
		0.0670				
		0.1274				
		0.0861				
	B_Gruppe_Brücken	0.1128	0.114	0.042		
		0.0615				
		0.1100				
		0.1077				
		0.1799				

Hinsichtlich der digitalen Zuordnung der 3-Jahres-Daten der Studienkiefer-Modelle zum jeweiligen CAD-Baseline-Flächenmodell ergaben sich RMS-Werte von 0,034mm bis 0,201mm. Bei den 5-Jahres-Daten lagen die RMS-Werte zwischen 0,036mm und 0,252mm. Die Studienkiefer-Modelle zeigten für die Zuordnung 3-Jahres- zum Baseline-Modell im Mittel einen RMS-Wert von 0,103mm (SD 0,05) und bei der Zuordnung der 5-Jahres-Modelle zum Baseline-Modell einen Mittelwert von 0,149mm (SD 0,058).

Die Therapie-Gruppe A, Molarenersatz mit herausnehmbaren Prothesen, zeigte bei der Zuordnung von den 3-Jahres- zu den Baseline-Modellen einen Mittelwert von 0,085mm (SD 0,035) und bei der Zuordnung der 5-Jahres- zu den Baseline-Modellen einen Mittelwert von 0,124mm (SD 0,056). Die Therapie-Gruppe B, mit SDA Konzept, wies RMS-Werte bei der Zuordnung von den 3-Jahres-Modellen zu den Baseline-Modellen von 0,118mm (SD 0,057) im Mittelwert auf, und bei der Zuordnung von den 5-Jahresmodellen zum den Baseline-Modellen 0,172mm (SD 0,053).

Die entsprechenden Gegenkiefer-Modelle zeigten RMS-Werte für die Zuordnung der 3-Jahres-Modelle zu den Baseline-Modellen von im Mittel 0,091mm (SD 0,03) und von 0,113mm (SD 0,037) für die Zuordnung des 5-Jahres- zum Baseline-Modell.

In der Therapie-Gruppe A zeigten die RMS Werte in den 3-Jahres-Modell zu den Baseline-Modellen einen Mittelwert von 0,093mm (SD 0,014) und in den 5-Jahres-Modellen zu den Baseline-Modellen einen Mittelwert von 0,112mm (SD 0,035).

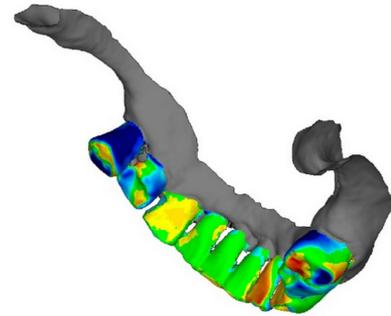
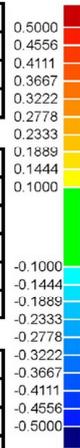
Bei Therapie-Gruppe B ergaben sich RMS-Werte in den 3-Jahres-Modellen zu den Baseline-Modellen von 0,089mm (SD 0,043) im Mittelwert und in den 5-Jahres-Modellen zu den Baseline-Modellen von 0,114mm (SD 0,042) im Mittelwert.

### 3.3 Graphische Darstellung der dreidimensionalen Modellanalyse der Studienkiefer

Referenzmodell	11_UK_1b_seiten_stl
Testmodell	11_UK_2seiten_mitsam0_1
# Datenpunkte	46180
# Ausreißer	4

Toleranztyp	3D-Abweichung
Toleranzen	mm
Max Tol +	0.5000
Min Tol +	0.1000
Min Tol -	-0.1000
Max Tol -	-0.5000

Abweichung	mm
Max Abw +	1.3859
Max Abw -	-2.1143
Durchschnitt +/-	0.1530 /-0.2387
Std-Abw	0.2672



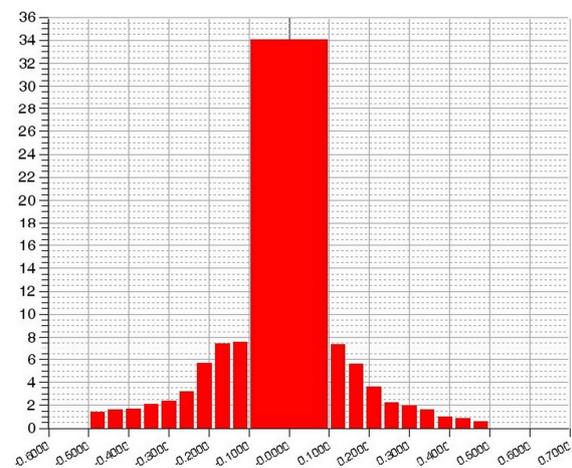
3D-Vergleich Ergebnisse

Abb. 13: Ergebnisse der Zuordnung und Analyse von Kontrollmodell zum Baselinemodell des Pilotfalles

>=Min	<Max	# Punkte	%
-0.5000	-0.4556	637	1.3794
-0.4556	-0.4111	743	1.6089
-0.4111	-0.3667	786	1.7020
-0.3667	-0.3222	957	2.0723
-0.3222	-0.2778	1082	2.3430
-0.2778	-0.2333	1461	3.1637
-0.2333	-0.1889	2627	5.6886
-0.1889	-0.1444	3436	7.4405
-0.1444	-0.1000	3485	7.5466
-0.1000	0.1000	15718	34.0364
0.1000	0.1444	3401	7.3647
0.1444	0.1889	2574	5.5738
0.1889	0.2333	1678	3.6336
0.2333	0.2778	1025	2.2196
0.2778	0.3222	909	1.9684
0.3222	0.3667	736	1.5938
0.3667	0.4111	473	1.0243
0.4111	0.4556	400	0.8662
0.4556	0.5000	280	0.6063

Auß. Max. Tol +	390	0.8445
Auß. Max. Tol -	3382	7.3235

Prozent Abweichungen



Abweichungs-Verteilung

Abb. 14: Prozentuale Abweichungen und Häufigkeitsverteilung nach der Zuordnung von Kontrollmodell zum Baselinemodell des Pilotfalles

Verteilung (+/-)	# Punkte	%
-6 * Std.Abw	24	0.0520
-5 * Std.Abw	30	0.0650
-4 * Std.Abw	259	0.5608
-3 * Std.Abw	1811	3.9216
-2 * Std.Abw	4103	8.8848
-1 * Std.Abw	14811	32.0723
1 * Std.Abw	19700	42.6592
2 * Std.Abw	4831	10.4612
3 * Std.Abw	522	1.1304
4 * Std.Abw	45	0.0974
5 * Std.Abw	13	0.0282
6 * Std.Abw	2	0.0043

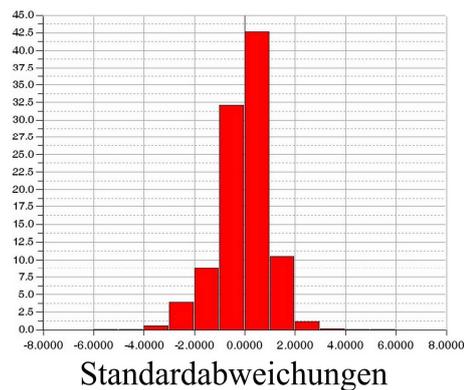


Abb. 15: Ergebnisse der Standardabweichung der Zuordnung von Kontrollmodell zum Baselinemodell des Pilotfalles

Beim Pilotfall 11 (Abb. 16) handelt es sich um einen Unterkiefer mit allen eigenen natürlichen Zähnen in verkürzter Zahnreihe. Hier zeigte sich eine deutliche Abrasion an den Zähnen 34 und 45 okklusal, die sich von 3 Jahren auf 5 Jahre weiter steigerte. Die Frontzähne hingegen unterlagen fast keinem Substanzverlust. Die Frontzähne wiesen aber Zahnstellungsänderungen am Zahn 31 um etwa 0,4mm und an den Zähnen 32 und 33 um ca. bis zu 0,8mm weiter nach lingual auf. Diese Bereiche sind vestibulär in den Farbtönen blau und lingual orange-rot dargestellt.

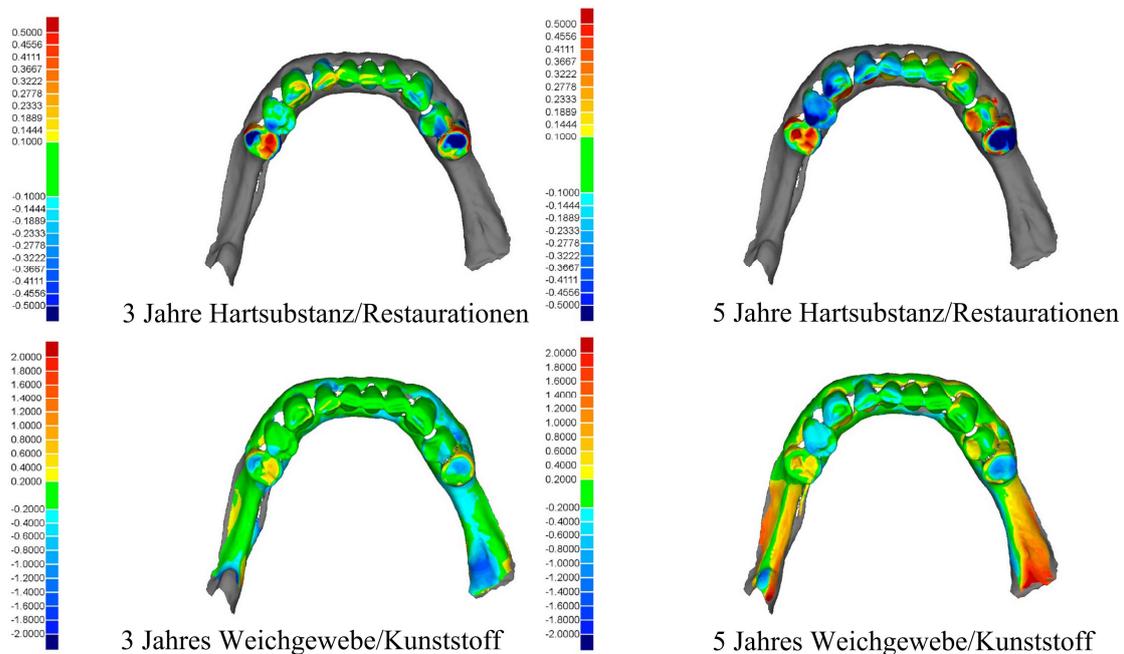


Abb. 16: Studienkiefer Fall 11, Pilotfall, Therapiekonzept B mit natürlichen Zähnen in der farbkodierten Differenzdarstellung

Drei Fälle (Patient 1, 5 und 11) zeigten im Rahmen der computergestützten dreidimensionalen Analyse eine Zahnstellungsänderung. Neun Fälle (Patient 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 10 und 11) zeigten Abrasionen jeweils im Vergleich zur Baseline. Das von der Analyse-Software (Geomagic Quality 9) erzeugte Spektrum der Farbskala wurde zur besseren Differenzierung für die Zahnhartsubstanz/Restaurations-Analyse auf  $\pm 0,5\text{mm}$  und für die Weichgewebes/Kunststoffsattel-Analyse auf  $\pm 2\text{mm}$  eingestellt. Der Toleranzbereich bei der Zahnhartsubstanz/Restaurations-Analyse lag zwischen  $\pm 0,1\text{mm}$  und bei der Weichgewebes/Kunststoff-Analyse zwischen  $\pm 0,2\text{mm}$ . Innerhalb dieser Spannen wurde nicht mehr differenziert (grüner Bereich).

### **3.3.1 3D-Analyse der Studienkiefer der Therapie-Gruppe A**

Im Folgenden werden zunächst die 3D-Analysen in der Therapie-Gruppe A mit herausnehmbaren Prothesen zum Molarenersatz und die Abweichungen der Studienkiefer in den Patientenfällen 1, 3, 7, 8 und 10 graphisch dargestellt.

Bei Fall 1 (Abb. 17) wurde der Oberkiefer mit einer partiellen Prothese versorgt. An der Hartsubstanz beziehungsweise den Restaurationen wurden nach drei und fünf Jahren keine großen Veränderungen festgestellt. Im 5-Jahres-Modell sind die Abweichungen jedoch etwa 0,1mm bis 0,15mm größer als im 3-Jahres-Modell.

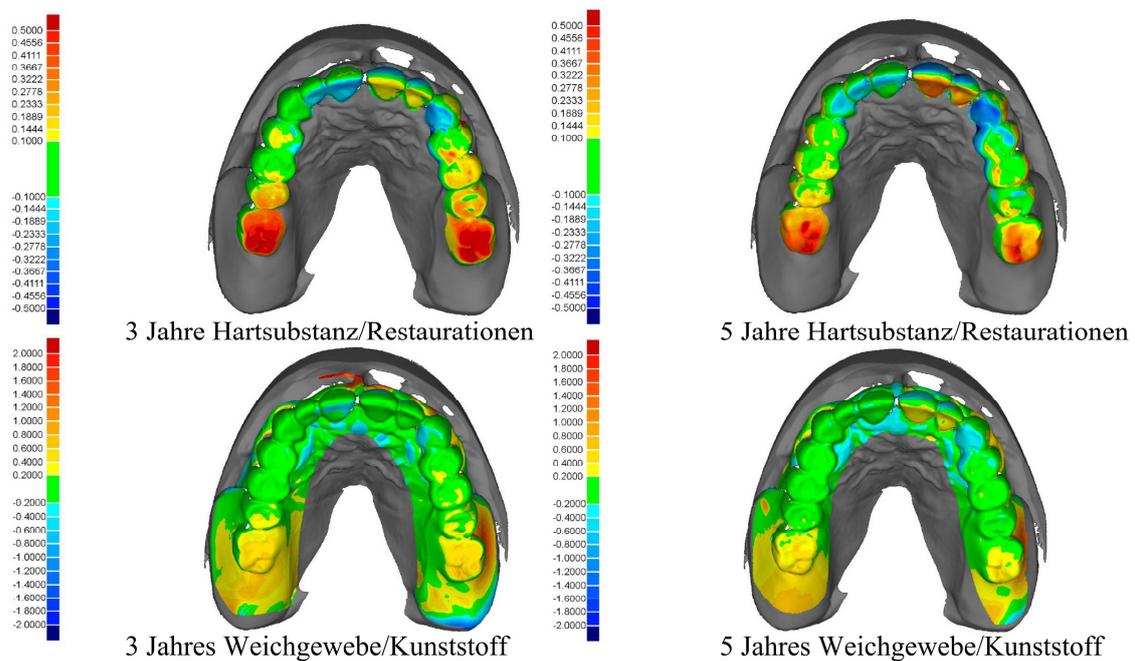


Abb. 17: Studienkiefer Fall 1 mit Therapiekonzept A (partieller Zahnersatz mit Molarenersatz)

Eine Zahnstellungsänderung an den Zähnen 21 und 22 weiter nach palatinal wurde in den Vergleichsmodellen gegenüber dem Baseline-Flächenmodell festgestellt. Diese Region ist in der Abbildung (Abb. 17) vestibulär blau und palatinal orange-rot dargestellt.

Beim Fall 3 (Abb.18) wurde der Oberkiefer mit einer partiellen Prothese versorgt. Die Baseline-Abformung wurde abweichend vom Protokoll ohne die Prothese genommen. So wurden im Baseline-Modell auch kein Prothesenklammern an Zähnen 14 und 24 palatinal dargestellt. Bei den 3- und 5-Jahres-Modellen wurden die Abformungen mit Prothese genommen, daher erscheint mit dem Vergleich zum Baseline-Modell an dieser Stelle eine größere Schichtstärke gezeigt als rote Farbtöne.

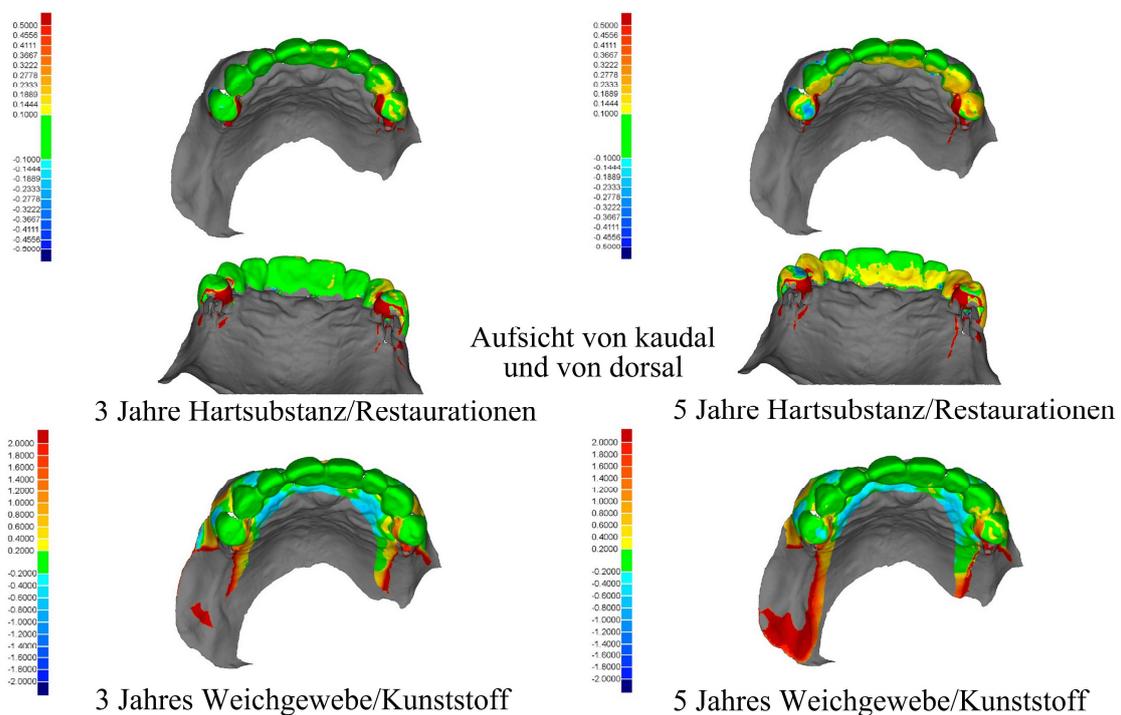


Abb. 18: Studienkiefer Fall 3 mit Therapiekonzept A (partieller Zahnersatz mit Molarenersatz)

Eine okklusale Abrasion mit einem Substanzverlust von bis zu 0,45mm am Zahn 14 nach fünf Jahren ist zu erkennen (hellblau bis mittelblau). Da der Vergleich zwischen (1) 5-Jahres-Modell mit Prothese abgeformt und (2) Baseline-Modell ohne Prothese berechnet wurde, war im Bereich der Prothesensättel eine Differenz von etwa 2mm (dunkelrot) festzustellen, entsprechend der Materialstärke der Verankerungskammern des Zahnersatzes.

Beim Fall 7 (Abb.19) wurde der Unterkiefer mit einer partiellen Prothese versorgt. Es deutet sich ein Substanzverlust nach drei Jahren an. Ein okklusaler Verschleiß der Prothesenzähne zum Ersatz der Zähne 35, 36, 45 und 46 war zu erkennen. Auch an den Frontzähnen 32-41 zeigte sich eine inzisale Abrasion von etwa 0,15mm bis 0,4mm. Die Prothesensättel und die Kronen-Restaurationen an den Zähnen 33, 34, 43 und 44 zeigten fast keine Veränderung gegenüber dem CAD-Baseline-Flächenmodell.

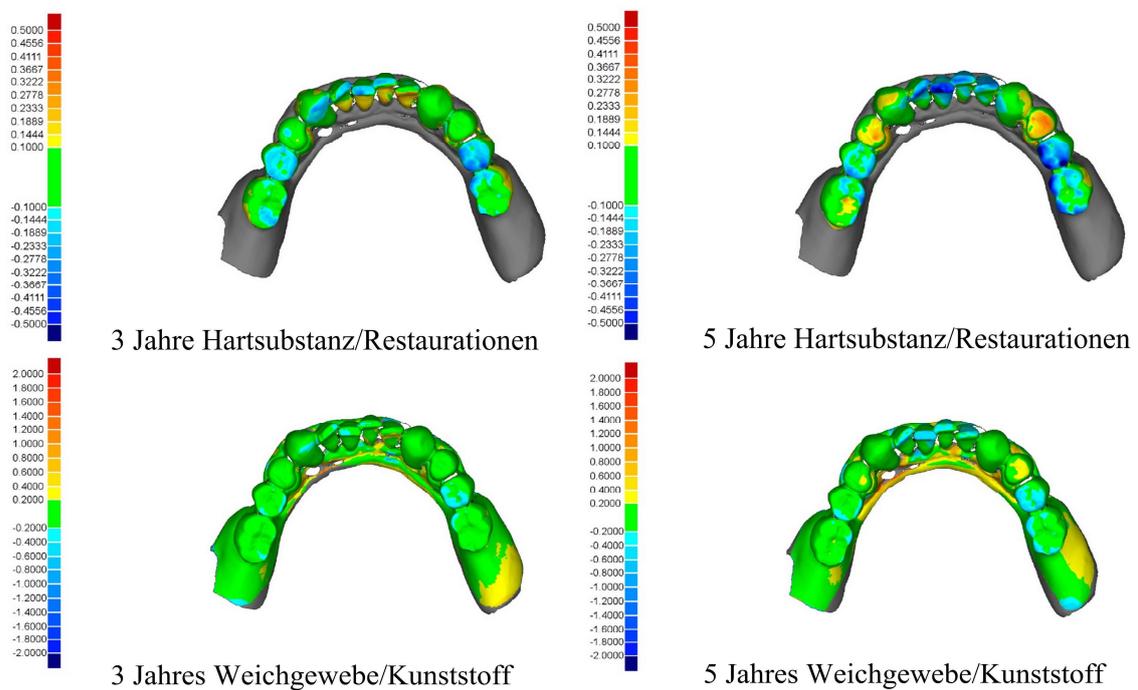


Abb. 19: Studienkiefer Fall 7 mit Therapiekonzept A (partieller Zahnersatz mit Molarenersatz)

Beim Fall 8 (Abb. 20) wurde der Unterkiefer mit einer partiellen Prothese versorgt. An den Frontzähnen 32 bis 42 wurden die Abrasionen immer deutlicher: von nach drei Jahren etwa 0,2mm bis zu nach fünf Jahren etwa 0,45-0,6 mm. Auch die Prothesenzähne hatten sich vom 3-Jahres-Modell mit ca. 0,15mm zum 5-Jahres-Modell mit ca. 0,2-0,45mm stärker abgenutzt. Bei der roten, punktuellen Erscheinung am Zahn 44 mesio-okklusal (siehe Pfeil in Abb. 20) kann es sich um ein Gipsbläschen im Baseline-Modell handeln.

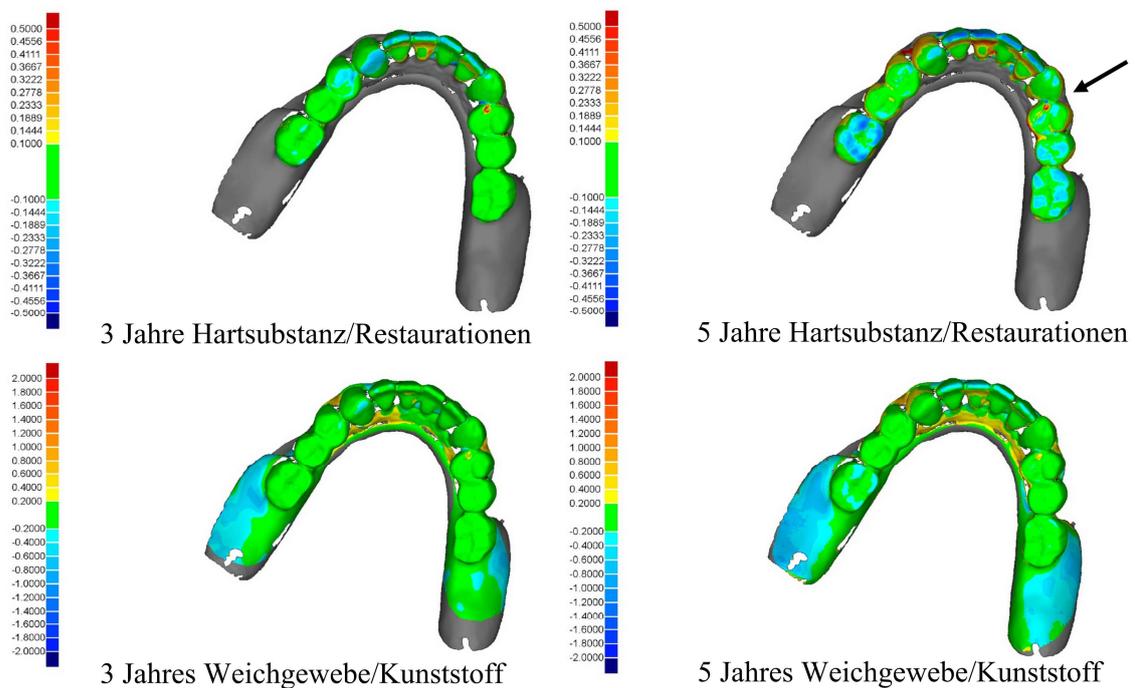


Abb. 20: Studienkiefer Fall 8 mit Therapiekonzept A (partieller Zahnersatz mit Molarenersatz). Bei der roten, punktuellen Erscheinung am Zahn 44 mesiookklusal (siehe Pfeil in Abb. 20) kann es sich um ein Gipsbläschen im Baseline-Modell handeln.

Beim Fall 10 (Abb. 21) wurde der Unterkiefer mit einer partiellen Prothese versorgt. Es fand sich nach drei Jahren ein okklusaler Verschleiß von etwa 0,15-0,3mm an den Prothesenzähnen 36 und 46, der sich beim Vergleich mit dem 5-Jahres-Modell auf bis zu 0,45mm steigerte. Ansonsten wurden keine größeren Veränderungen beobachtet.

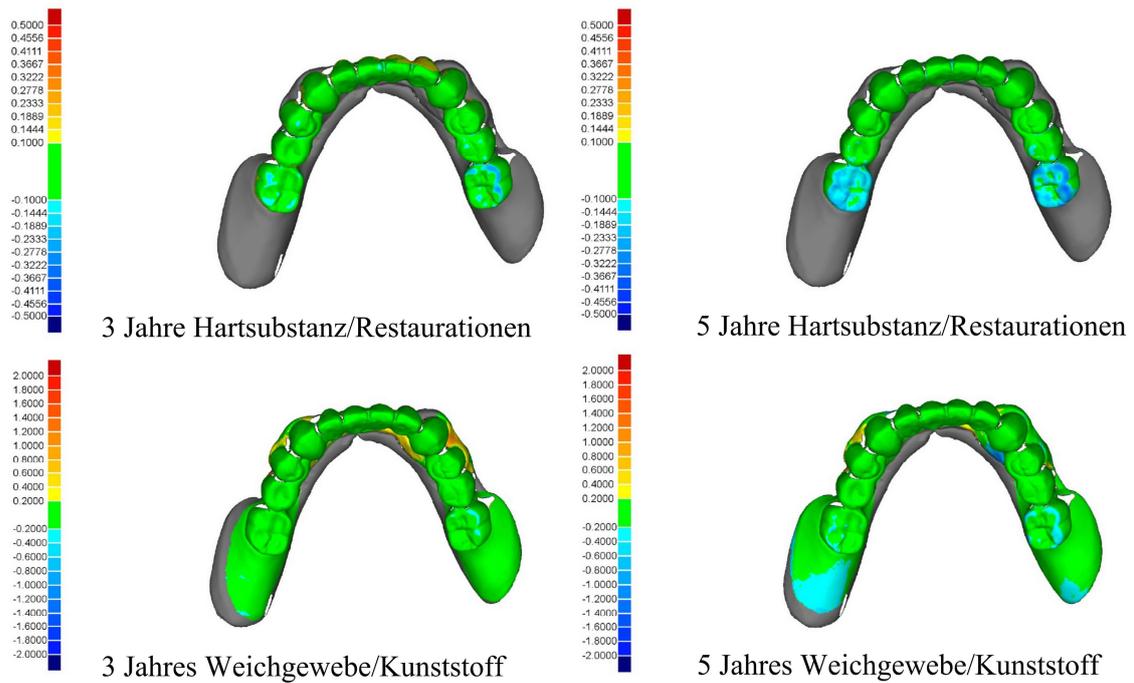


Abb. 21: Studienkiefer Fall 10 mit Therapiekonzept A (partieller Zahnersatz mit Molarenersatz)

### 3.3.2 3D-Analyse der Studienkiefer der Therapie-Gruppe B

Die Abweichungen der Studienkiefer von den Patienten Fällen 2, 4, 5, 6, 9 und 11 aus der Therapie-Gruppe B (Prämolarenokklusion durch festsitzenden Zahnersatz), versorgt nach dem SDA Konzept, wurden analog der Vorgehensweise für Gruppe A graphisch dargestellt und analysiert.

Im 2. Fall (Abb. 22) wurde der Unterkiefer mit festsitzendem Zahnersatz versorgt. Die 3- und 5-Jahres-Punktewolken-Datensätze zeigen zum Baseline-Flächenmodell eine sehr gute Übereinstimmung. Das 5-Jahres-Modell wies größere Abweichungen als das 3-Jahres-Modell auf, wie sich im Weichgewebsvergleich mit Werten zwischen 0,7 bis 1,3mm zeigt. Ein Substanzverlust, im Sinne einer Abrasion am Zahn 31 inzisal von etwa 0,25mm, war nach fünf Jahren zu erkennen.

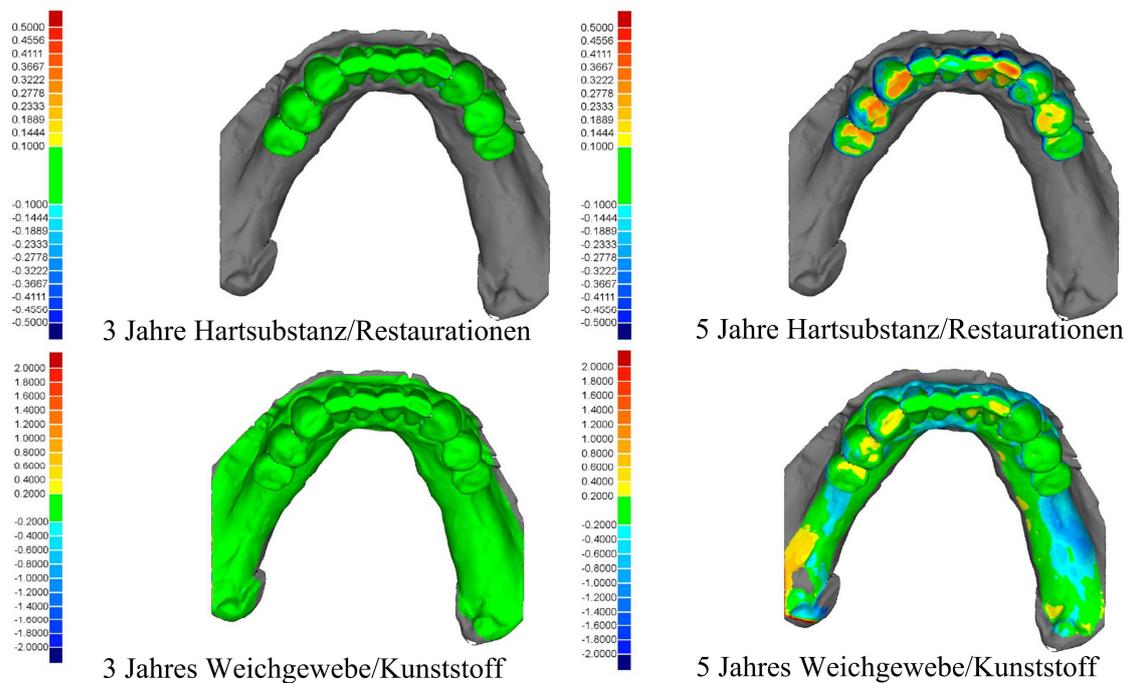


Abb. 22: Studienkiefer Fall 2 mit Therapiekonzept B (Prämolarenokklusion durch festsitzenden Zahnersatz)

Beim Studien-Fall 4 (Abb.23) wurde der Oberkiefer mit feststehendem Zahnersatz versorgt. Nach drei Jahren hat sich eine Abrasion an den Zähnen 14, 22, 23, 24 und 25 mit einem Substanzverlust von 0,15-0,35mm gezeigt. Dieser Substanzverlust war an denselben Stellen nach fünf Jahren noch deutlicher (bis zu 0,45mm) zu erkennen.

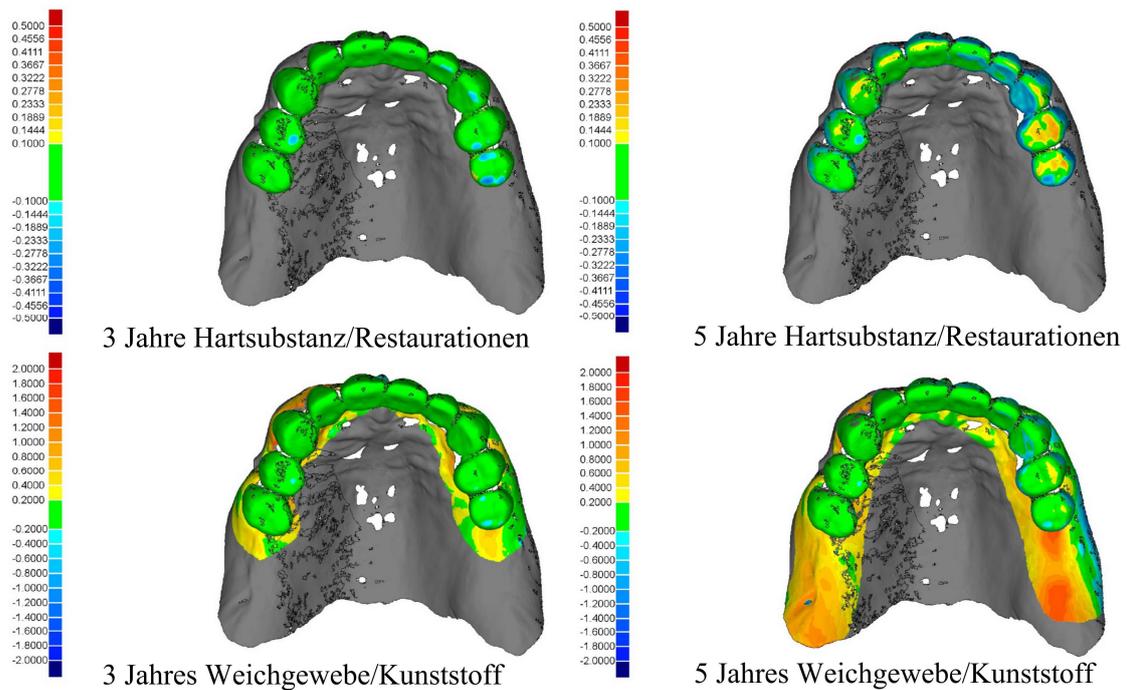


Abb. 23: Studienkiefer Fall 4 mit Therapiekonzept B (Prämolarenokklusion durch feststehenden Zahnersatz)

Im Fall 5 (Abb.24), bei dem der Unterkiefer mit feststehendem Zahnersatz versorgt wurde, konnte eine Veränderung der Zahnstellung an 32 und 41 beobachtet werden. Zahn 31 hatte sich nach lingual und Zahn 41 nach vestibulär verschoben. Die Differenz zwischen dem 3-Jahres-Modell und dem Baseline-Modell war teilweise deutlicher. Im 5-Jahres-Modell hatte der Zahn 41 sich noch weiter nach vestibulär etwa über 0,5mm verschoben. Der Zahn 31 war noch zusätzlich nach vestibulär gewandert, außerdem wurde eine distale Rotation bis zu 0,5mm an Zahn 33 beobachtet. Hingegen ist der Zahn 32 relativ stabil geblieben.

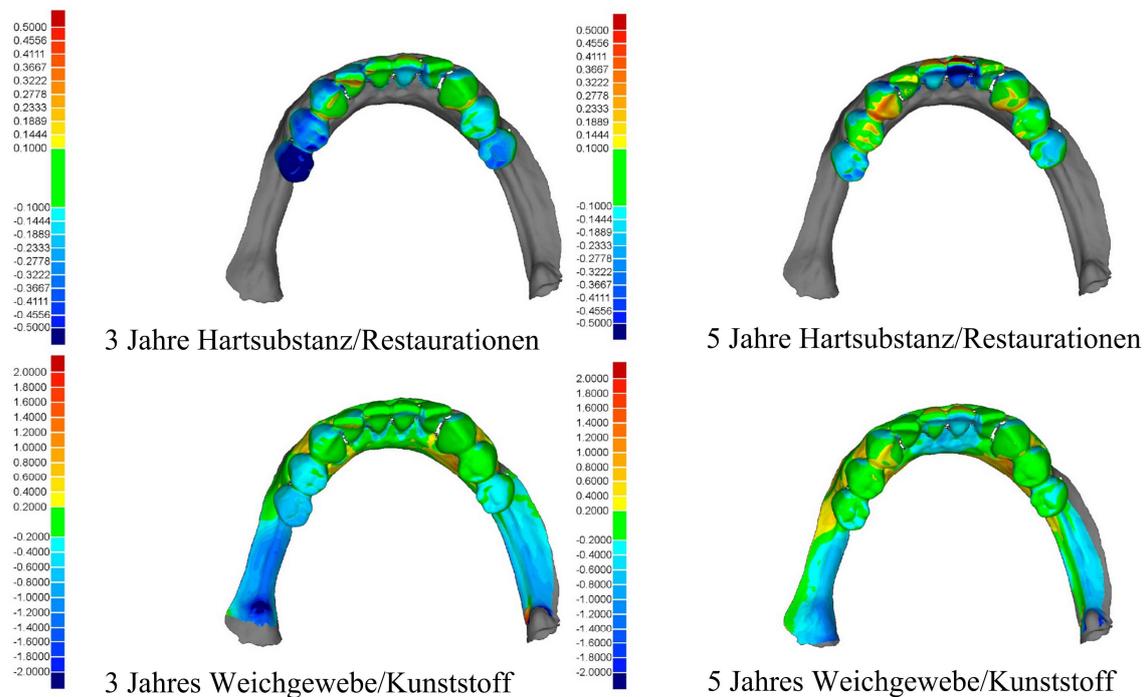


Abb. 24: Studienkiefer Fall 5 mit Therapiekonzept B (Prämolarenokklusion durch feststehenden Zahnersatz)

Im Fall 6 (Abb. 25) wurde der Unterkiefer mit feststehendem Zahnersatz versorgt. Er wies geringe Veränderung nach drei Jahren auf. Im Gegensatz zum 5-Jahres-Modell war eine Abrasion an fast allen Zähnen von Zahn 35 bis Zahn 45 zu erkennen. Ein deutlicher Substanzverlust wurde an den Zähnen 31, 41 inzisal und den Zähnen 44, 45 bukkal-okklusal, besonders an den Höckerabhängigen, beobachtet. Die Differenz gemäß den Farbtönen lag bei bis zu 0,6mm zwischen den beiden Datensätzen der Modelle.

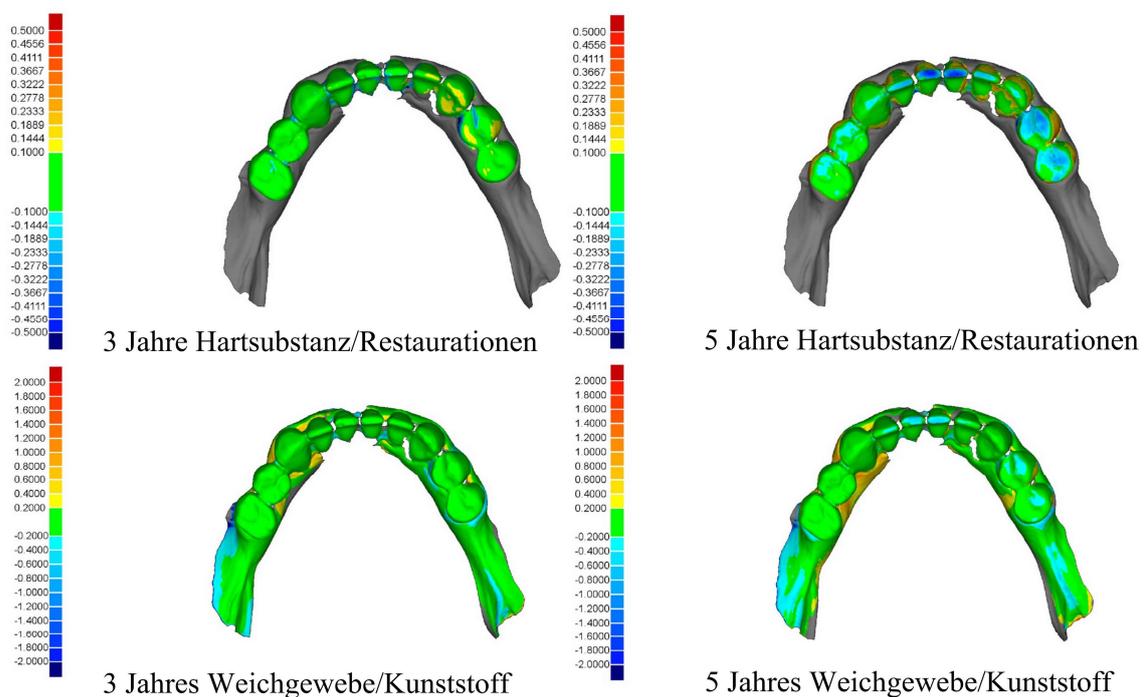


Abb. 25: Studienkiefer Fall 6 mit Therapiekonzept B (Prämolarenokklusion durch feststehenden Zahnersatz)

Im Fall 9 (Abb.26) wurde der Unterkiefer mit feststehendem Zahnersatz versorgt. Es zeigte sich ein Substanzverlust in Form von Abrasion an den Frontzähnen 32 bis 42 sowie okklusal an 44 und 45 von etwa 0,3mm, der im Verlauf von drei auf fünf Jahre weiter anstieg. Im 5-Jahres-Modell sind sogar alle Zähne von Substanzverlust betroffen, die 4er und 5er wiesen einen Verlust von etwa 0,4mm auf. Die Frontzähne waren stärker, bis zu ca. 0,6mm, betroffen. Die auffälligen Farbtöne in Form einer orange-roten Girlande lingual der Frontzähne im 5-Jahres-Modell können auf schnell neu gebildeten Zahnstein des Patienten zurückgeführt werden.

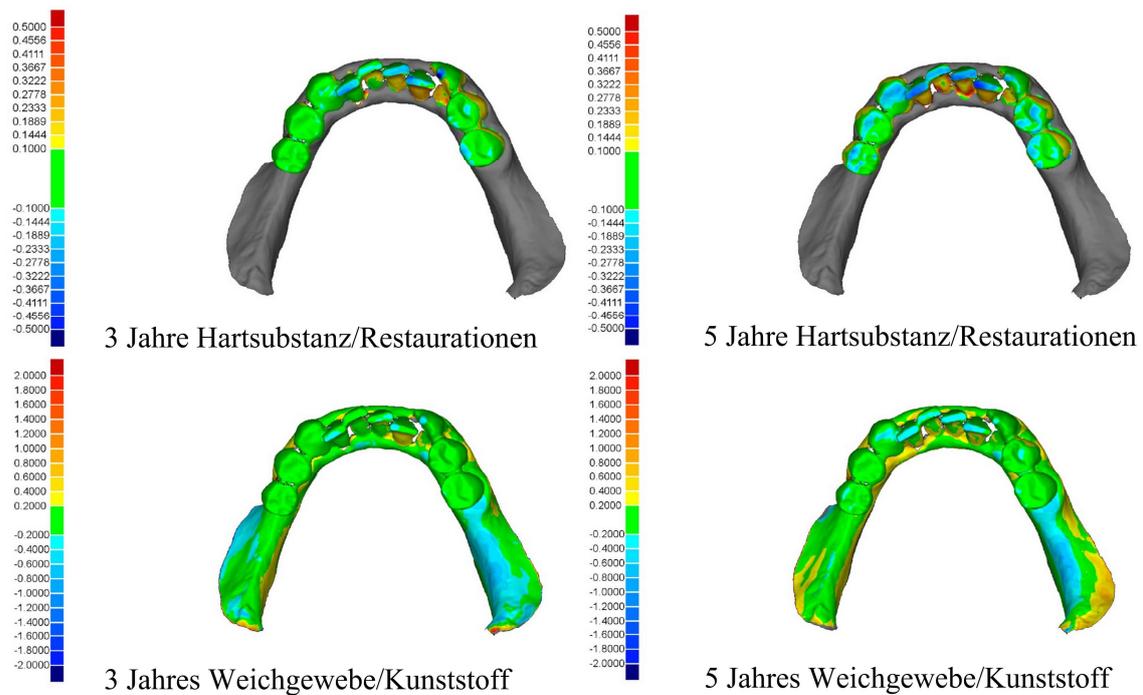


Abb. 26: Studienkiefer Fall 9 mit Therapiekonzept B (Prämolarenokklusion durch feststehenden Zahnersatz)

Mit derselben Analyse-Methode wurden auch die Gegenkiefer analysiert und die Veränderungen über die Zeit dreidimensional erfasst.

### **3.4 Analyse der Gegenkiefer und Vergleich mit den Studienkiefern**

Die Abweichungen der Gegenkiefer der Therapie-Gruppe A von Patienten der Fälle 1, 3, 7, 8 und 10, welche mit herausnehmbaren Prothesen mit Molarenersatz versorgt wurden, sind im Folgenden parallel zum entsprechenden Studienkiefer graphisch dargestellt und analysiert.

### 3.4.1 3D-Analyse der Gegenkiefer der Therapie-Gruppe A

Beim Gegenkiefer des Falles 1 (Abb. 27), bei dem der Unterkiefer mit einer partiellen Prothese versorgt wurde, hatte die okklusale Abrasion an 33, 35, 44, 45 und 46 nach 3 Jahren etwa 0,3mm und im 5-Jahres-Modell bis zu 0,45mm erreicht. Im Vergleich der beiden Kiefer nach fünf Jahren zeigt sich mehr Substanzverlust im Gegenkiefer an den Prothesenseitenzähnen. Dagegen sind die Frontzähne fast unverändert geblieben.

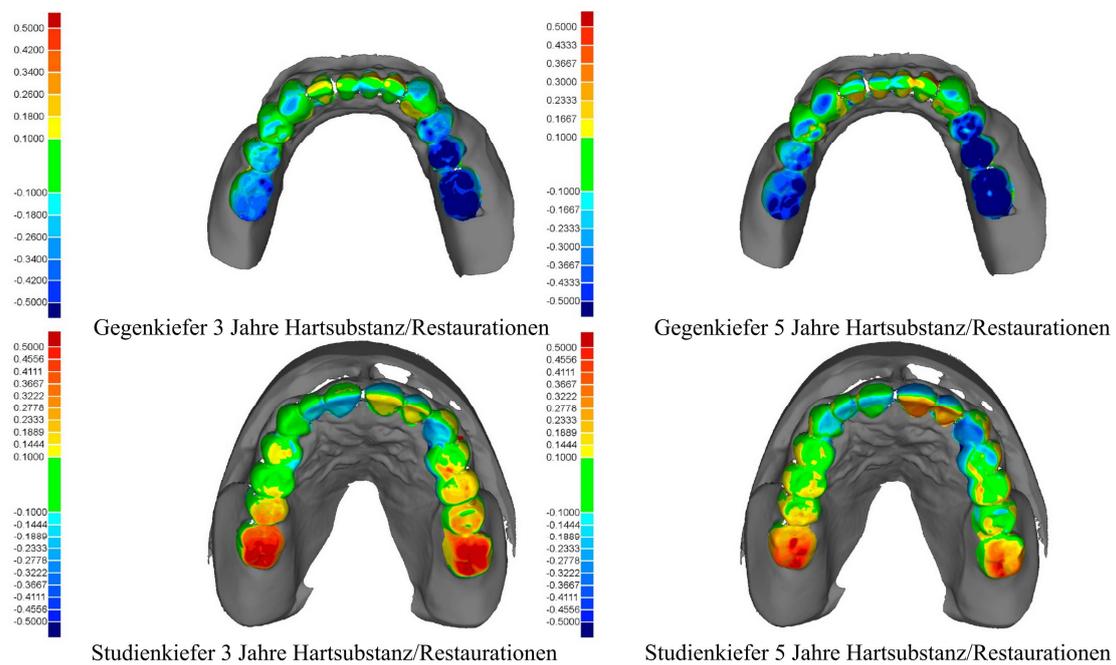


Abb. 27: Gegenkiefer Fall 1 mit entsprechendem Studienkiefer mit Therapiekonzept A (partieller Zahnersatz mit Molarenersatz)

Beim Gegenkiefer des Falles 3 (Abb. 28) wurde der Unterkiefer mit feststehendem Zahnersatz versorgt und im dritten Jahr eine neue Brücke an 35-37 eingegliedert. Daher wurde bei der Analyse dieser Region des Kiefers für den 3D-Vergleich ausgeschlossen. Es zeigten sich Abrasionen an den bukkalen Höckerabhängen der Zähne 34, 35 und an der Brücke 44-46. Eine deutliche Steigerung der Abrasion vom dritten Jahr, ca. 0,3mm, zum fünften Jahr, etwa 0,5mm war zu erkennen. Die Zähne 31 und 46 haben sich kontinuierlich bewegt und zwar Zahn 31 immer weiter nach vestibulär, von 0,3mm im 3-Jahres-Modell auf 0,5mm im 5-Jahres-Modell (vestibulär orange-rot und lingual hell- bis dunkelblau dargestellt). Der Zahn 46 ist trotz seiner Einbindung als Pfeilerzahn in eine Brücke von 44-46 weiter nach bukkal gewandert (bukkal orange-rot und lingual dunkelblau dargestellt).

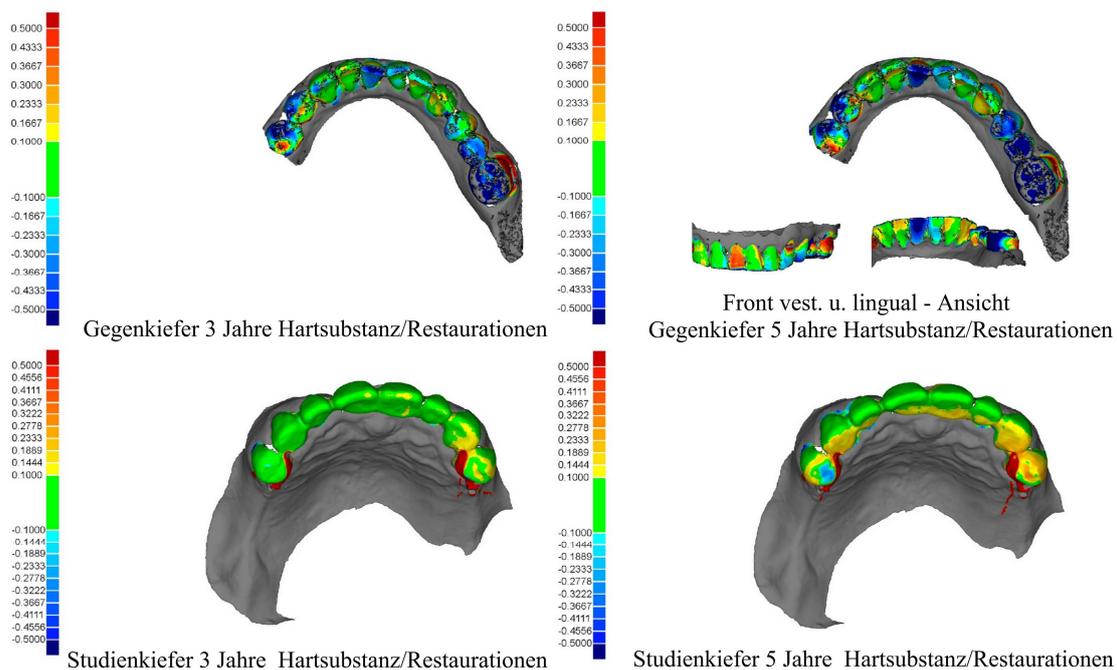


Abb. 28: Gegenkiefer Fall 3 mit entsprechendem Studienkiefer mit Therapiekonzept A (partieller Zahnersatz mit Molarenersatz)

Beim Gegenkiefer des Falles 7 (Abb. 29) wurde der Oberkiefer mit einer partiellen Prothese versorgt. Im Seitenzahnbereich zeigte sich besonders an Zahn 16, dem Pontic Zahn 24 und den Prothesenzähnen 25 und 26 massive Veränderungen in Form von positiven Abweichungswerten. Der endständige Ankerzahn 16 ist elongiert; im 3-Jahres-Modell um 0,4mm und nach fünf Jahren bis zu ca. 0,55mm. Die Frontzähne blieben nahezu unverändert. Der Vergleich von Studien- und Gegenkiefer zeigt eine weitere Abnutzung der Frontzähne des Unterkiefers.

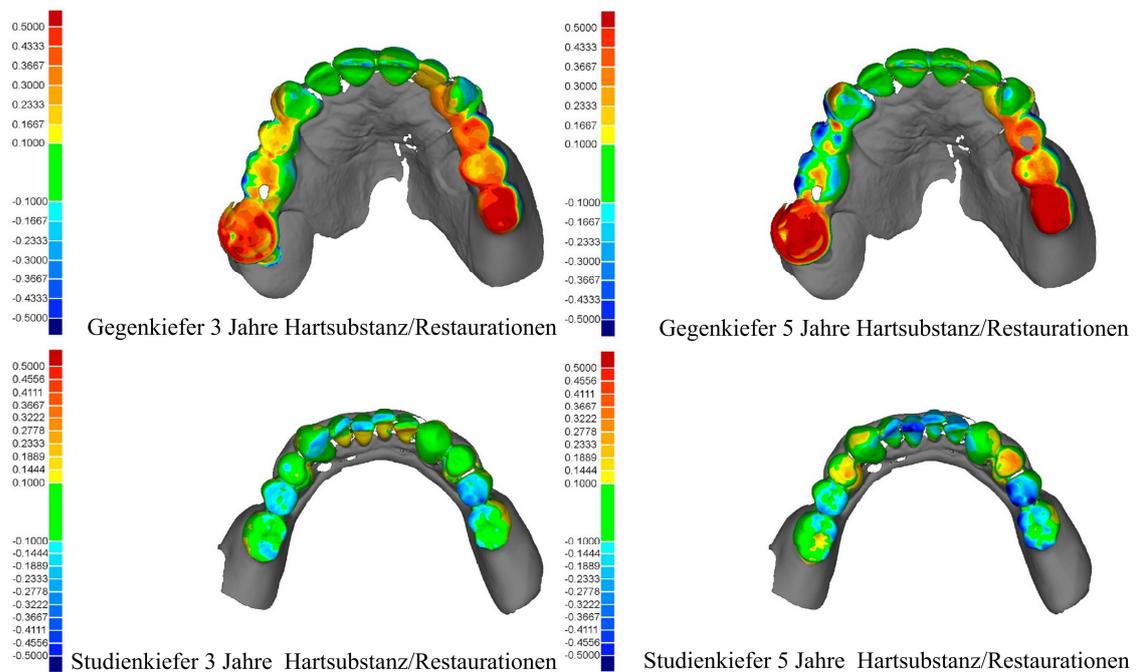


Abb. 29: Gegenkiefer Fall 7 mit entsprechendem Studienkiefer mit Therapiekonzept A (partieller Zahnersatz mit Molarenersatz)

Beim Gegenkiefer des Falles 8 (Abb. 30) wurde der Oberkiefer mit Brücken regio 14-16 und regio 24-27 versorgt. Es zeigte sich im 3-Jahres-Modell eine Veränderung der Analysewerte in dem negativen Bereich okklusal an der Brücke regio 14-16 und eine Veränderung der Werte in dem positiven Bereich okklusal an der Brücke regio 24-27. Nach fünf Jahren gab es an der Brücke im ersten Quadranten nur noch geringe Abweichungen, während sich an der Brücke im zweiten Quadranten die Abweichungen vergrößerten. Die Frontzähne im Gegenkiefer zeigten Abrasionen an den Zähnen 11, 21, 22 inzisal und an 23 an der distalen Schneidekante. Von der Situation nach drei Jahren zur Situation im 5-Jahres-Modell war eine Steigerung um etwa 0,2mm zu erkennen.

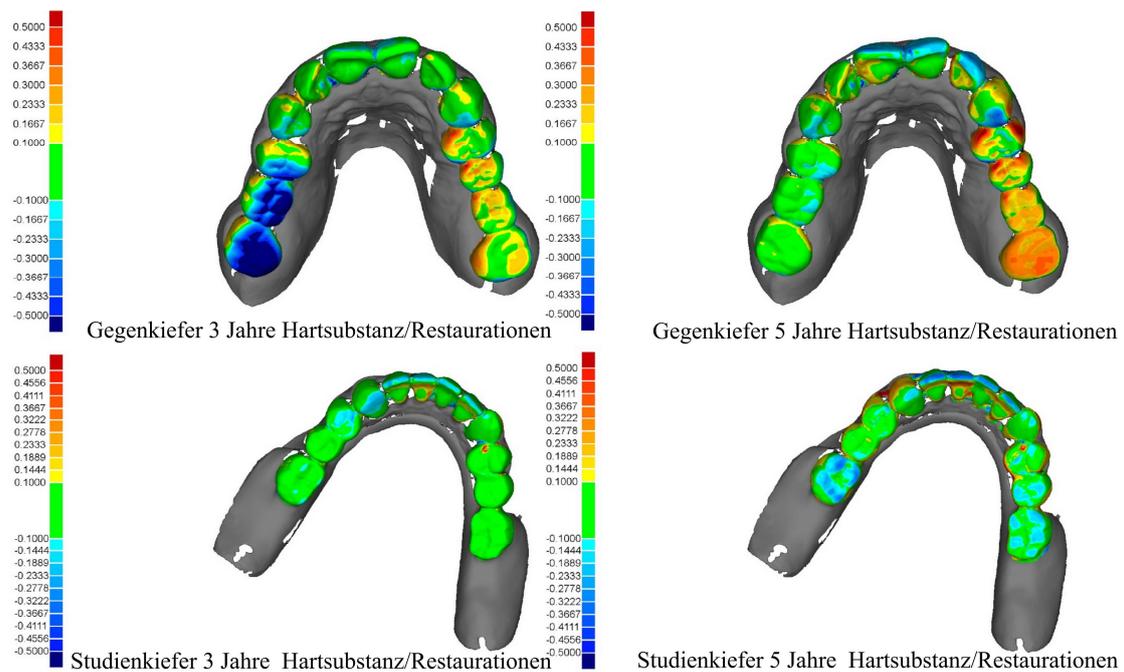


Abb. 30: Gegenkiefer Fall 8 mit entsprechendem Studienkiefer mit Therapiekonzept A (partieller Zahnersatz mit Molarenersatz)

Beim Gegenkiefer des Falles 10 (Abb. 31), bei dem der Oberkiefer mit einer Totalprothese versorgt wurde, zeigten sich an den Kunststoffzähnen 13, 14, 24, 25 und 26 deutliche Abrasionen im 3-Jahres-Modell von ca. 0,4mm und beim 5-Jahres-Modell bis zu 0,55mm. Die betroffenen Flächen scheinen sich vergrößert zu haben. Im Vergleich von Studien- und Gegenkiefer fand man im Studienkiefer fast keine Veränderungen, nur die Abrasionen an den durch Kunststoffzähne ersetztten Molaren. Die im Gegenkiefer befindlichen Kunststoffzähne wiesen gegenüber der antagonistischen Brücke einen schnelleren Substanzverlust besonders im prämolaren Bereich auf.

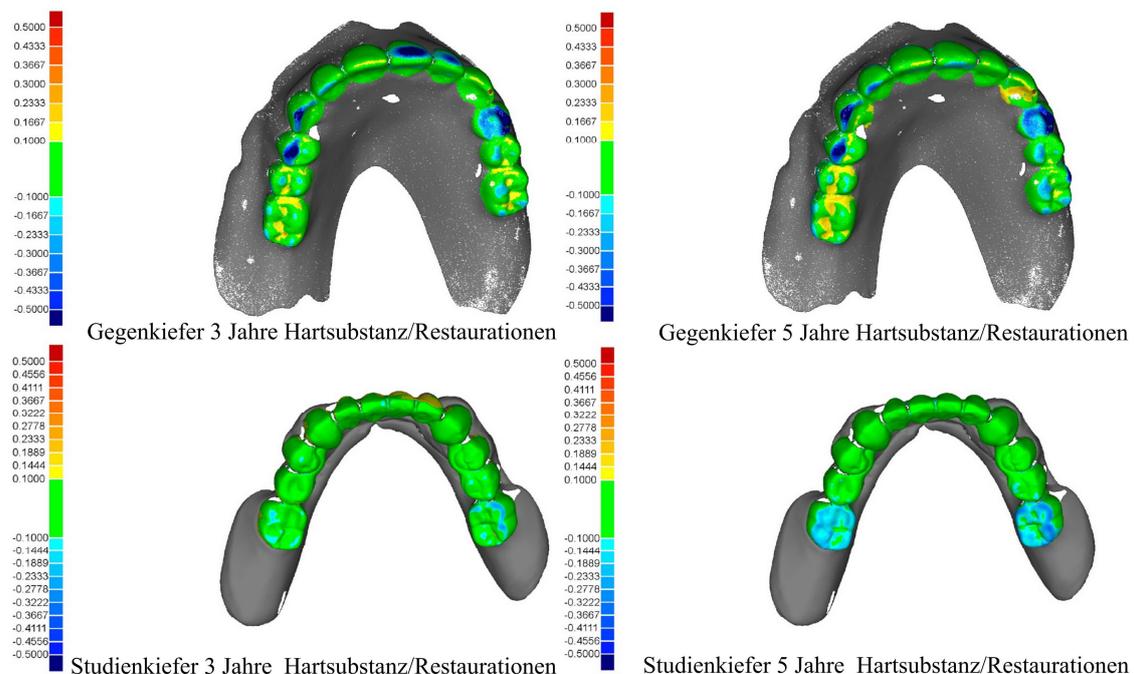


Abb. 31: Gegenkiefer Fall 10 mit entsprechendem Studienkiefer mit Therapiekonzept A (partieller Zahnersatz mit Molarenersatz)

### 3.4.2 3D-Analyse der Gegenkiefer der Therapie-Gruppe B

Die Abweichungen der Therapie-Gruppe B der Gegenkiefer von Patienten in den Fällen 2, 5, 6, 9 und 11, versorgt nach dem SDA-Konzept, wurden parallel zum entsprechenden Studienkiefer und analog dem Vorgehen bei Gruppe A graphisch dargestellt und analysiert. Beim Gegenkiefer im Fall 2 (Abb. 32), bei dem der Oberkiefer mit einer partiellen Prothese versorgt wurde, hat sich ein größerer Substanzverlust an den Seitenzähnen inklusive der beiden Eckzähne nach drei und fünf Jahren gezeigt (von ca. 0,4mm bis zu 0,55mm). Die Frontzähne sind relativ stabil geblieben. Im Vergleich der beiden Kiefer findet man bei den ersten Stützzonen, den 4ern und 5ern, sehr starke Abrasionen.

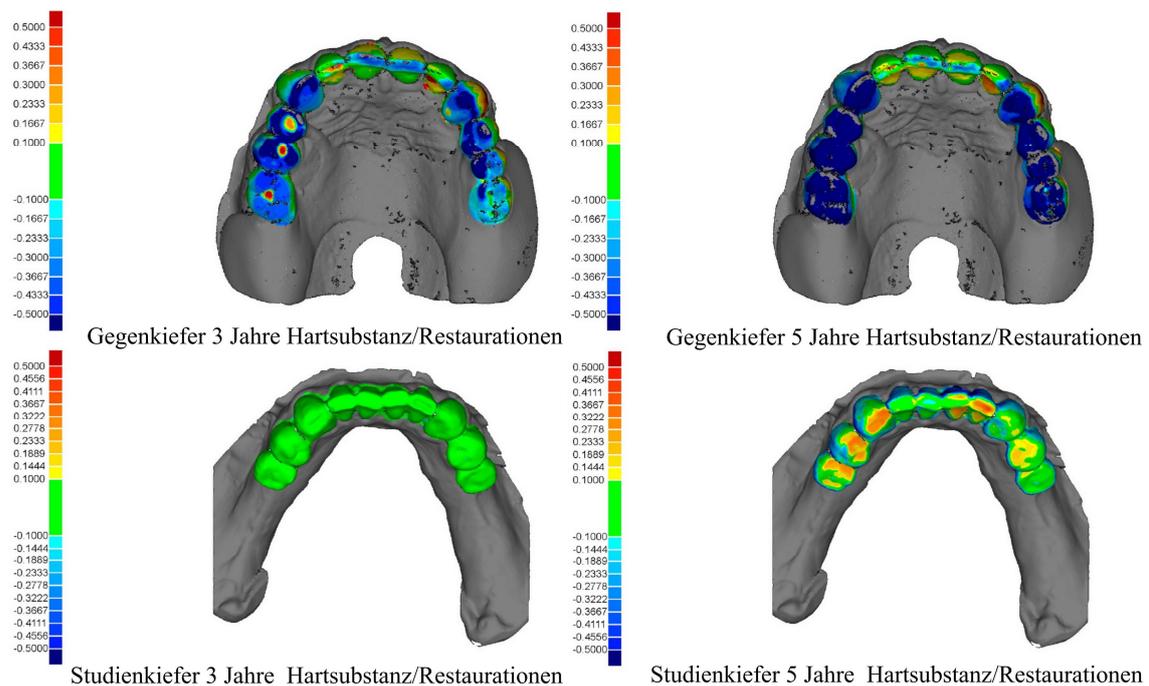


Abb. 32: Gegenkiefer Fall 2 mit entsprechendem Studienkiefer mit Therapiekonzept B (Prämolarenokklusion durch festsitzenden Zahnersatz)

Beim Gegenkiefer des Falles 4 war wegen der Neuversorgungen des Unterkiefers nach dem Baseline-Modell, vor der 3-Jahres-Kontrolle, keine Zuordnung möglich und somit kein analysierender Vergleich zum Baseline-Modell durchführbar.

Beim Gegenkiefer des Falles 5 (Abb. 33), der im Oberkiefer mit einer Totalprothese versorgt wurde, hatte sich die Abrasionen an den Zähnen 15, 14, 13, 12, 11, 21, 22, 24 und 25 vom 3-Jahres- zum 5-Jahres-Modell verstärkt (ca. 0,15mm bis 0,4mm). Besonders deutlich wird dies am Eckzahn 13 inzisal. Der Substanzverlust an den beiden ersten Prämolaren ist auch deutlich gestiegen.

Im Vergleich von Studien- und Gegenkiefer sind die Abrasionen an allen zweiten Prämolaren gut zu beobachten. Die Frontzähne aus Kunststoff des Gegenkiefers wurden an der inzisalen Kante mehr abgenutzt als die natürlichen Zähne im Studienkiefer.

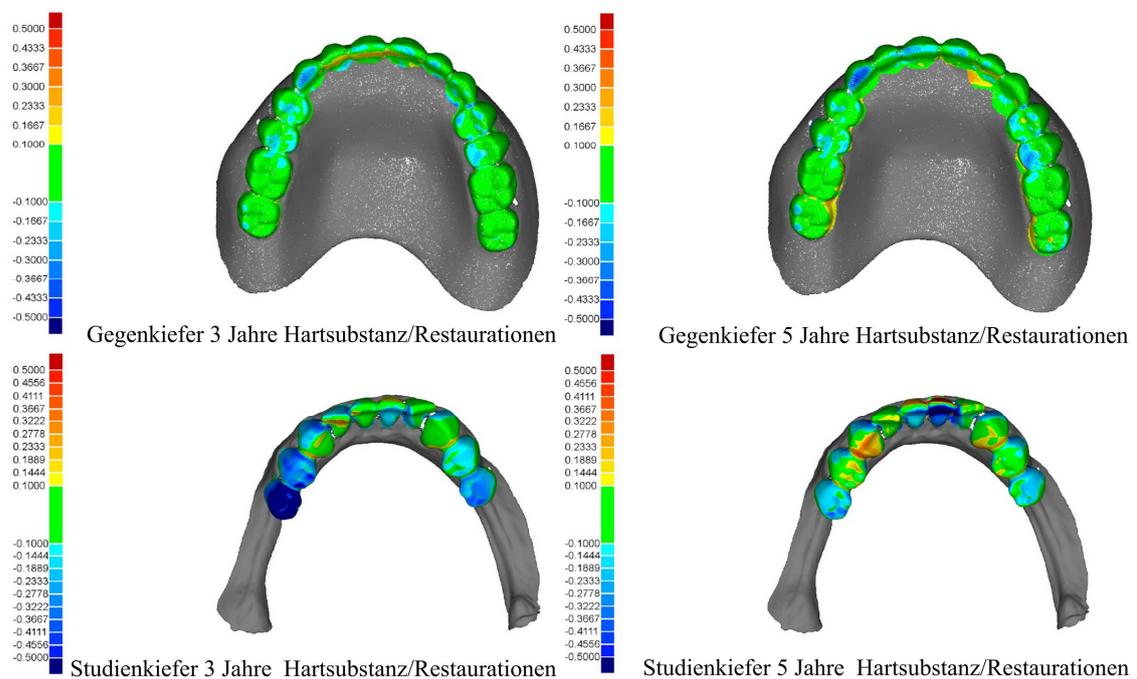


Abb. 33: Gegenkiefer Fall 5 mit entsprechendem Studienkiefer mit Therapiekonzept B (Prämolarenokklusion durch festsitzenden Zahnersatz)

Beim Gegenkiefer des Falles 6 (Abb. 34) wies der Oberkiefer eine unversorgte Einzelzahn-Schaltlücke am fehlenden Zahn 14 auf. Der zweite Quadrant war mit einer Brücke regio 24-25 versorgt. Es zeigten sich große Veränderungen der Zahnstellung im Bereich der Seitenzähne. Die Zähne 15 und 16 haben sich im 3-Jahres-Modell nach bukkal um 0,45mm und im 5-Jahres-Modell über 0,55mm bewegt (palatinal dunkelblau und bukkal rot), während der Eckzahn 13 weiter distal in die Lücke gekippt ist. Der Substanzverlust an den Zähnen 13, 12 inzisal und an der palatinalen Führungsfläche von Zahn 23 sowie okklusal an den Kronen 24 und 25 hat sich vom 3-Jahres- zum 5-Jahres-Modell von etwa 0,3mm auf bis zu 0,5mm verstärkt.

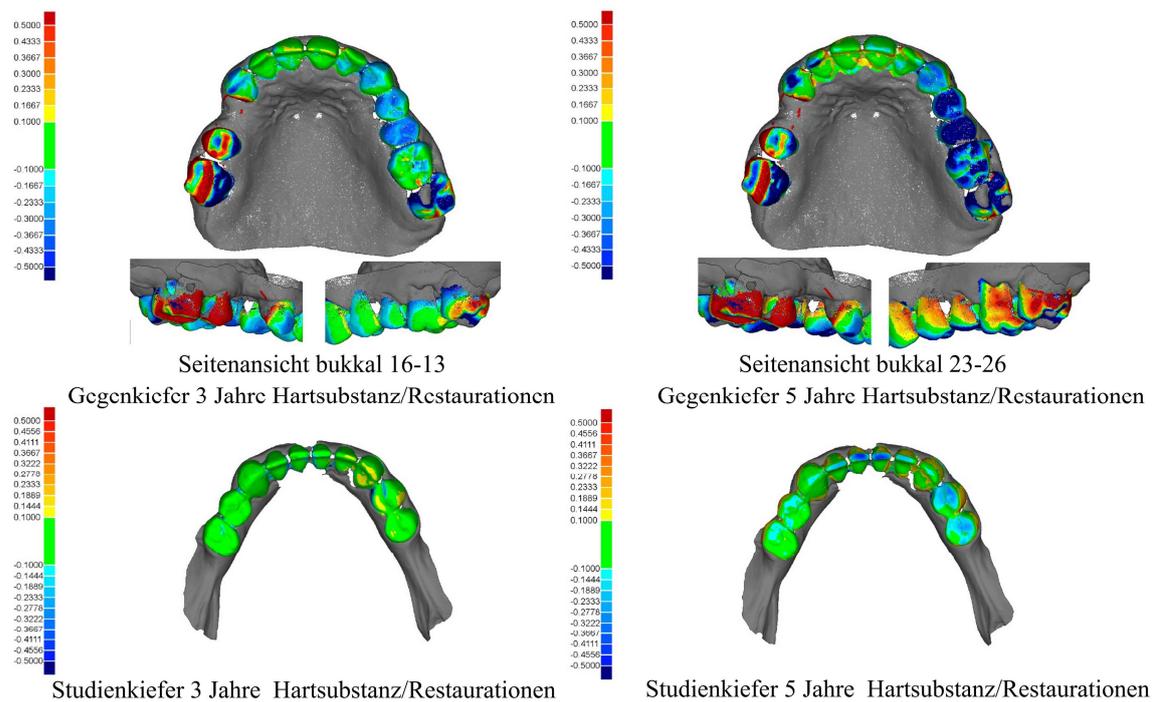


Abb. 34: Gegenkiefer Fall 6 mit entsprechendem Studienkiefer mit Therapiekonzept B (Prämolarenokklusion durch festsitzenden Zahnersatz)

Beim Gegenkiefer des Falles 9 (Abb. 35) wurde der Oberkiefer mit einer Frontzahnbrücke von 12 bis 22 versorgt. Im 3-Jahres-Modell zeigte sich kaum Veränderung zum Baseline-Modell. Nur der Zahn 25 ist leicht nach bukkal gewandert und stand nach fünf Jahren noch weiter bukkal. Die Eckzähne 13 und 23 erscheinen im 5-Jahres-Modell weiter nach distal gewandert als im 3-Jahres-Modell. Hier zeigte sich nur eine leichte Bewegung (mesio-bukkal blau und distopalatinal gelb-orange). Im 5-Jahres-Modell ist noch die vertikale Veränderung des Zahns 16 (positive Werte) zu erkennen.

Im Vergleich von Studien- und Gegenkiefer hat sich im Gegenkiefer aufgrund der ungenügenden Abstützung eine kontinuierliche Zahnstellungsänderung der Molaren und der endständigen zweiten Prämolaren gezeigt. Im Studienkiefer sind die Frontzähne schneller als die Gegenkieferzähne abgenutzt worden, auch die Stützzone der Zähne 24, 25, 34, 44 und 45 wiesen kontinuierliche Abrasionen auf.

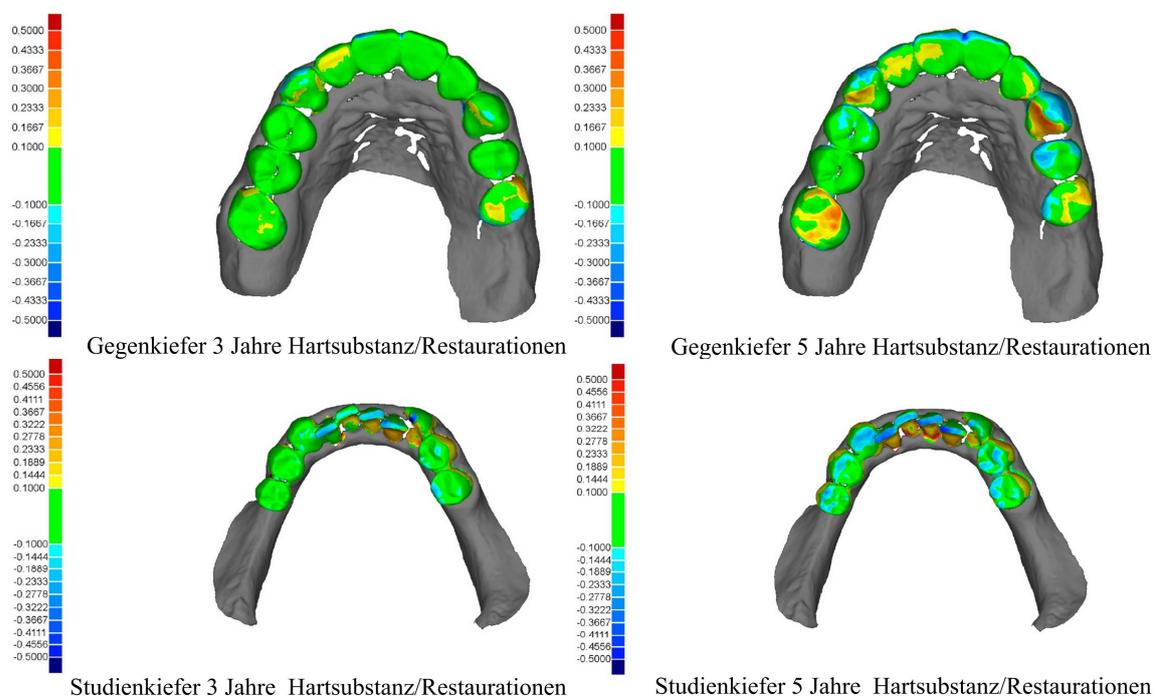


Abb. 35: Gegenkiefer Fall 9 mit entsprechendem Studienkiefer mit Therapiekonzept B (Prämolarenokklusion durch festsitzenden Zahnersatz)

Im Gegenkiefer des Falles 11 (Abb. 36), befindet sich eine Totalprothese im Oberkiefer. Es zeigte sich im Prämolarenbereich an den Kunststoffzähnen 14 (distaler Rand), 15, 24 (distaler Abhang) und 25 im 3-Jahres-Modell ein deutlicher okklusaler Substanzverlust von 0,4mm und nach fünf Jahren von bis zu 0,55mm. Gut zu erkennen ist ebenfalls noch, dass sich vor allem im Bereich der zweiten Prämolaren die Abrasionen an den Kunststoffzähnen im Bereich der Stützzone verstärkt hat.

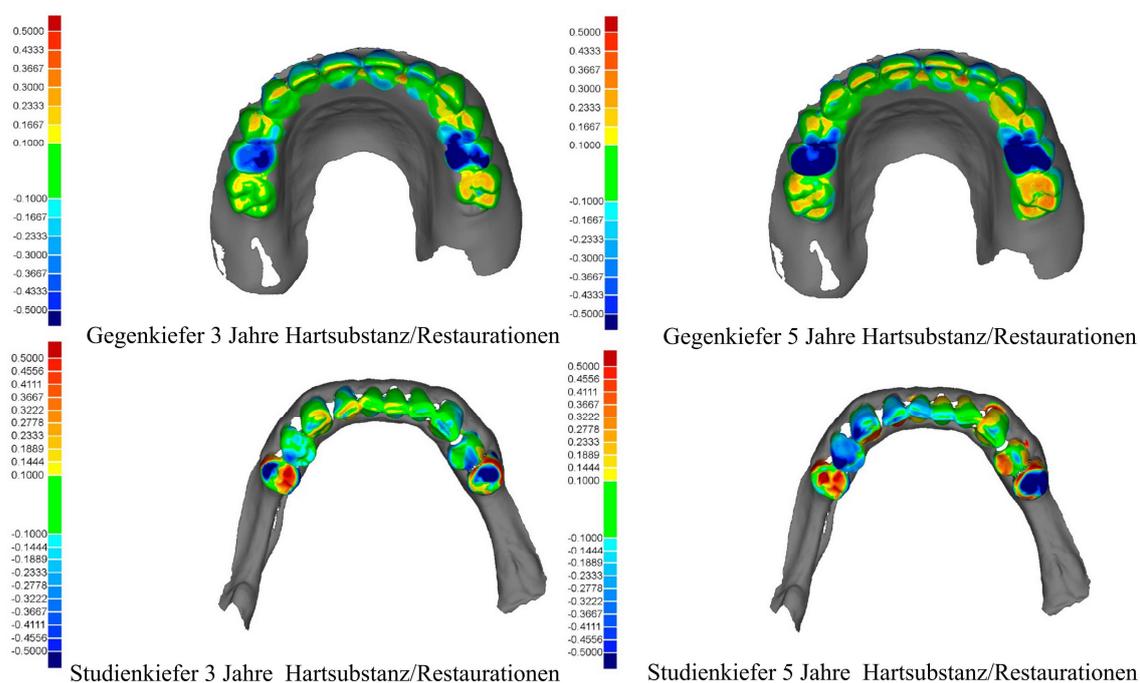


Abb. 36: Gegenkiefer Fall 11 mit entsprechendem Studienkiefer mit Therapiekonzept B (Prämolarenokklusion durch festsitzenden Zahnersatz)

## 4 Diskussion

In der multizentrischen, randomisierten, klinischen Studie zahnärztlich – prothetischer Therapieformen der verkürzten Zahnreihen wurde die wichtige Nebenfrage gestellt, ob nach der Therapie mit den zwei Konzepten, Therapie A für Molarenersatz mit partiellem Zahnersatz und Therapie B für verkürzte Zahnreihen mit Prämolaren-Okklusion durch festsitzenden Zahnersatz, ein erheblicher Unterschied in der Veränderung der Zahnstellung und der Zahnmorphologie nach der Versorgung festgestellt werden konnte und wie man diesen optimal beurteilen kann.

Für alle digitalen Daten, die bei der dreidimensionalen Analyse verwendet und über drei und fünf Jahre nach der Baseline-Versorgung erfasst wurden, war es die größte Herausforderung, die exakte Zuordnung der in den unterschiedlichen Messkoordinatensystemen befindlichen Daten zueinander in einem gemeinsamen Analysekoordinatensystem durchzuführen.

Mit den aus der digitalen Datenzuordnung resultierenden RMS-Werten können die Übereinstimmung der beiden Datensätze oder auch die Abweichungen erfasst werden. Mit der weiteren Analyse wird dargestellt, ob die Zuordnung mit fast identischen Daten erfolgte oder ob möglicherweise Änderungen der klinischen Situationen stattfanden und dargestellt werden können.

Je kleiner der RMS-Wert, desto genauer stimmen die beiden zu vergleichenden Datensätze miteinander überein. Somit wurden die RMS-Werte, die mittlere quadratische Abweichung, als Qualitätskontrolle zur Beurteilung der Zuordnungsgenauigkeit herangezogen.

In die RMS-Werte fließen unterschiedliche Faktoren ein, die aus verschiedenen Analyseschritten der Studie resultieren. Sie sind z.B. abhängig von den Vorbereitungs- und Bearbeitungsmaßnahmen der digitalen Datensätze und der vollständigen Prozesskette von

der Abformung des Kiefers über die Modellherstellung, Modellausarbeitung und die verwendeten Materialien bis hin zur Digitalisierung. Unter standardisierten Patientenstudienbedingungen mit Präzisionsabformungen würden die RMS-Werte bei ca. 0,01 bis 0,05mm (10µm bis 50µm) liegen [24]. In dieser Studie wurde in den verschiedenen Studienzentren Situationsabformmaterialien (Alginate) und Modellgipse von unterschiedlichen Herstellern verwendet. Eine Abweichung im Verfahren kann dazu führen, dass die RMS-Werte negativ beeinflusst werden. Zusätzlich kann es auch zu materialbedingten Fehlern wie Schrumpfung oder Quellen von Alginaten durch falsche oder zu lange Liegezeit, zu feuchter oder zu trockener Lagerung vor dem Ausgießen, sowie nicht vorschriftmäßiges Anmischen und Ausgießen der Gipse kommen. Auch die darauffolgenden Bearbeitungsschritte, wie Digitalisierung oder die 3D-Registrierung (Zuordnung der unterschiedlichen Datensätze zueinander) können Einfluss auf die Ergebnisse haben und eine Fehlerquelle darstellen.

Mit RMS-Werten bei den Studienkiefern von im Mittel 0,103mm (SD 0,05) für die 3-Jahres-Modelle und im Mittel 0,149mm (SD 0,058) für die 5-Jahres-Modelle zeigten sich vor dem Hintergrund der vielen verschiedenen Zentren und Materialien somit deutlich schlechtere Werte, als in monozentrischen Studien unter Verwendung von Präzisionsabformmassen. Gleiches gilt für die Gegenkiefermodelle (3-Jahres-Modelle im Mittel 0,091mm (SD 0,03), 5-Jahres-Modelle im Mittel 0,113mm (SD 0,037)).

Daraus abgeleitet wurde ein Toleranzbereich von -0,1mm bis +0,1mm für die Hartsubstanz/Restaurationsanalyse festgelegt. Differenzen, die kleiner als der RMS waren, wurden somit nicht für die Analyse herangezogen, da sie im Bereich des systematischen

Fehlers anzusiedeln sind. Nur so konnte die Verteilung der Diskrepanzen zwischen den beiden zu vergleichenden Objekten optimal dargestellt werden.

Die aus der Zuordnung resultierten RMS-Werte waren jeweils doppelt so groß wie die sonst üblichen, unter optimalen Studienbedingungen ermittelten mittleren Abweichungen, die mittels Abformung mit Präzisionsabformmassen und Sägemodellherstellung ermittelt wurden. Gute RMS-Werte zwischen 0,034mm und 0,097mm konnten zwar, wie in anderen klinischen Studien ermittelt wurde [24], in einzelnen Fällen erreicht werden, aber den gesamten RMS-Fehler nicht verbessern. Gut nachzuvollziehen ist es, dass größere RMS-Fehler von Beginn an von der Verwendung des Abformmaterials (Alginate statt Präzisionselastomere) und nicht gesägten Modellen verursacht wurden, wobei Alginate in der Zahnheilkunde gemeinhin für die Archivierung und Dokumentation verwendet werden. Eine genauere Analyse der Zahnstellungsänderung könnte noch dadurch erfolgen, dass die in der ersten Analyse ermittelten Zähne mit geänderter Stellung in einem weiteren, späteren Analyseschritt durch eine Betrachtung auf Einzelzahnebene unter ansonsten gleichen Bedingungen mit geeigneter Softwarebearbeitung erfolgt.

Über die systematischen Fehlerquellen hinaus spiegeln sich auch alle tatsächlichen klinischen Änderungen wie Zahnstellungsänderungen oder Abrasionen, die in der Analyse festgestellt wurden, im RMS-Fehler wieder.

In der 5-Jahres-Modellanalyse ist im allgemeinen die Zuordnungsgenauigkeit geringer als in der 3-Jahres-Modellanalyse. Mit zunehmenden Abweichungen zwischen Baseline-, 3-Jahres- und 5-Jahres-Vergleichsmodellen stieg der RMS-Fehler an. Anhand der Farbkodierung durch das Analyseprogramm konnte die Verteilung der Abweichungen dargestellt werden. Ein lokal begrenzter, intensiver Farbton deutet auf eine wesentliche

Veränderung des Vergleichsmodells gegenüber dem Baselinemodell hin, während gleichzeitig große grüne Areale (Abweichungen unter  $\pm 0,1$  mm) für eine exakte und korrekte Zuordnung sprechen. Eine unregelmäßige Verteilung der Farben auf dem gesamten Modell hingegen deutete auf zusätzliche Fehlerquellen hin. Ursächlich können dabei sowohl die Abdrucknahme, die Lagerung der Abformung und die Modellherstellung sein. Fehler im Rahmen der Digitalisierung sind aufgrund der standardisierten Vorgehensweise eher unwahrscheinlich. Je stärker die Abweichungen zwischen Baseline- und Vergleichsmodell sind und je weniger übereinstimmende Areale es gibt, desto schwieriger und gegebenenfalls auch fehlerbehafteter wird die dreidimensionale Zuordnung.

Mit den RMS-Werten konnte die Qualität der Registrierung gut beurteilt werden. Die korrekte Zuordnung ist die Voraussetzung für die anschließende 3D-Differenz-Analyse mit der die Abweichungen zwischen den Datensätzen dargestellt werden können.

Deutlich zu erkennen waren die Abweichungen der Morphologie und Stellungsänderung der Zähne, die im Laufe der Jahre kontinuierlich stattgefunden haben.

#### **4.1 Dreidimensionale Analyse der Veränderungen der Zahnstellung und der Morphologie der Zähne und Übereinstimmung mit der makroskopischen Modellanalyse**

In der makroskopischen Modellanalyse der Studienkiefer haben sich in 5 Fällen Abrasionen (Patienten 2, 4, 5, 10 und 11) und bei den Gegenkiefern in 7 Fällen Abrasionen (Patienten 1, 3, 5, 7, 9, 10 und 11) gezeigt. In der digitalen Analyse wurden die Abrasion in den Studienkiefern bei 9 Fällen (Patienten 2-4 und 6-11) und bei Gegenkiefern in 10 Fällen

(Patienten 1-3 und 5-11) festgestellt. Durch die Verwendung der 3D-Analysenverfahren sind die Veränderungen der Zahnstellung und Morphologie bei allen Studienkiefern leichter und präziser zu erkennen. Die Lokalisation und das Ausmaß der Abrasionen sind in den farbkodierten Differenzbildern der digitalen Analyse gut zu erfassen. Die digitalen Datensätze sind für die computergestützten Analysen und für die flächenhaften Ausdehnungen gut geeignet. [19, 22, 23, 25, 27].

Bei den Zahnstellungsänderungen zeigte sich bei der makroskopischen Modellanalyse und der dreidimensionalen Analyse eine gute Übereinstimmung. Es wurden im Studienkiefer drei Fälle (Patienten 1, 5 und 11) und im Gegenkiefer vier Fälle (Patienten 3, 6, 8 und 9) identifiziert. Mit den digitalen Methoden können Veränderungen wesentlich besser erkannt werden, da durch die 3D-Analyse das Ausmaß der Veränderungen quantitativ und ohne subjektiven Untersuchereinfluss dargestellt werden kann.

Die Analyseergebnisse der Studien- und Gegenkiefer bestätigten in ihrer morphologischen Veränderung wie Abrasionen oder Zahnstellungsänderung, dass in beiden Therapiegruppen ähnliche Abrasionen und leichte Bewegungen im Frontzahnbereich resultierten. Die Analyse der Ergebnisse veranschaulichte auch, dass die ersetzten Kunststoffzähne stärkere Abrasionen aufwiesen als die natürlichen Zähne. Die Zähne in der Therapiegruppe B mit verkürzter Zahnreihe sind relativ stabil geblieben. Die an endständigen Prämolaren sind aber wegen der großen Kaukräfte meist stärker abgenutzt worden. Interessanterweise zeigt sich beim Kiefer der Therapiegruppe B, der mit verkürzter Zahnreihe versorgt wurde, bei dem der Gegenkiefer (Fall 9) jedoch bis zu den Molaren verzahnt ist, dass eine Zahnstellungsänderung im Molarenbereich und im Bereich der zweiten Prämolaren stattgefunden hat. Die unterschiedlichen Bewegungen wie Bukkalisation, Distalisation aber

auch Elongation erfolgen, da hier keine stabile Okklusion durch Antagonisten gesichert wurde. Bei der Therapiegruppe A mit Prothesenversorgung sind im ersetzten Molarenbereich geringere Abrasionen in diesem Bereich festgestellt worden als bei den Restzähnen, wie Luthardt schon erklärte: der Ersatz für fehlende Molaren durch herausnehmbare Prothesen bringe wenig Vorteile für den Patienten und auch keine merkliche Vermehrung des Kaueffektes [21].

## 4.2 Schlussfolgerung

Die gesamte multizentrische, randomisierte, klinische Studie wurde über mehrere Jahre von zahlreichen und auch oft von wechselnden Behandlern durchgeführt, die die laufende Dokumentation mit normaler Abformqualität, Situationsmodellabformmassen und konventioneller Modellerstellung durchgeführt haben. Mit Präzisionsabformungen, die sonst nur für präparierte Zähne verwendet werden, wäre eine noch bessere Ergebnisdarstellung mit der 3D-Analyse möglich gewesen. Aber man darf auch nicht ignorieren, dass die finanzielle Belastung und der Mehraufwand mit besseren Präzisionsabformmaterialien zu Zwecken der Archivierung und Dokumentation um ein Vielfaches größer wäre.

Die morphologische Abweichung und Stellungsänderung der Zähne können von verschiedenen internen und externen Faktoren der Patienten beeinflusst und verursacht werden [17, 18].

Die Ursache für Attrition, Abrasion, Erosion und Abfraktion der Zähne sind ein großes Thema in der Zahnheilkunde. Einheitliche Untersuchungen und Beurteilungsindizes [2, 6, 12, 13, 31, 32, 42], die klinisch akzeptiert und durchführbar sind, gibt es bislang nicht. Auch ätiologische Faktoren müssen noch weiter erforscht werden. Bekannt ist, dass Abrasion und Zahnstellungsänderung ein lebenslanger physiologischer Prozess sind [4, 10, 33, 35, 40]. Multiple Faktoren können zu pathologischen Veränderungen führen und Veränderungen verursachen. Die Patientenauswahl im Rahmen der multizentrischen, randomisierten Studie wurde anhand eines strikten Protokolls mit verschiedenen Ein- und Ausschlusskriterien durchgeführt. Somit waren Patienten mit einer Kiefergelenksproblematik oder starker parodontalen Vorschädigungen – zwei Faktoren die sich negativ auf Abrasion und

Zahnstellungsänderung auswirken könnten – von der Studienteilnahme ausgeschlossen [8, 39].

Zur Veränderungen der Morphologie und der Zahnstellung kann es auch bei Patienten mit Zahnschmelzverlust durch Gastroenteritis mit Rückflusskrankheit [34] oder durch psychische Instabilität oder psychische Veränderungen in Kombination mit craniomandibulären Dysfunktionen [1, 29, 35] kommen.

Unsere Gesellschaft und die industrielle übertriebene Lebensmittelbranche bieten allen Menschen mehr ungewohnte Konsummöglichkeiten (extrem zuckerhaltige und kohlenhydratreiche Nahrungsmittel). Auch zum Beispiel die zunehmende Luftverschmutzung, sowie neue Diätgewohnheiten und sogar der immer weiter steigende Medikamentenmissbrauch und die daraus folgenden Abhängigkeiten [3, 9, 17, 18, 28] können der Zahnschmelz schaden. Solche multiplen Faktoren spielen bei der Änderung von Zahnstellung und Morphologie der Zähne im Laufe des Lebens eine große Rolle. Auch bekannt ist, dass Abrasion und Zahnstellungsänderung bei Männern deutlich häufiger auftreten als bei Frauen [7, 30, 41]. Die hier vorgestellte dreidimensionale Analyse ist geeignet, die Veränderung der Zahnstellung und Morphologie qualitativ und quantitativ über die Zeit objektiv und mit hinreichender Genauigkeit zu erfassen. Der Zeitaufwand und die Komplexität des Verfahrens und der gesamten Digitalisierungs-, Zuordnungs- und Auswertungskette sollte jedoch nicht unterschätzt werden.

## 5 Zusammenfassung

Die vorliegende Studie befasst sich mit der Anwendung eines digitalen dreidimensionalen Analyse-Verfahrens, um Veränderungen der Zahnstellung und der Morphologie nach unterschiedlichen prothetischen Versorgungen bei fehlenden Molaren zu erfassen und darzustellen. Von insgesamt 11 Patienten aus einer andernorts durchgeführten multizentrischen klinischen Studie wurden die Studien- und Gegenkiefer nach erfolgreicher definitiver prothetischer Versorgung analysiert. Insgesamt wurden Vergleichsdatensätze für 66 Situationsmodelle (Baseline-Daten, 3-Jahres-Nachkontrolle und 5-Jahres-Schlusskontrolle jeweils von Studien- und Gegenkiefer) erstellt. Zusätzlich zu einem Pilotfall wurden je fünf Fälle aus den beiden Therapiegruppen A: Molarenersatz mit partieller Prothese und B: Festsitzende Versorgung nach dem Prinzip der verkürzten Zahnreihe prothetisch versorgt. Die Nachuntersuchungen fanden nach drei und fünf Jahren statt. Alle Baseline-Daten wurden als Ausgangsmodelle mit einem Weißlicht-Streifenprojektionsverfahren digitalisiert und zu einem CAD-Flächenmodell (computer aided design, computergestützte Gestaltung) zurückgeführt.

Dies ist erforderlich, um eine mathematische Berechnung zwischen den 3- und 5-Jahresvergleichsdatensätzen und den Baseline-Datensätzen durchführen zu können. Die 3-Jahres- und 5-Jahres-Modelle wurden dem jeweiligen Baseline-Flächenmodell zugeordnet. Nach jeder Zuordnung wurden die RMS-Werte (Root Mean Square; Wurzel, die aus dem Mittelwert der Quadrate aller Abweichungen berechnet wird. Kann als Gütemaß für die Zuordnungsgenauigkeit bzw. die Übereinstimmung von Punktwolken und Flächen genutzt werden) ermittelt und die Zuordnungsgenauigkeit festgestellt. Die morphologische Abweichung und die Veränderung der Zahnstellung zwischen den zugeordneten Datensätzen

wurden mit einem weiteren Programm quantitativ analysiert und graphisch visualisiert. Anhand dieser Daten wurden der Zahnhartsubstanzverlust durch Abrasion oder Attrition und die Stellungsänderungen der Zähne dreidimensional erfasst. Die Auswertung und Analyse der Ergebnisse erfolgte deskriptiv.

Die Therapiegruppe A mit partieller Prothese wies im Vergleichszeitraum im Studienkiefer ähnliche Abrasionen und Zahnstellungsänderungen auf wie die Therapiegruppe B mit feststehendem Zahnersatz und verkürzter Zahnreihe. Gut erkennbar war auch, dass die ersetzten Kunststoffzähne eine stärkere Abnutzung aufwiesen als die natürlichen Zähne und eine Zahnstellungsänderung im Gegenkiefer beziehungsweise im Bereich der Molaren und der zweiten Prämolaren stattfand wenn keine sichere Okklusion durch Antagonisten in verkürzten Zahnreihengruppe vorlag.

Die erarbeitete Analysemethodik ist für die objektive Erfassung von Zahnhartsubstanzverlust und Zahnstellungsänderungen geeignet und bei der Erfassung von Abrasionen der visuellen Modellkontrolle überlegen. Durch die Verwendung von Präzisionsabformmassen an Stelle der üblichen Situationsabformmassen könnte das Verfahren hinsichtlich seiner Genauigkeit weiter verbessert werden.

## 6 Literatur

1. Bakke M, Larsen B, Dalager T, Møller E: Oromandibular dystonia – functional and clinical characteristics: a report on 21 cases. *Oral surgery, oral medicine, oral pathology and oral radiology* 115: 21-26 (2013)
2. Bardsley P: The evolution of tooth wear indices. *Clinical Oral Investigations* 12: 15-19 (2008)
3. Bartlett D, Phillips K, Smith B: A Difference in Perspective – The North American and European Interpretations of Tooth Wear. *The International Journal of Prosthodontics* 12:401-408 (1999)
4. Bartlett D, Dugmore C: Pathological or physiological erosion – is there a relationship to age? *Clinical Oral Investigations* 12: 27-31 (2008)
5. Bedini R, Pecci R, Notarangelo G, Zuppante F, Persico S, Carlo F: Microtomography evaluation of dental tissue wear surface induced by in vitro simulated chewing cycles on human and composite teeth. *Annali dell' Istituto Superiore di Sanità* 48: 65-70 (2012)
6. Berg-Beckhoff G, Kutschmann M, Bardehle D: Methodological considerations concerning the development of oral dental erosion indexes: literature survey, validity and reliability. *Clinical Oral Investigations* 12: 51-58 (2008)
7. Bernhardt O, Gesch D, Splieth C, Schwahn C, Mack F, Kocher T, Meyer G, John U, Kordass B: Risk Factors for High Occlusal Wear Scores in a Population-Based Sample: Results of the Study of Health in Pomerania (SHIP). *The International Journal of Prosthodontics* 17: 333-339 (2004)

8. Bernhardt O, Gesch D, Look J, Hodges J, Schwahn C, Mack F, Kocher T: The Influence of Dynamic Occlusal Interferences on Probing Depth and Attachment Level: Results of the Study of Health in Pomerania (SHIP). *Journal Periodontol* 77: 506-516 (2006)
9. Bishop K, Kelleher M, Briggs P, Joshi R: Wear now? An update on the etiology of tooth wear. *Quintessence International* 28: 305-313 (1997)
10. Borcic J, Anic I, Urek M, Ferreri S: The prevalence of non-carious cervical lesions in permanent dentition. *Journal of Oral Rehabilitation* 31: 117-123 (2004)
11. Dworkin SF, LeResche L: Research diagnostic criteria for temporomandibular disorders: Review, criteria, examinations and specifications, critique. *J Craniomandib Discord* 1992,6:301-355
12. Fares J, Shirodaria S, Chiu K, Ahmad N, Sherriff M, Bartlett D: A New Index of Tooth Wear. *Caries Research* 43: 119-125 (2009)
13. Ganss C: How valid are current diagnostic criteria for dental erosion? *Clinical Oral Investigations* 12: 41-49 (2008)
14. Ghamrawy, E.E.: Quantitative changes in dental plaque formation related to removable partial dentures *J Oral Rehabil* 3, 115(1976)
15. Helkimo M: Studies on function and dysfunction of the masticatory system. II. Index for anamnestic and clinical dysfunction and occlusal state. *Sven Tandlak Tidskr* 1974,67:101-121
16. Käyser AF: Shortened dental arches and oral function. *J Oral Rehabil* 8:457-462 (1981)
17. Kelleher M, Bishop K: The Aetiology and Clinical Appearance of Tooth Wear. *European Journal of Prosthodontics and Restorative Dentistry* 5: 157-160 (1997)

18. Kelleher M, Bishop K: Tooth surface loss: an overview. *British Dental Journal* 186: 61-66 (1999)
19. Luthardt RG, Bornemann G, Lemelson S, Walter MH, Hüls A. An innovative method for evaluation of the 3-D internal fit of CAD/CAM crowns fabricated after direct optical versus indirect laser scan digitizing. *int. J Prosthodont.* Nov-Dec; 17(6): 680-5.2004)
20. Luthardt R, Marré B, Heinecke A, Gerss J, Aggstaller H, Busche E, Dressler P, Gitt I, Hannak W, Hartmann S, Heydecke G, Jahn F, Kern M, Mundt T, Pospiech P, Stark H, Wöstmann B, Walter M: The randomized shortened dental arch study (RaSDA): design and protocol. <http://www.trialsjournal.com/content/11/1/15>. 1-9 (2010)
21. Luthardt R, Spieckermann J, Böning K, Walter M: Therapie der verkürzten Zahnreihe. *Deutsche zahnärztlich Zeitschrift* 55: 592-609 (2000)
22. Luthardt R, Walter M, Weber A, Koch R, Rudolph H: Clinical Parameters Influencing the Accuracy of 1- and 2-Stage Impressions: A Randomized Controlled Trial. *The International Journal of Prosthodontics* 21: 322-327 (2008)
23. Luthardt R, Walter M, Quaas S, Koch R, Rudolph H: Comparison of the three-dimensional correctness of impression techniques: A randomized controlled trial. *Quintessence International* 41: 1-9 (2010)
24. Luthardt R, Loos R, Quaas S: Accuracy of Intraoral Data Acquisition in Comparison to the Conventional Impression. *International Journal of Computerized Dentistry* 8: 283-294 (2005)
25. Luthardt R, Koch R, Rudolph H, Walter M: Qualitative computer aided evaluation of dental impressions in vivo. *Dental Materials* 22: 69-76 (2006)

26. Luthardt R, Kühmstedt P, Walter H: A new method for the computer-aided evaluation of three-dimensional changes in gypsum materials. *Dental Materials* 19: 19-24 (2003)
27. Quaas S, Rudolph H, Luthardt R: Direct mechanical data acquisition of dental impressions for the manufacturing of CAD/CAM restorations. *Journal of Dentistry* 35: 903-908 (2007)
28. Rafeek R, Marchan S, Eder A, Smith W: Tooth surface loss in adult subjects attending a university dental clinic in Trinidad. *International Dental Journal* 56: 181-186 (2006)
29. Schierz O, John M, Schroeder E, Lobbezoo F: Association between anterior tooth wear and temporomandibular disorder pain in a German population. *The Journal of Prosthetic Dentistry* 97: 305-309 (2007)
30. Seliman D, Pullinger A, Solberg W: The Prevalence of Dental Attrition and its Association with Factors of Age, Gender, Occlusion, and TMJ Symptomatology. *Journal of dental research* 67: 1323-1333 (1988)
31. Smith B, Knight J: An Index for Measuring the Wear of Teeth. *British Dental Journal* 156:435-438 (1984)
32. Smith B, Robb N: The prevalence of toothwear in 1007 dental patients. *Journal of Oral Rehabilitation* 23: 232-239 (1996)
33. Spijker A, Rodriguez J, Kreulen C, Bronkhorst E, Bartlett D, Creugers N: Prevalence of Tooth Wear in Adults. *The International Journal of Prosthodontics* 22: 35-41 (2009)
34. Tantbirojn D, Pintado M, Versluis A, Dunn C, DeLong R: Quantitative analysis of tooth surface loss associated with gastroesophageal reflux disease: A longitudinal clinical Study. *Journal of the American Dental Association* 143: 278-285 (2012)

35. Tsiggos N, Tortopidis D, Hatzkyriakos A, Menexes G: Association between Self-Reported Bruxism Activity and Occurrence of Dental Attrition, Abfraction, and Occlusal Pits on natural Teeth. *The Journal of Prosthetic Dentistry* 100: 41-46 (2008)
36. Tuominen, R., Ranta, K., Paunio, I.: Wearing of removable Partial dentures in relation to dental caries. *J Oral Rehabil* 15, 515 (1988)
37. Tuominen, R., Ranta, K., Paunio, I.: Wearing of removable Partial dentures in relation to periodontal pockets. *J Oral Rehabil* 16, 119 (1989)
38. Walter M, Weber A, Marré B, Gitt I, Gerß J, Hannak W, Hartmann S, Heydecke G, Huppertz J, Jahn F, Ludwig A, Mundt T, Kern M, Klein V, Pospiech P, Stumbaum M, Wolfart S, Wöstmann B, Busche E, Böning K, Luthardt R: The Randomized Shortened Dental Arch Study: Tooth Loss. *Journal of Dental Research* 89: 818-822 (2010)
39. Wasterlain S, Cunha E, Hillson S: Periodontal Disease in a Portuguese Identified Skeletal Sample from the Late Nineteenth and Early Twentieth Centuries. *American Journal of physical anthropology* 145: 30-42 (2011)
40. Winocur E, Hermesh H, Littner D, Shiloh R, Peleg L, Eli I: Signs of bruxism and temporomandibular disorders among psychiatric patients. *Oral surgery, oral medicine, oral pathology, oral radiology, and endodontics* 103: 60-63 (2007)
41. Yadav S: A Study on Prevalence of Dental Attrition and its Relation to Factors of Age, Gender and to the Signs of TMJ Dysfunction. *The Journal of Indian Prosthodontic Society* 11: 98-105 (2011)
42. Young A, Amaechi B, Dugmore C, Holbrook P, Nunn J, Schiffner U, Lussi A, Ganss C: Current erosion indices — flawed or valid? Summary. *Clinical Oral Investigations* 12: 59-63 (2008)

## 7 **Abbildungsverzeichnis**

- Abb. 1: Fall 1 der ausgewählten Modelle aus der Multizentrischen Studie zur Therapie der verkürzten Zahnreihe; Studienkiefer (Oberkiefer) in der Aufsicht (oben) und von frontal (unten), von links nach rechts: Baseline, 3-Jahre, 5-Jahre, Versorgung: partielle Prothese, Therapie Gruppe A. .... 9
- Abb. 2: Fall 2 der ausgewählten Modelle aus der Multizentrischen Studie zur Therapie der verkürzten Zahnreihe; Studienkiefer (Unterkiefer) in der Aufsicht (oben) und von frontal (unten), von links nach rechts: Baseline, 3-Jahre, 5-Jahre, Versorgung: festsitzender Zahnersatz, Therapie Gruppe B..... 9
- Abb. 3: Fall 3 der ausgewählten Modelle aus der Multizentrischen Studie zur Therapie der verkürzten Zahnreihe; Studienkiefer (Oberkiefer) in der Aufsicht (oben) und von frontal (unten), von links nach rechts: Baseline, 3-Jahre, 5-Jahre, Versorgung: partielle Prothese, Therapie Gruppe A ..... 10
- Abb. 4: Fall 4 der ausgewählten Modelle aus der Multizentrischen Studie zur Therapie der verkürzten Zahnreihe; Studienkiefer (Oberkiefer) in der Aufsicht (oben) und von frontal (unten), von links nach rechts: Baseline, 3-Jahre, 5-Jahre, Versorgung: festsitzender Zahnersatz, Therapie Gruppe B..... 10
- Abb. 5: Fall 5 der ausgewählten Modelle aus der Multizentrischen Studie zur Therapie der verkürzten Zahnreihe; Studienkiefer (Unterkiefer) in der Aufsicht (oben) und von frontal (unten), von links nach rechts: Baseline, 3-Jahre, 5-Jahre, Versorgung: festsitzender Zahnersatz, Therapie Gruppe B..... 11
- Abb. 6: Fall 6 der ausgewählten Modelle aus der Multizentrischen Studie zur Therapie der verkürzten Zahnreihe; Studienkiefer (Unterkiefer) in der Aufsicht (oben) und von

	frontal (unten), von links nach rechts: Baseline, 3-Jahre, 5-Jahre, Versorgung: festsitzender Zahnersatz, Therapie Gruppe B.....	11
Abb. 7:	Fall 7 der ausgewählten Modelle aus der Multizentrischen Studie zur Therapie der verkürzten Zahnreihe; Studienkiefer (Unterkiefer) in der Aufsicht (oben) und von frontal (unten), von links nach rechts: Baseline, 3-Jahre, 5-Jahre, Versorgung: partielle Prothese, Therapie Gruppe A .....	12
Abb. 8:	Fall 8 der ausgewählten Modelle aus der Multizentrischen Studie zur Therapie der verkürzten Zahnreihe; Studienkiefer (Unterkiefer) in der Aufsicht (oben) und von frontal (unten), von links nach rechts: Baseline, 3-Jahre, 5-Jahre, Versorgung: partielle Prothese, Therapie Gruppe A .....	12
Abb. 9:	Fall 9 der ausgewählten Modelle aus der Multizentrischen Studie zur Therapie der verkürzten Zahnreihe; Studienkiefer (Unterkiefer) in der Aufsicht (oben) und von frontal (unten), von links nach rechts: Baseline, 3-Jahre, 5-Jahre, Versorgung: festsitzender Zahnersatz, Therapie Gruppe B.....	13
Abb. 10:	Fall 10 der ausgewählten Modelle aus der Multizentrischen Studie zur Therapie der verkürzten Zahnreihe; Studienkiefer (Unterkiefer) in der Aufsicht (oben) und von frontal (unten), von links nach rechts: Baseline, 3-Jahre, 5-Jahre, Versorgung: partielle Prothese, Therapie Gruppe A .....	13
Abb. 11:	Fall 11 (Pilotfall) der ausgewählten Modelle aus der Multizentrischen Studie zur Therapie der verkürzten Zahnreihe; Studienkiefer (Unterkiefer) in der Aufsicht (oben) und von frontal (unten), von links nach rechts: Baseline, 3-Jahre, 5-Jahre, im Studienkiefer Bezahnung von 35-45 belassen (keine Restauration mit festsitzendem Zahnersatz notwendig, mit natürlicher verkürzten Zahnreihe).....	14

Abb. 12: Versuchsaufbau zur Analyse von Zahnstellungs- und -morphologieänderungen nach Eingliederung von Zahnersatz über die Zeit mittels Digitalisierung, Flächenrückführung, Zuordnung und 3D-Analyse. Die Ergebnisdarstellung erfolgt quantitativ (einschließlich Häufigkeitsverteilung) und qualitativ in farbkodierten Differenzbildern, wobei Blautöne negative Abweichungen und gelb-orange-rote Töne positive Abweichungen im Vergleich zur Referenz darstellen. ....	18
Abb. 13: Ergebnisse der Zuordnung und Analyse von Kontrollmodell zum Baselinemodell des Pilotfalles.....	31
Abb. 14: Prozentuale Abweichungen und Häufigkeitsverteilung nach der Zuordnung von Kontrollmodell zum Baselinemodell des Pilotfalles .....	31
Abb. 15: Ergebnisse der Standardabweichung der Zuordnung von Kontrollmodell zum Baselinemodell des Pilotfalles .....	32
Abb. 16: Studienkiefer Fall 11, Pilotfall, Therapiekonzept B mit natürlichen Zähnen in der farbkodierten Differenzdarstellung.....	33
Abb. 17: Studienkiefer Fall 1 mit Therapiekonzept A (partieller Zahnersatz mit Molarenersatz).....	35
Abb. 18: Studienkiefer Fall 3 mit Therapiekonzept A (partieller Zahnersatz mit Molarenersatz).....	36
Abb. 19: Studienkiefer Fall 7 mit Therapiekonzept A (partieller Zahnersatz mit Molarenersatz).....	37
Abb. 20: Studienkiefer Fall 8 mit Therapiekonzept A (partieller Zahnersatz mit Molarenersatz). Bei der roten, punktuellen Erscheinung am Zahn 44 mesiookklusal	

(siehe Pfeil in Abb. 20) kann es sich um ein Gipsbläschen im Baseline-Modell handeln.....	38
Abb. 21: Studienkiefer Fall 10 mit Therapiekonzept A (partieller Zahnersatz mit Molarenersatz).....	39
Abb. 22: Studienkiefer Fall 2 mit Therapiekonzept B (Prämolarenokklusion durch festsitzenden Zahnersatz).....	40
Abb. 23: Studienkiefer Fall 4 mit Therapiekonzept B (Prämolarenokklusion durch festsitzenden Zahnersatz).....	41
Abb. 24: Studienkiefer Fall 5 mit Therapiekonzept B (Prämolarenokklusion durch festsitzenden Zahnersatz).....	42
Abb. 25: Studienkiefer Fall 6 mit Therapiekonzept B (Prämolarenokklusion durch festsitzenden Zahnersatz).....	43
Abb. 26: Studienkiefer Fall 9 mit Therapiekonzept B (Prämolarenokklusion durch festsitzenden Zahnersatz).....	44
Abb. 27: Gegenkiefer Fall 1 mit entsprechendem Studienkiefer mit Therapiekonzept A (partieller Zahnersatz mit Molarenersatz).....	46
Abb. 28: Gegenkiefer Fall 3 mit entsprechendem Studienkiefer mit Therapiekonzept A (partieller Zahnersatz mit Molarenersatz).....	47
Abb. 29: Gegenkiefer Fall 7 mit entsprechendem Studienkiefer mit Therapiekonzept A (partieller Zahnersatz mit Molarenersatz).....	48
Abb. 30: Gegenkiefer Fall 8 mit entsprechendem Studienkiefer mit Therapiekonzept A (partieller Zahnersatz mit Molarenersatz).....	49

Abb. 31: Gegenkiefer Fall 10 mit entsprechendem Studienkiefer mit Therapiekonzept A (partieller Zahnersatz mit Molarenersatz).....	50
Abb. 32: Gegenkiefer Fall 2 mit entsprechendem Studienkiefer mit Therapiekonzept B (Prämolarenokklusion durch festsitzenden Zahnersatz).....	51
Abb. 33: Gegenkiefer Fall 5 mit entsprechendem Studienkiefer mit Therapiekonzept B (Prämolarenokklusion durch festsitzenden Zahnersatz).....	52
Abb. 34: Gegenkiefer Fall 6 mit entsprechendem Studienkiefer mit Therapiekonzept B (Prämolarenokklusion durch festsitzenden Zahnersatz).....	53
Abb. 35: Gegenkiefer Fall 9 mit entsprechendem Studienkiefer mit Therapiekonzept B (Prämolarenokklusion durch festsitzenden Zahnersatz).....	54
Abb. 36: Gegenkiefer Fall 11 mit entsprechendem Studienkiefer mit Therapiekonzept B (Prämolarenokklusion durch festsitzenden Zahnersatz).....	55

## 8 Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Modellqualität und visuelle vergleichende Beurteilung der 3- und 5-Jahres-Modelle mit dem jeweiligen Baseline-Modell (Modell-Nr.: 1-3).....	23
Tab. 2: Modellqualität und visuelle vergleichende Beurteilung der 3- und 5-Jahres-Modelle mit dem jeweiligen Baseline-Modell (Modell-Nr.: 4-6).....	24
Tab. 3: Modellqualität und visuelle vergleichende Beurteilung der 3- und 5-Jahres-Modelle mit dem jeweiligen Baseline-Modell (Modell-Nr.: 7-9).....	25
Tab. 4: Modellqualität und visuelle vergleichende Beurteilung der 3- und 5-Jahres-Modelle mit dem jeweiligen Baseline-Modell (Modell-Nr.: 10-11).....	26
Tab. 5: RMS (Root Mean Square) - Fehler, Mittelwert (MW) und Standardabweichung (SD) der Zuordnung der 3- und 5-Jahres-Vergleichsdaten zum Baseline-Modell des Studienkiefers zwischen Therapie Gruppe A (partieller Zahnersatz mit Molarenersatz) und B (Prämolarenokklusion durch Festsitzenden Zahnersatz). Bei divergierender Zahnstellung wurden Front- und Seitenzähne zeitlich getrennt in jeweils optimaler Positionierung digitalisiert. ....	28
Tab. 6: RMS (Root Mean Square) - Fehler, Mittelwert (MW) und Standardabweichung (SD) der Zuordnung der 3- und 5-Jahres-Vergleichsdaten zum Baseline-Modell des Gegenkiefers zwischen Therapie Gruppe A (partieller Zahnersatz mit Molarenersatz) und B (Prämolarenokklusion durch festsitzenden Zahnersatz). ....	29

# Lebenslauf

## Personalien

Name: Ding, Ruyi  
Geburtsdatum: 28.Ferbruar.1977  
Geburtsort: Guizhou, China  
Familienstand: verheiratet

## Schulbildung

1983 – 1989 Roulian Grundschule, Guiyang  
1989 – 1992 Wudang zweites mittel Gymnasium, Guiyang  
1992 – 1995 Guiyang zweites Gymnasium

## Hochschulausbildung

1995 – 2000 Human Medizin an der Tongji Medizin Universität  
Wuhan, China  
2003 – 2011 Zahnmedizin an der Universität Ulm

## Beruflicher Werdegang

2000 – 2001 Assistenzarzt in Tianjin, China  
2011 – 2013 Assistenz Zahnarzt in Bühl  
2013 – jetzt Angestellter Zahnarzt in Karlsruhe

## **Danksagung**

Während meiner Promotionszeit habe ich von vielen Seiten Unterstützung erfahren, wofür ich mich herzlich bedanken möchte.

An erster Stelle richtet sich mein Dank an meinen Doktorvater Herrn Prof. Dr. Ralph G. Luthardt für die Überlassung des Themas dieser Dissertation.

Mein besonderer Dank gilt Frau OÄ Dr. Heike Rudolph für ihre vielfältigen und freundlichen Hinweise und ihre hervorragende fachliche Unterstützung bei der Betreuung des Dissertationsprojekts und der Fertigstellung der Arbeit.

Meine Ehefrau und meine Eltern bedanke ich mich dafür, dass sie mich allezeit mit besten Kräften, Geduld und Motivation unterstützt haben.