

**Aus der Poliklinik für Kieferorthopädie  
des Universitätsklinikums  
der Heinrich-Heine-Universität  
Düsseldorf  
Direktor: Prof. Dr. D. Drescher**

**Analyse der Übertragungsfehler bei indirekten  
Bracket-Adhäsiv-Techniken mit Hilfe eines  
dreidimensionalen Laser-Messverfahrens**

Dissertation

zur Erlangung des Grades eines Doktors der Zahnmedizin

Der Medizinischen Fakultät der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

vorgelegt von

**Röttger-Michael Lohe**

2001

Als Inauguraldissertation gedruckt mit Genehmigung der  
Medizinischen Fakultät der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

gez. Prof. Dr. D. Häussinger

Dekan

Referent: Prof. Dr. D. Drescher

Korreferent: Prof. Dr. A. Herforth

## INHALTSVERZEICHNIS

1.	Einleitung .....	5
2.	Literaturübersicht .....	7
2.1.	Das Straight-Wire-Prinzip .....	7
2.2.	Bracketpositionierung .....	11
2.3.	Die direkte Bracket-Adhäsiv-Technik.....	15
2.4.	Die indirekte Bracket-Adhäsiv-Technik.....	15
2.4.1.	Die nicht Set up taugliche indirekte Bracket-Adhäsiv-Technik.....	16
2.4.2.	Die Set up taugliche indirekte Bracket-Adhäsiv-Technik .....	19
2.5.	Positionierungsfehler und ihre Konsequenzen .....	20
3.	Fragestellung .....	25
4.	Material und Methode .....	27
4.1.	Vorstellung der hier gegenübergestellten indirekten Klebeverfahren .....	27
4.1.1.	Tiefziehfolienverfahren .....	27
4.1.2.	Transferschlüsselverfahren .....	29
4.2.	Der Phantompatient.....	32
4.3.	Modellherstellung.....	34
4.4.	Messung der Übertragungsfehler.....	36
4.4.1.	Der Laser-Abstandssensor.....	39
4.4.1.1.	Optimierung der Messungen.....	45
4.4.2.	Der computergesteuerte Verschiebetisch und seine Software .....	46
4.5.	Analyse der Messgenauigkeit.....	54
4.6.	Statistische Auswertung.....	56
5.	Ergebnisse .....	58
5.1.	Optimierung der Messungen .....	58
5.2.	Messgenauigkeit.....	61
5.3.	Die Übertragungsfehler.....	61
6.	Diskussion.....	69

6.1. Fehlerquellen des Messverfahrens.....	69
6.1.1 Abschattungsphänomene.....	69
6.1.2. Oberflächenabhängige Effekte.....	70
6.1.3. Optimierung der Messgenauigkeit.....	72
6.2. Schlussfolgerungen .....	74
6.3. Ausblick.....	76
7.    Literaturverzeichnis .....	77
8.    Anhang.....	81
9.    Danksagungen.....	85
10.   Zusammenfassung.....	86
11.   Lebenslauf.....	88

## 1. EINLEITUNG

Die Positionierungsgenauigkeit orthodontischer Brackets hat mit der Einführung der Straight-Wire-Apparatur durch *Andrews* in hohem Maß an Bedeutung gewonnen. In die Gestaltung der Straight-Wire-Brackets sind die Informationen der ersten, zweiten und dritten Ordnung für jeden Zahn eingearbeitet. Durch die Verwendung von geraden, formatfüllenden -das heißt den Bracketslot in Höhe und Breite ausfüllende Vierkantbögen- können alle Informationen des Behandlungsbogens auf den Zahn übertragen werden. Dies ermöglicht sowohl die dreidimensionale Einstellung als auch die körperliche Bewegung der Zähne. Bei exakter Positionierung der Brackets auf den Zähnen bleibt lediglich ein Mindestmaß an Anpassungsbiegungen zur Feineinstellung einer funktionell und ästhetisch befriedigenden Okklusion notwendig.

Eine ungenaue Positionierung der vorprogrammierten Brackets auf den Zähnen führt zu unerwünschten Zahnbewegungen, weshalb diese Brackets häufig umgeklebt werden müssen. Das Therapieergebnis und die Behandlungsdauer der Straight-Wire-Apparatur werden durch das Umkleben von Brackets sowie durch Bracketverluste beeinträchtigt bzw. verlängert, da nach Umklebung eines Brackets zunächst wieder flexiblere und Drähte runden Querschnittes mit geringerem Elastizitätsmodul angewendet werden müssen. Sie richten den Zahn und das Bracket so aus, dass das spätere Eingliedern eines formatfüllenden, geraden Bogens wieder möglich wird. Dies bedeutet eine Verzögerung im Behandlungsablauf. Um diesem Problem zu begegnen, gibt es unterschiedliche Möglichkeiten, die Positionierungsgenauigkeit zu verbessern.

Grundsätzlich finden das direkte und das indirekte Klebeverfahren Anwendung. Bei beiden Verfahren werden die Brackets mittels Säure-Adhäsiv-Technik auf die Zähne geklebt.

Bei dem direkten Klebeverfahren positioniert der Behandler die Brackets direkt auf die Zähne des Patienten. Da an die Positionierung der Brackets hohe Anforderungen gestellt sind und der Behandler mit den engen intraoralen

Verhältnissen konfrontiert ist, wird häufig eine Fehlpositionierung und das spätere Umkleben von Brackets in Kauf genommen.

Das indirekte Klebverfahren wurde zur Verbesserung der Positionierungsgenauigkeit und zur Vereinfachung des Klebevorganges am Patienten eingeführt. Hierzu werden auf einem Situationsmodell die Brackets zunächst reversibel in der richtigen Position auf die Zähne geklebt. Hierfür werden zumeist wasserlösliche Klebstoffe verwendet. Dann erfolgt die Herstellung einer Übertragungsschablone, welche die zuvor festgelegte Bracketposition am Modell erfasst und „speichert“. In der Regel sind die Übertragungsschlüssel in der Weise mit den Brackets verbunden, dass eine korrekte intraorale Positionierung durch einfaches Aufsetzen der Übertragungsschlüssel auf die Zähne möglich ist. Verschiedene Übertragungsverfahren kommen heute in unterschiedlichen indirekten Bracket-Adhäsiv-Techniken zur Anwendung.

Die Übertragungsgenauigkeit wird im wesentlichen von den Eigenschaften des angewendeten Übertragungsverfahrens beeinflusst. Dies führt zu Übertragungsfehlern, deren Ermittlung die Voraussetzung für einen objektiven Vergleich von unterschiedlichen indirekten Klebverfahren darstellt.

Das Ziel dieser Arbeit war, ein Verfahren zu entwickeln, welches die Ermittlung der Übertragungsfehler von indirekten Klebverfahren ermöglicht, um tatsächliche verfahrenstechnische Verbesserungen zu identifizieren. Dies sollte anhand von zwei unterschiedlichen indirekten Klebverfahren dargestellt werden. Es sollten die Übertragungsfehler des indirekten Klebverfahrens mittels Tiefziehfolie nach *Thomas* und die Übertragungsfehler eines Set up tauglichen indirekten Klebverfahrens mittels Transferschlüsseln modifiziert nach *Drescher* ermittelt und in einem objektiven Vergleich einander gegenübergestellt werden.

## 2. LITERATURÜBERSICHT

### 2.1. Das Straight-Wire-Prinzip

Die Behandlung mit festsitzenden Apparaturen hat mit der Einführung des Straight-Wire-Prinzips nach *Lawrence F. Andrews* eine wichtige Modifikation erfahren. Ihm gelang es nach Vermessung von 120 Gebissen mit Idealokklusion [3], den Großteil der notwendigen Biegungen der Standard-Edgewise-Technik, welche in den Bogen zur korrekten Einstellung der Zähne eingebracht werden mussten, überflüssig werden zu lassen. Die Informationen der ersten, zweiten und dritten Ordnung wurden in die Gestaltung der Brackets einbezogen [4]. So entstand nach der Standard-Edgewise-Technik mit den Biegungen der ersten, zweiten und dritten Ordnung die Straight-Wire-Technik, die größtenteils ohne diese Biegungen auskommt (s. Abb. 1).

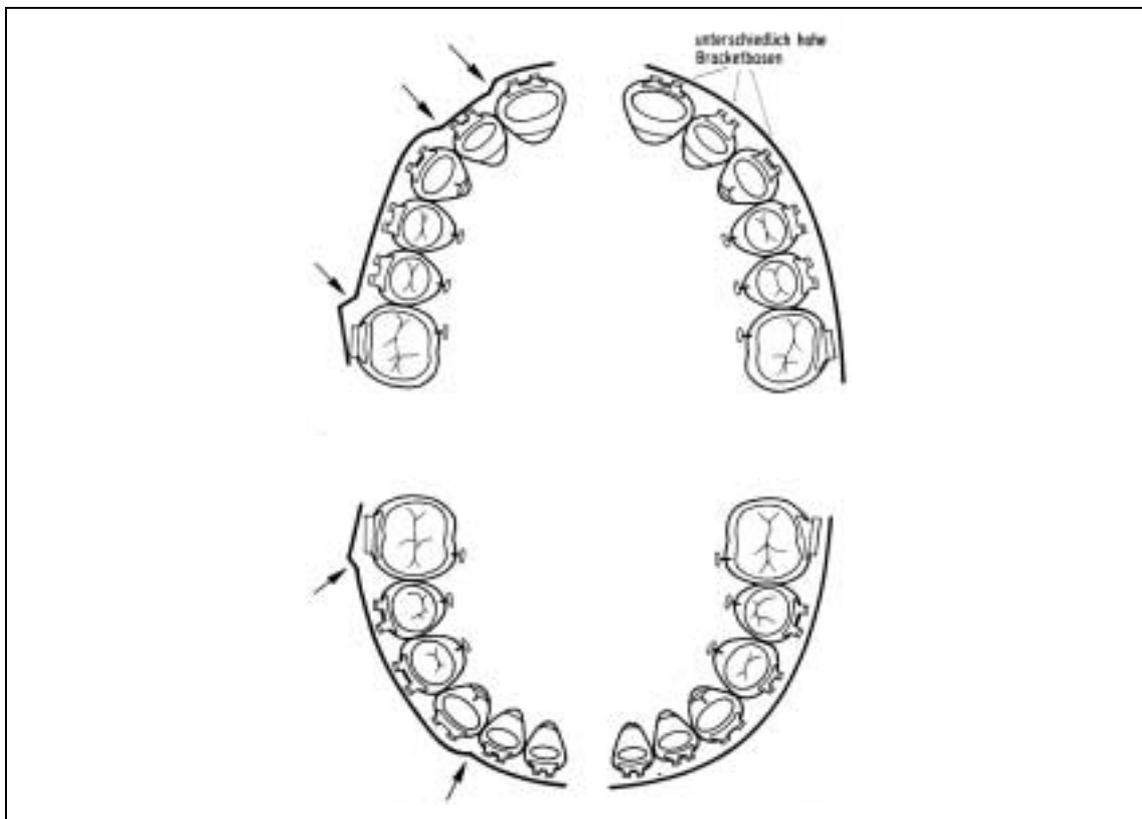


Abb. 1: Idealbogen: Standard-Edgewise vs. Straight-Wire (nach [4])

Die Biegungen der ersten Ordnung für die Einstellung der Zähne in orovestibulärer Richtung wurden durch Variation der Bracketbasenhöhen ersetzt. So weisen beispielsweise Brackets für seitliche Schneidezähne des Oberkiefers eine höhere Basis auf als die Brackets für die mittleren Schneidezähne [4] (s. Abb. 2 a).

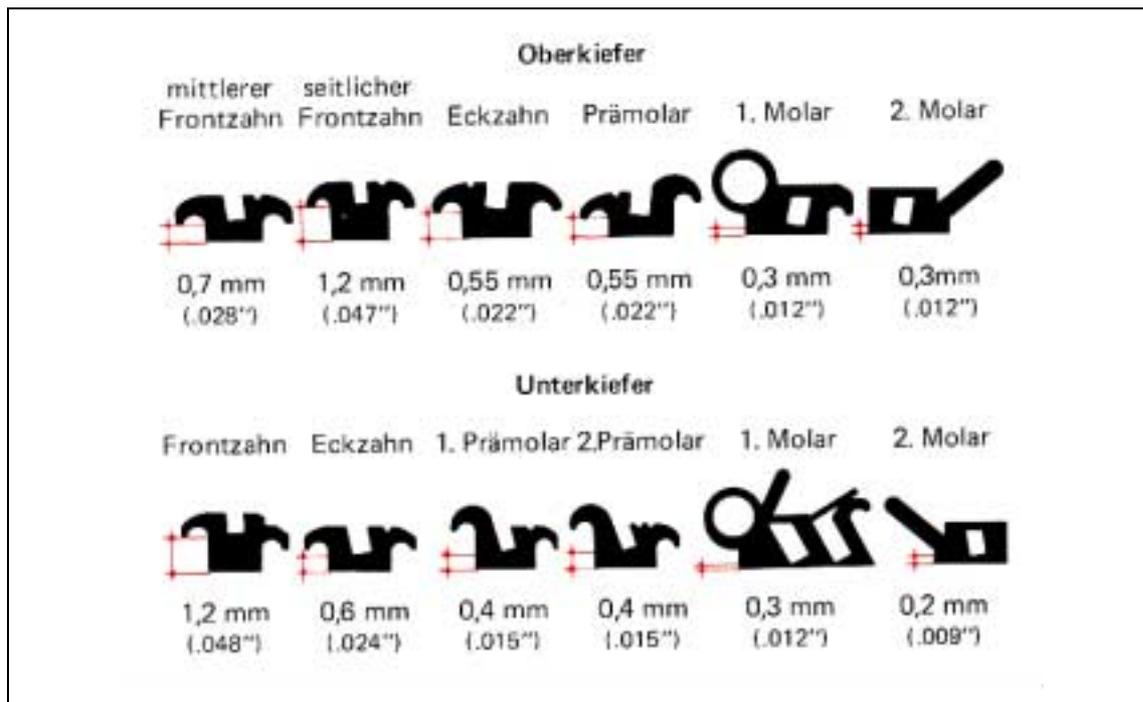


Abb. 2 a: Unterschiedliche Höhen der Bracketbasen als Elemente erster Ordnung (In \ Out) (aus [34]).

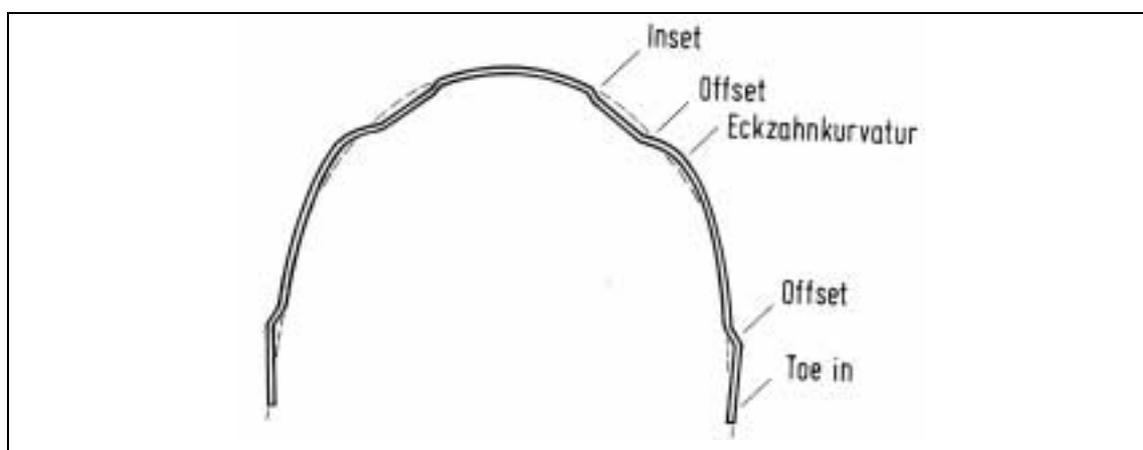


Abb. 2 b: Biegungen erster Ordnung im Standard-Edgewise-Bogen (aus [34])

Die Biegungen der zweiten Ordnung sind in Form von unterschiedlichen Angulationen der Bracketslots in mesio-distaler Richtung eingearbeitet (s. Abb. 3 a). In der Standard-Edgewise-Technik werden mit artistischen Biegungen (Artistics) die Angulationen der Frontzähne eingestellt (s. Abb. 3 b).

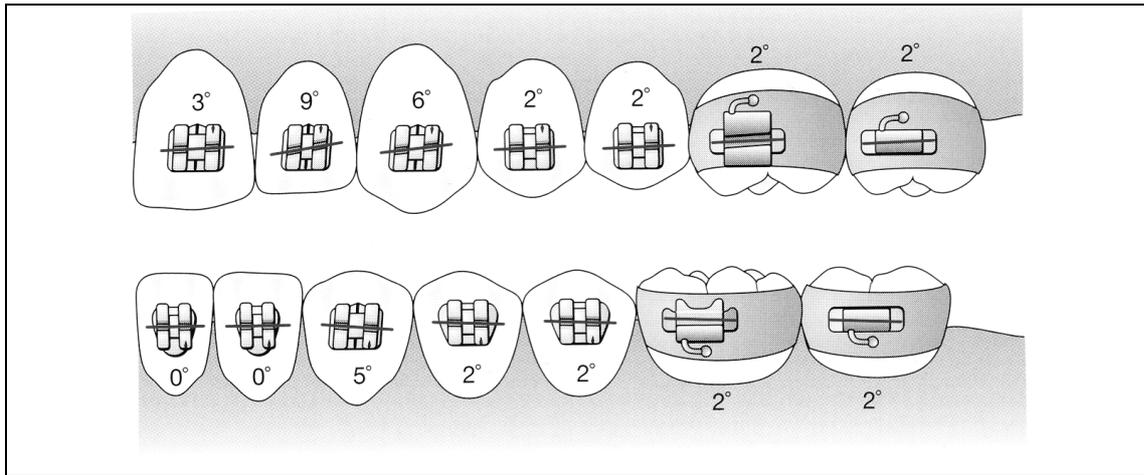


Abb. 3 a: Angulation des Slots als Element zweiter Ordnung (Tip) (aus [14])

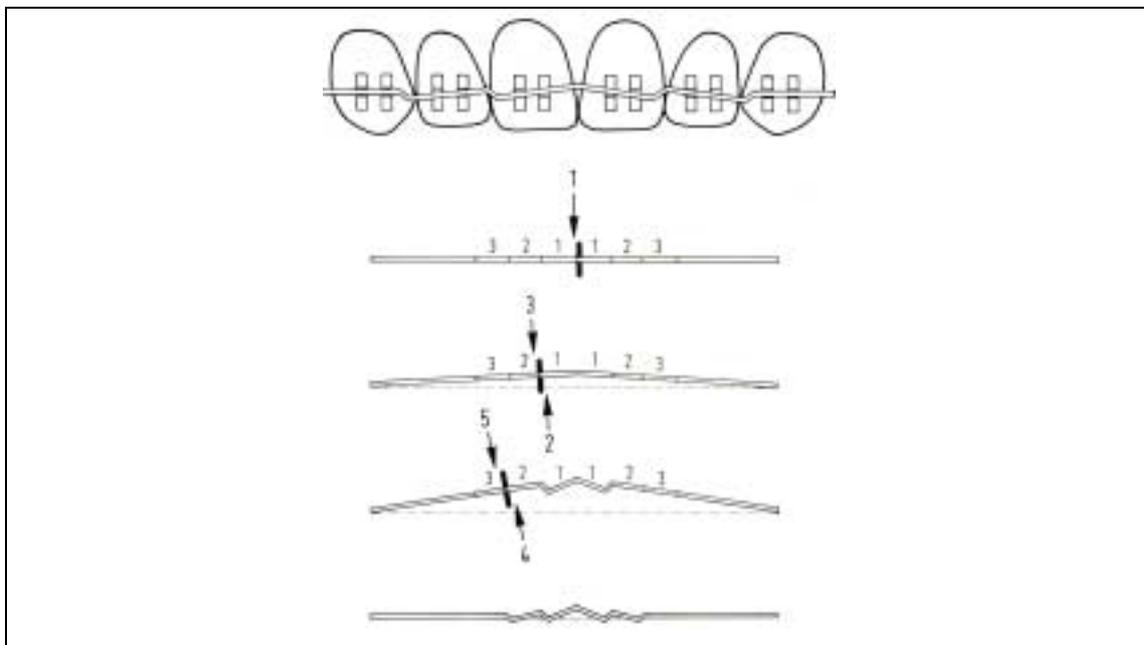


Abb. 3 b: Biegungen zweiter Ordnung zur Einstellung der Frontzähne in der Standard-Edgewise-Technik (Artistics) (aus [34])

Die Biegungen der dritten Ordnung sind durch Neigungen der Slotebene in orovestibulärer Richtung in die Brackets eingearbeitet (s. Abb. 4a). Dies soll Biegungen zur Torsion des Drahtbogens überflüssig machen (s. Abb. 4b). Bezogen auf die resultierende Zahnbewegung wird der eingestellte Torque nach oralem / bukkalem Wurzeltorque und oralem / bukkalem Kronentorque unterschieden (s. Abb. 4c)

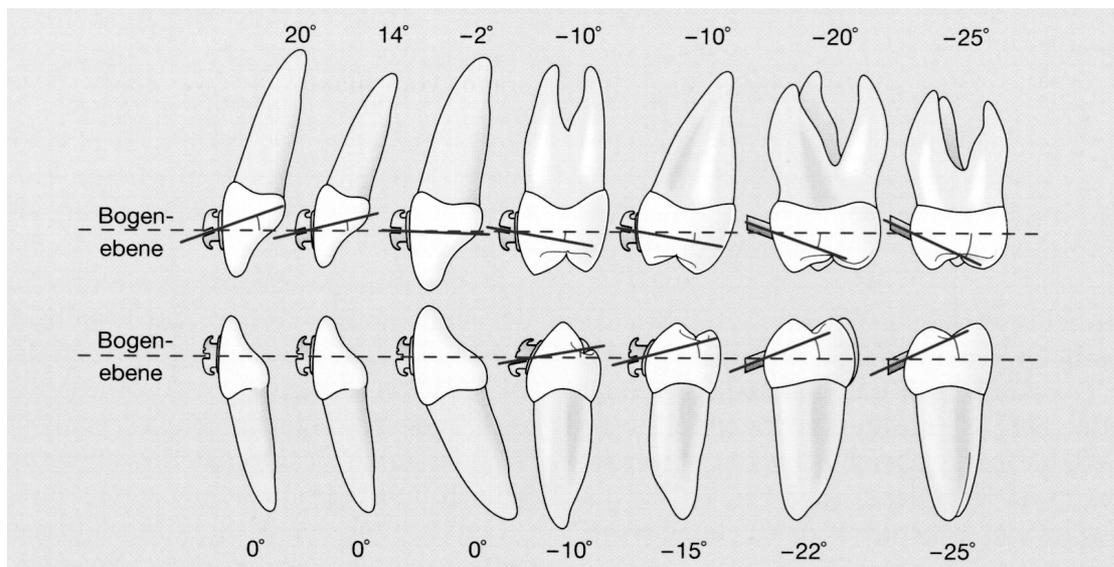


Abb. 4a: Neigung der Slotebene als Element dritter Ordnung (Torque) (aus [14])

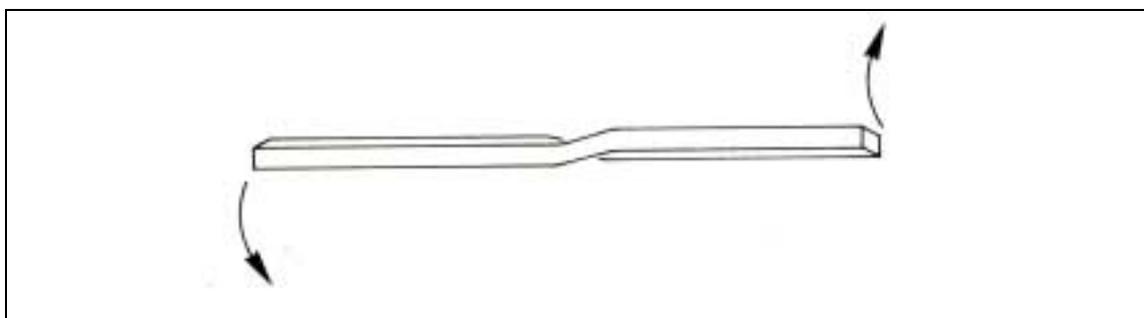


Abb. 4b: Biegung dritter Ordnung (Torque) (aus [34])

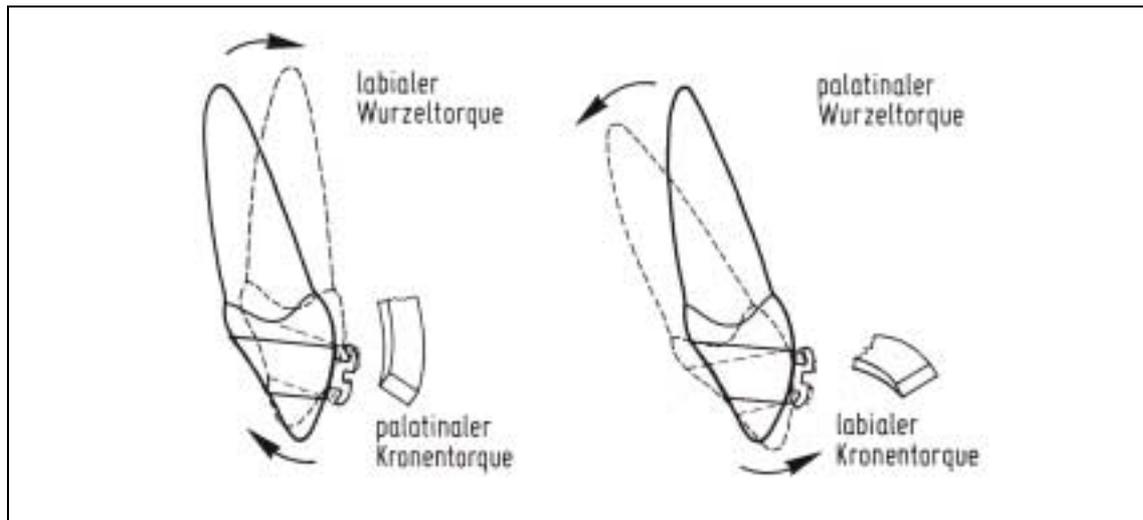


Abb. 4c: Torquewirkung zur Einstellung eines oberen Schneidezahnes (aus [34])

## 2.2. Bracketpositionierung

Aufgrund der Wertevorgaben, die in die Brackets eingearbeitet sind, werden diese Apparaturen auch als vorprogrammierte Bracket-Apparaturen bezeichnet. Hierbei spielt die exakte Positionierung der Brackets auf den Zähnen eine besonders wichtige Rolle, da sich die eingearbeiteten Werte erst dann wie gewünscht auf die Zahnstellung übertragen, wenn die Brackets auf den Bezugspunkt der Zahnoberfläche positioniert werden, an dem diese Werte gemessen oder festgelegt wurden.

*Andrews* hat bei der Untersuchung der Gebisse mit Idealokklusion herausgestellt, dass alle Zähne - mit Ausnahme der Schneidezähne des Unterkiefers - nach mesial anguliert sind. Dieser Winkel wird zwischen einer Senkrechten auf der Okklusionsebene und der Kronenlängsachse gebildet. Des weiteren hat er bei der Untersuchung der Zahnkroneninklination (Elemente dritter Ordnung), diese als einen Winkel bestimmt, der zwischen einer Tangente und einer Senkrechten zur Okklusionsebene gebildet wird. Die Tangente wird auf halber Höhe der Kronenlängsachse an die faciale Kurvatur des Zahnes angelegt [3] (s. Abb. 5).

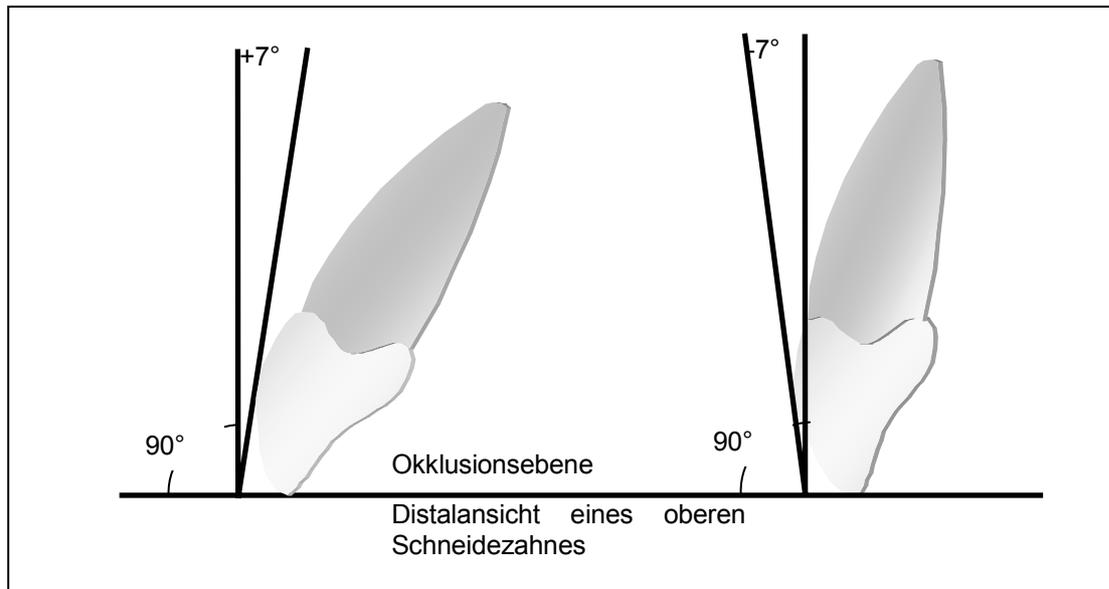


Abb. 5: Inklination eines oberen Inzisivus. Winkel der Kroneninklination resultierend zwischen der Senkrechten auf der Okklusionsebene und einer Tangente zur halben Kronenhöhe der labialen Kronenfläche (nach [3]).

Andrews nahm bei der Ermittlung seiner Werte für die korrekte Zahnausrichtung auf die halbe Kronenhöhe Bezug. Er bezeichnete diesen Punkt als LA-Punkt [4]. Die Brackets seien mit ihren Basismittelpunkten auf den LA-Punkt zu positionieren, um eine exakte Übertragung der Bracketinformationen auf die Zähne zu gewährleisten (s. Abb. 6 und 7). Bei Molaren verläuft die Kronenlängsachse durch die mesio-bukkale Furche (s. Abb. 8).

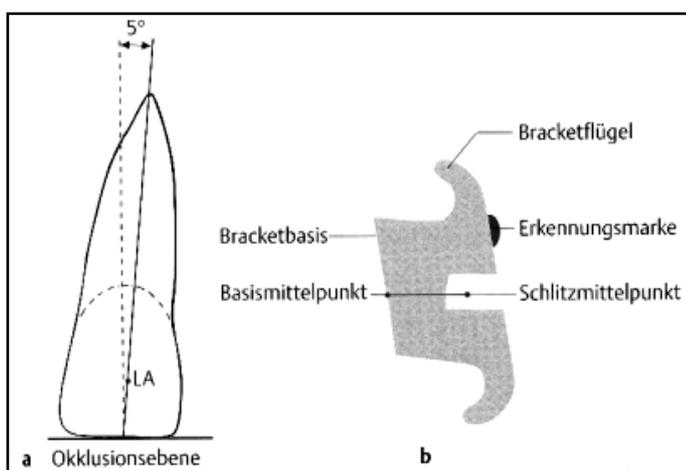


Abb. 6: Platzierung eines Brackets auf den LA-Punkt: Basismittelpunkt und die Mitte der Kronenlängsachse müssen zur Deckung kommen. Bei Schneidezähnen verläuft die Kronenlängsachse nicht senkrecht zur Schneidekante (aus [34]).

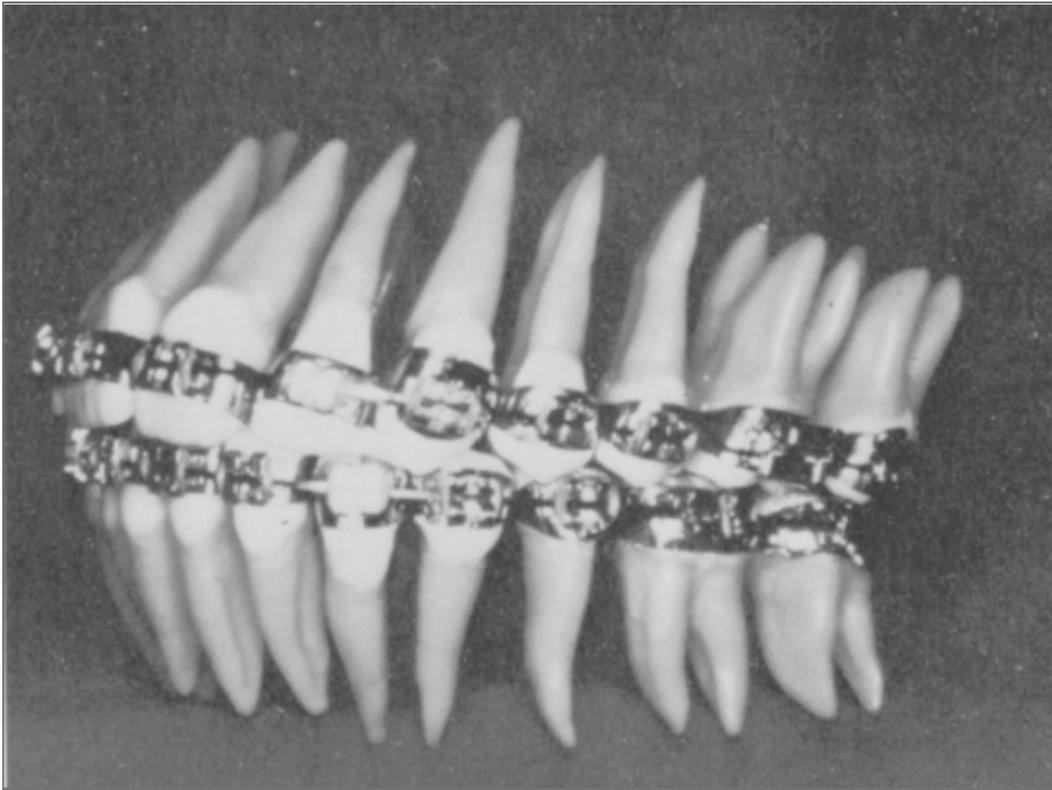


Abb. 7: Korrekte Bracketposition an allen Zähnen am geraden Bogen führt zur korrekten Einstellung der Zähne beider Zahnbögen (aus [33]).

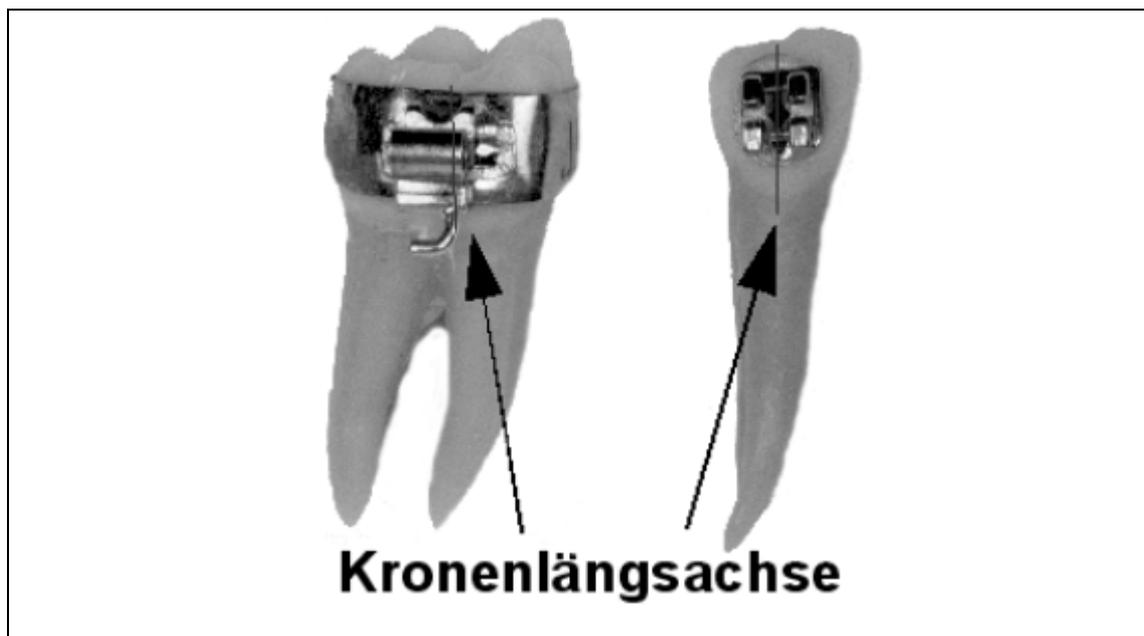


Abb. 8: Bei den Molaren verläuft die Kronenlängsachse durch die mesio-bukkale Furche zwischen dem mesialen und dem bukkalen Höcker (nach [4]).

Eine weitere effiziente Methode der Bracketplatzierung gibt für jeden Zahn einen definierten Abstand von der Okklusionsebene und Inzisalkante vor. Dies ermöglicht eine korrekte Bracketpositionierung, ohne dass die Gesamtlänge der Kronenlängsachse zur Bestimmung deren Mitte abgeschätzt werden muss. Unter Berücksichtigung der morphologischen Charakteristika der Eckzähne des Ober- und Unterkiefers und der seitlichen Schneidezähne des Oberkiefers unterscheidet sich deren vertikale Positionierungshöhe um +/- 0,5 mm (s.Abb.9) (*Schmuth et al* [34]).

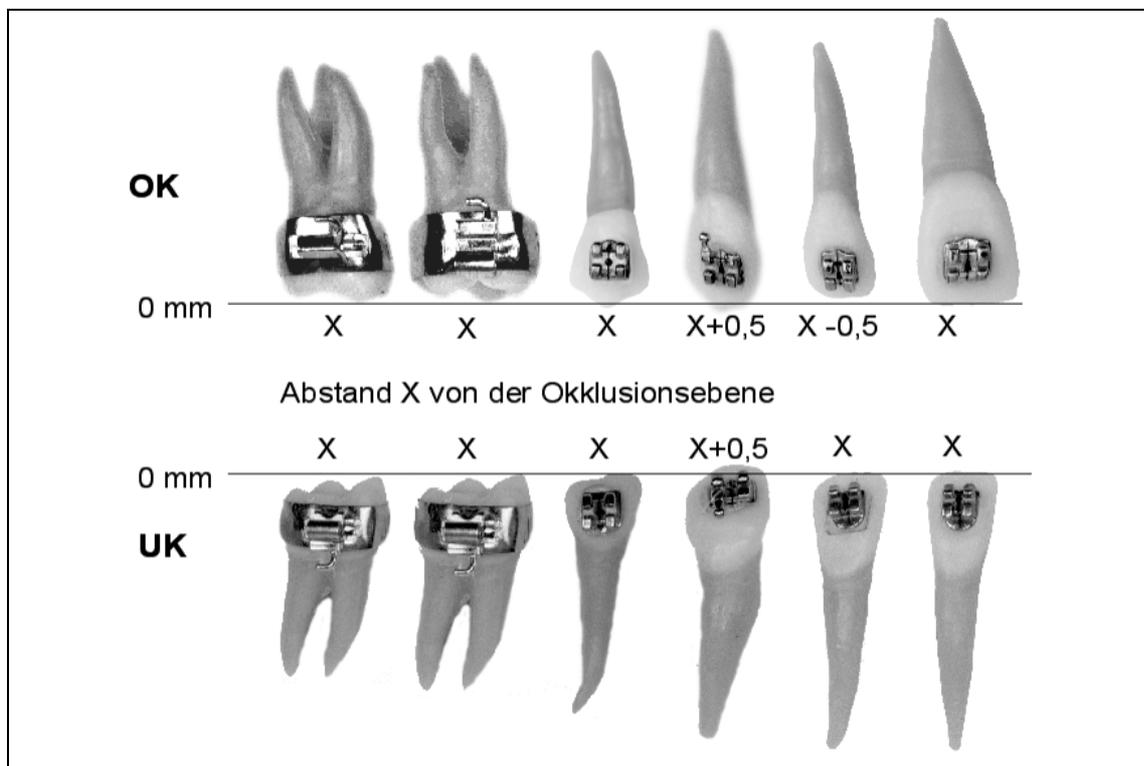


Abb. 9: Bracketpositionierung nach einem Abstand X von der Okklusionsebene (nach [34])

### 2.3. Die direkte Bracket-Adhäsiv-Technik

Bei der direkten Bracket-Adhäsiv-Technik klebt der Behandler die Brackets in einem einzeitigen Vorgang mittels Säure-Ätz-Technik direkt auf die Zähne des Patienten. Die Ausrichtung der vertikalen Höhe erfolgt entweder nach dem LA-Punkt oder nach einem Abstand von der Okkusalfläche bzw. der Inzisalkante. Im letzteren Fall hat sich die Verwendung von Messlehren – insbesondere für den ungeübten Behandler – bewährt. Solche Messlehren erlauben das Aufbringen einer Bleistiftmarkierung auf den angeätzten Zahnschmelz, welche die Sollposition des okklusalen bzw. inzisalen Bracketbasenrandes vorgibt. Diese Markierung wird dann bei der Bracketentfernung im Rahmen der Politur entfernt (*Schmuth et al* [34]). Die weitere Ausrichtung der Brackets erfolgt durch parallele Ausrichtung der Bracketlängsachse mit der Kronenlängsachse und mittiges Aufsetzen in mesio-distaler Richtung auf den Zahn. Eine möglichst flächige Anlagerung der konfektionierten Bracketbasen an die Zahnoberfläche wird angestrebt (*Brandt* [6]). Zur Ermöglichung einer optimalen Hygiene sollten anfallende Überschüsse entfernt werden (*Newman* [29]). *Garn* [10] empfahl die Verwendung von lichthärtenden Kompositkunststoffen, da der Behandler die Möglichkeit habe, erst die Überschüsse zu entfernen und dann die Aushärtung des Kunststoffes vorzunehmen. Jedoch kam *Trimpeneers und Dermaut* [40] in einer Studie zu dem Schluss, dass autokatalytisch aushärtende Kompositkunststoffe eine geringere Verlustrate und einen höheren Haftverbund aufweisen als lichthärtende Kunststoffe. *Hablutzel* [13] empfahl die Entfernung von Adhäsivüberschüssen mittels Skalpell. *McAlarney und Brenn* [23] empfahlen, die Brackets mit einer schon vorgehärteten Kompositbasis vorzufabrikieren, um den Haftverbund im Gegensatz zum konventionellen direkten Kleben zu erhöhen.

### 2.4. Die indirekte Bracket-Adhäsiv-Technik

Die indirekte Klebemethode ist durch ein zweizeitiges Vorgehen gekennzeichnet, welches mit der labortechnischen Herstellung einer Klebeschablone einhergeht. Ziel einer ersten Sitzung ist die Gewinnung eines

Situationsmodelles mittels Abformung. Im nächsten Schritt werden die Brackets in ihrer Idealposition temporär auf die Modelle geklebt. Anhand der so vorbereiteten Modelle werden dann Übertragungsschablonen angefertigt. In diesen sind die Brackets in der zuvor eingestellten Position „gespeichert“ und dienen in der zweiten Sitzung als Klebeschablonen, die es dem Behandler ermöglichen, die Brackets im Mund durch einfaches Aufsetzen auf die Zähne zu positionieren.

#### 2.4.1. Die nicht Set up taugliche indirekte Bracket-Adhäsiv-Technik

Bei den nicht Set up tauglichen indirekten Klebverfahren werden die Klebeschablonen mit Abformmaterialien wie Optosil<sup>\*</sup>, Bondosil<sup>\*\*</sup> (*Simmons* [37], *Moin und Dogon*. [28]); aus Kunststoff (*Silvermann et al* [35], *Newman* [29]) oder aus einer Tiefziehfolie (*Thomas* [39]) angefertigt. Die Tiefziehfolien sind transparent und ermöglichen dem Behandler bei der Bracketpositionierung eine ungefähre visuelle Kontrolle. Die Schablonen ermöglichen das Bekleben von allen Zähnen eines Kiefers, sie können jedoch auch nach den Wünschen des Behandlers in Zahngruppen zerteilt werden (*McLaughlin* [24]).

Zur Verbesserung dieser Verfahren wurde die Verwendung von lichthärtenden Kunststoffen bei transparenten Klebeschablonen (*Kasrovi et al* [19], *Read* [31]) und der Einsatz einer speziell geformten Lampe zu gleichmäßigeren Kunststofffaushärtung (*Silverman und Cohen* [36]) eingeführt. Weite Optimierungen sollten Modifikationen der verwendeten Kleber zur temporären Fixierung der Brackets auf den Situationsmodellen schaffen. Diese sollten die Brackets sicher fixieren und möglichst rückstandsfrei zu entfernen sein. *Simmons* [37] empfahl die Verwendung von erhitztem Karamellzucker. *Moin* [28] schilderte die Verwendung von Klebewachs. *Sondi* [38] stellte ein Adhäsivsystem vor, welches für die speziellen Belange der indirekten Klebetechnik - insbesondere der temporären Fixierung der Brackets auf den Gipsmodellen - entwickelt wurde. Als nachteilig war anzusehen, dass die

---

<sup>\*</sup> Unitek Company, Calif.

<sup>\*\*</sup> Orthobond company, N.J.

Entfernung von Kunststoffüberschüssen und die exakte Kontrolle der Bracketposition erst nach Entfernung der Klebeschablone und somit nach Erhärtung des Klebstoffes möglich sei. *Reichheld et al* [32] empfahlen deshalb die Verwendung von konfektionierten Setzhilfen zur Festlegung der vertikalen Klebehöhe. Diese konnten in die Bracketslots einligiert werden und waren mit einem rechtwinkligen Ärmchen als Anschlag für die Okklusalfäche bzw. Inzisalkante versehen. Nach temporärer Fixierung der Brackets erfolgte die Verschlüsselung der Position über einen hufeisenförmigen Wulst aus autopolymerisierendem Kunststoff, welche auf den Zahnbogen gesetzt wurde und alle Setzhilfen okkusal und inzisal erfasste. So war es dem Behandler möglich, während des Klebens der Brackets ihre korrekte Position zu prüfen und anfallende Überschüsse direkt zu entfernen (*Maino et al* [22]). Dies war bis dahin ein Vorteil der direkten Bracket-Adhäsiv-Technik (*Zachrisson und Brobakken* [43]). In einem ähnlichen Verfahren empfahl *Kasrovi* [19] die Verwendung von lighthärtenden Kompositkunststoffen, um möglichst optimale hygienische Bedingungen nach dem Klebevorgang zu erreichen, indem der Zeitpunkt der Aushärtung vom Behandler bestimmbar sei und somit Verarbeitungszeit für die Überschussentfernung bliebe.

Das Prinzip der Straight-Wire-Technik zielt auf eine optimale Einstellung der Zähne mit dem standardmäßigen Eingliedern eines „geraden“ Bogen ab. Jedoch können mit konfektionierten Bracketbasen nicht die Variationen in der Kronenmorphologie berücksichtigt werden. Aufgrund von anatomisch-morphologischen Unterschieden der Zahnkronen können Inkongruenzen in der Passung zwischen der Basisfläche der präadjustierten Brackets und der Zahnoberfläche resultieren, selbst wenn man von der korrekten Positionierung der Brackets ausgeht. Dies wiederum führt zu veränderten Wertevorgaben für die betroffenen Zähne und zu ungewünschten Zahnfehlstellungen (*Dellinger* [8], *Vardimon* [42]). Deshalb sind in der Endphase der Behandlung kompensatorische Biegungen der ersten, zweiten und dritten Ordnung zur korrekten Okklusionseinstellung notwendig. Soll die Behandlung mit einem optimalen Ergebnis im eigentlichen Sinn der Straight-wire-Apparatur abschließen, muss die individuelle Kronenform berücksichtigt werden (*Germane et al* [12]). Um diesem Problem zu begegnen und den Brackets zusätzlich individuelle und therapeutische Informationen eingeben zu können,

wurde die TARG (Torque and Angulation Reference Gauge) und die Slotmaschine von *Creekmore und Kunik* [7] eingeführt.

Bei der TARG-Methode erfolgt die Ausrichtung jedes Zahnes mittels Torquelehre nach der Okklusionsebene. Hierfür befindet sich das Modell auf einem frei beweglichen Sockel, welcher nach Einstellung der gewünschten Torquewerte verriegelt wird. Somit erfolgt die Ausrichtung zur Okklusionsebene ohne die Erstellung eines Set up. Die Brackets werden mit Kompositkunststoff in einem festgelegten vertikalen Abstand zur Inzisalkante und mittig auf die isolierten Gipszähne geklebt.

Bei der Slotmaschine wird ebenfalls bei der temporären Klebung mit Kompositkunststoff auf den Situationsmodellen die Bracketbasis individualisiert. Jedes Bracket wird in seinem Slot in der Slotmaschine gehalten und einzeln an die Gipsmodellzähne geführt. Mit Positionierungslehren wird nun die korrekte Rotation, Inklination und Angulation der einzelnen Zähne mit speziellen Positionierungslehren eingestellt. Sind die gewünschten Werte für den Zahn erreicht, wird die Bracketbasis mit Kompositkunststoff beschickt und das Modell so weit wie möglich an das Bracket herangeführt. Der verbleibende Zwischenraum wird durch den ausgehärteten Kunststoff aufgefüllt. Die Individualisierung der Bracketbasis gleicht die letzten Diskrepanzen zwischen der konfektionierten Basis der voreingestellten Brackets und der gewünschten Zahnstellung aus. Die Übertragung der Brackets auf die Zähne macht wiederum die Anfertigung einer Klebeschablone notwendig.

Eine weitere Möglichkeit therapeutische und individuelle Werte oder Zahnstellungen durch die Anfertigung individueller Bracketbasen an einem formatfüllenden und geraden Bogen einzustellen, bietet die indirekte Bracket-Adhäsiv-Technik mittels therapeutischem Set up. Im Prinzip ersetzt die Anfertigung eines Set up die Verwendung der TARG oder der Slotmaschine, da hierbei die Zähne in Wachs nach dem Therapieziel aufgestellt werden und es keiner Positionierungslehren und keines freibeweglichen Sockels zur Halterung der Modelle bedarf.

#### 2.4.2. Die Set up taugliche indirekte Bracket-Adhäsiv-Technik

Ein therapeutisches Set up Modell ist ein Sägemodell eines Situationsmodells. Dieses wird durch Dublieren des Situationsmodells hergestellt, da dieses später benötigt wird. Das Sägemodell ermöglicht die Gestaltung der erwünschten Zahnbogenform, indem alle Gipszähne in Wachs auf der Kieferbasis in der therapeutischen Zahnstellung aufgestellt werden. Als diagnostisches Set up gibt es zusätzlich dem Behandler Aufschluss über die Platzbilanz, das Ausmaß der orthodontischen Zahnbewegung, den Schwierigkeitsgrad der Behandlung und die voraussichtliche Okklusionseinstellung bei Diskrepanz der Zahnbreiten (*Vardimon* [41], *Drescher et al* [10]). Nachdem die Zähne dem angestrebten Therapieziel entsprechend aufgestellt worden sind, erfolgt deren temporäre Beklebung mit Brackets. Damit die gewünschten Zahnstellungen auch in der Behandlung umgesetzt werden können, müssen alle Brackets zuvor an einen geraden Bogen in der Bracketslotdimension einlegiert werden. Auf diese Weise befinden sich dann später während der Behandlung bei der Eingliederung eines slotfüllenden Bogens alle Zähne in der zuvor am Modell aufgestellten Position. Nachdem alle Brackets auf die Zähne geklebt wurden, wird im nächsten Schritt der Bogen aus den geklebten Brackets entfernt.

Für die Herstellung der Klebeschablonen müssen zunächst die Brackets von allen Zähnen des Set up Modells auf das Situationsmodell übertragen werden. Dies setzt die Übertragung eines jeden einzelnen Brackets in der zuvor exakt bestimmten Position mitsamt einem Positionierungsschlüssel auf das Situationsmodell voraus. Somit ist eine Grundvoraussetzung beim indirekten Klebeverfahren nach einem Set up Modell, dass die Übertragungsschlüssel für jeden Zahn einzeln herstellbar sind und zudem die Bracketposition für diesen reproduzierbar erfassen. Die einzelzahnbezogene Verschlüsselung ist in diesem Verfahren eine *conditio sine qua non*.

Eine Tiefziehfolie leistet dies beispielsweise nicht. Würde diese über das Set up Modell gezogen, wäre ein Übertragung auf das Situationsmodell bzw. den Patienten unmöglich.

Im letzten Laborarbeitsschritt werden auf dem Situationsmodell die Übertragungsschlüssel der einzelnen Zähne zu Klebeschablonen zusammengefasst, um am Patienten mehrere Zähne zugleich bekleben zu können (*Hoffman [17], Jost-Brinkmann [18]*).

Die Übertragungsschlüssel für die einzelnen Zähne werden aufbewahrt und ermöglichen eine exakte Repositionierung von Brackets bei Verlust, wodurch es nicht zu Behandlungsverzögerungen kommt, da die Bogenfolge nicht beeinflusst wird.

Sowohl die TARG und Slotmaschine als auch das therapeutische Set up finden in verstärktem Maß in der Lingualtechnik Anwendung, da die Variabilität der oralen Zahnflächen ausgeprägter ist als dies bei den vestibulären Zahnflächen der Fall ist. Hier sind die zu beklebenden Oberflächen kleiner und insbesondere im Frontzahnbereich finden sich Übergänge von konvexen in konkave Oberflächenstrukturen (*Aguirre [2]*). Die Anfertigung von individualisierten Bracketbasen ist in der Lingualtechnik ein routinemäßiger Vorgang (*Diedrich [9]*).

## 2.5. Positionierungsfehler und ihre Konsequenzen

Eine Hauptfehlerquelle in der Bracketpositionierung ist die Einschätzung der Kronenmorphologie durch den Behandler. Sowohl bei abradieren oder im Durchbruch befindlichen Zähnen als auch bei Gingivahyperplasien ist die Einschätzung der Kronenlängsachse erschwert. Hier bietet die Positionierung anhand eines festen Abstandes von der Inzisalkante oder Okklusalfäche Vorteile, jedoch liegt hier insbesondere bei der direkten Klebetechnik die Hauptproblematik. Zu den Zahnfehlstellungen, welche an sich schon die Sicht auf den Zahn erschweren, kommt noch die räumliche Enge der Mundhöhle und die damit verbundene manuelle Einschränkung des Behandlers hinzu. Der Behandler ist angehalten, eine Sichtkontrolle über den zahnärztlichen Mundspiegel bestmöglich zu vollziehen (*McLaughlin und Bennett [25]*).

Positionierungsfehler führen gerade in der Straight-Wire-Behandlungstechnik automatisch zu unerwünschten Zahnbewegungen. Eine Positionierung des Brackets zu weit mesial oder distal führt aufgrund der Kronenkurvatur in mesio-distaler Richtung zu ungewollten Rotationen um die Zahnängsachse (s. Abb. 10). Ein nach distal versetztes Bracket hat eine Mesialrotation des Zahnes zur Folge. Umgekehrt kommt es zu einer Distalrotation des Zahnes.

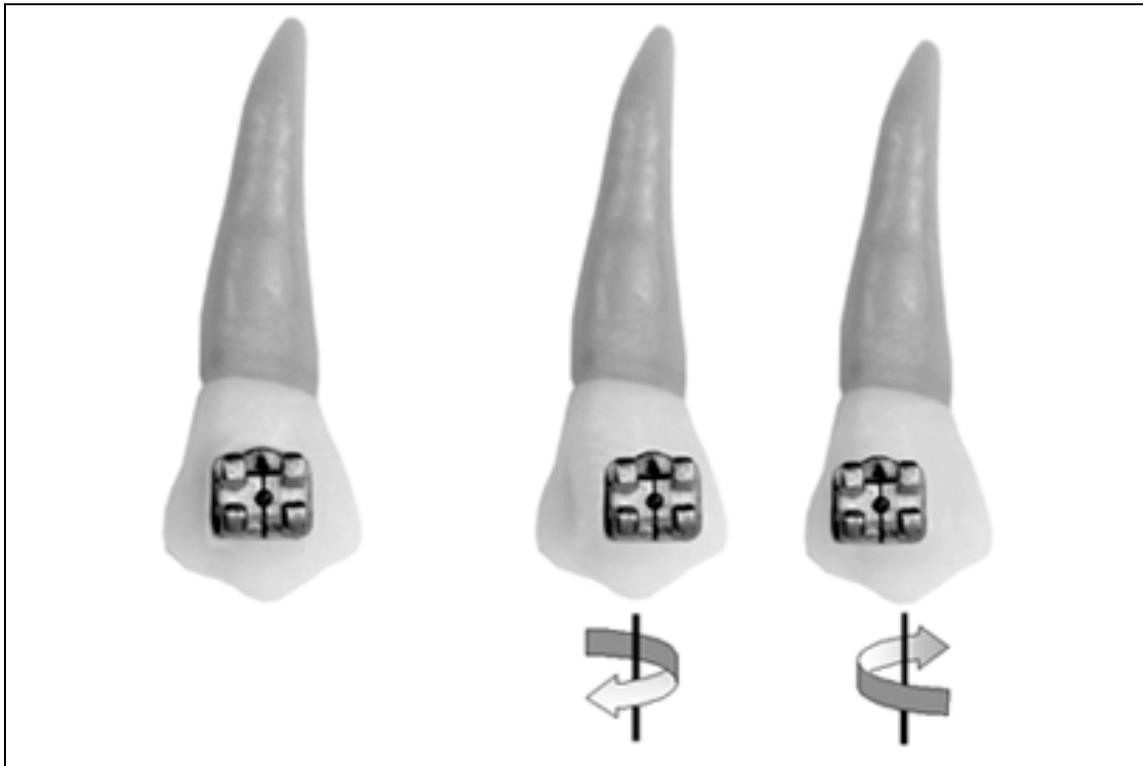


Abb. 10: Mesio-distaler Positionierungsfehler

Ebenso bewirken Angulationsfehler ungewollte Zahnkippen (s. Abb. 11). Ein nach mesial fehlanguliertes Bracket hat eine Distalkippung des Zahnes zur Folge. Umgekehrt kommt es zu einer Mesialkippen des Zahnes.

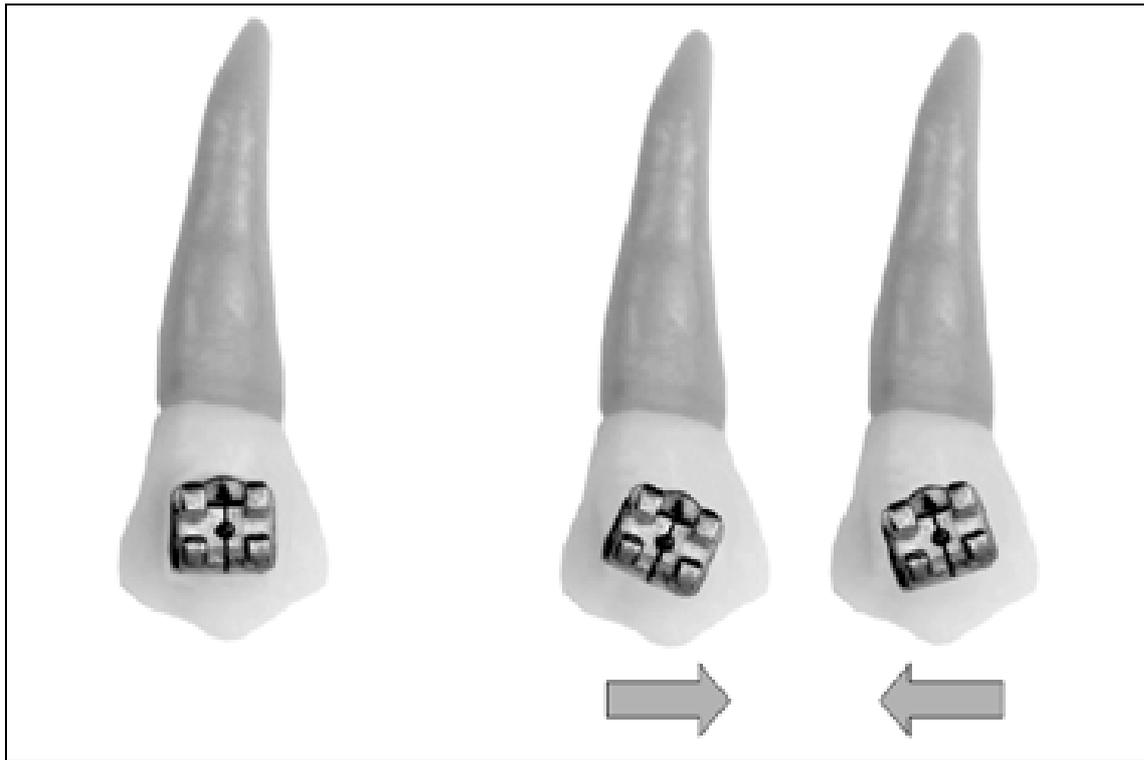


Abb. 11: Angulationsfehler

Positionierungsfehler in der Vertikalen bewirken unerwünschte Intrusions- bzw. Extrusionsbewegungen (s. Abb. 12). Zu weit inzisal positionierte Brackets bewirken Intrusionsbewegungen der Zähne. Umgekehrt kommt es zu einer Extrusionsbewegung des Zahnes. Des weiteren bewirkt die Kronenkurvatur in okkluso-gingivaler Richtung bei Fehlpositionierung eine veränderte Torquewirkung auf den Zahn (*Dellinger* [8], *Germane* [12], *Vardimon* [42]). *Meyer und Nelson* [26] zeigten, dass ein vertikaler Positionierungsfehler von 3 mm an einem Prämolaren eine um 15° veränderte Torquewirkung zur Folge haben kann. Als weitere Nebenwirkung kommt es zu einer veränderten „in/out“ Einstellung von 0,04 mm für diesen Zahn.

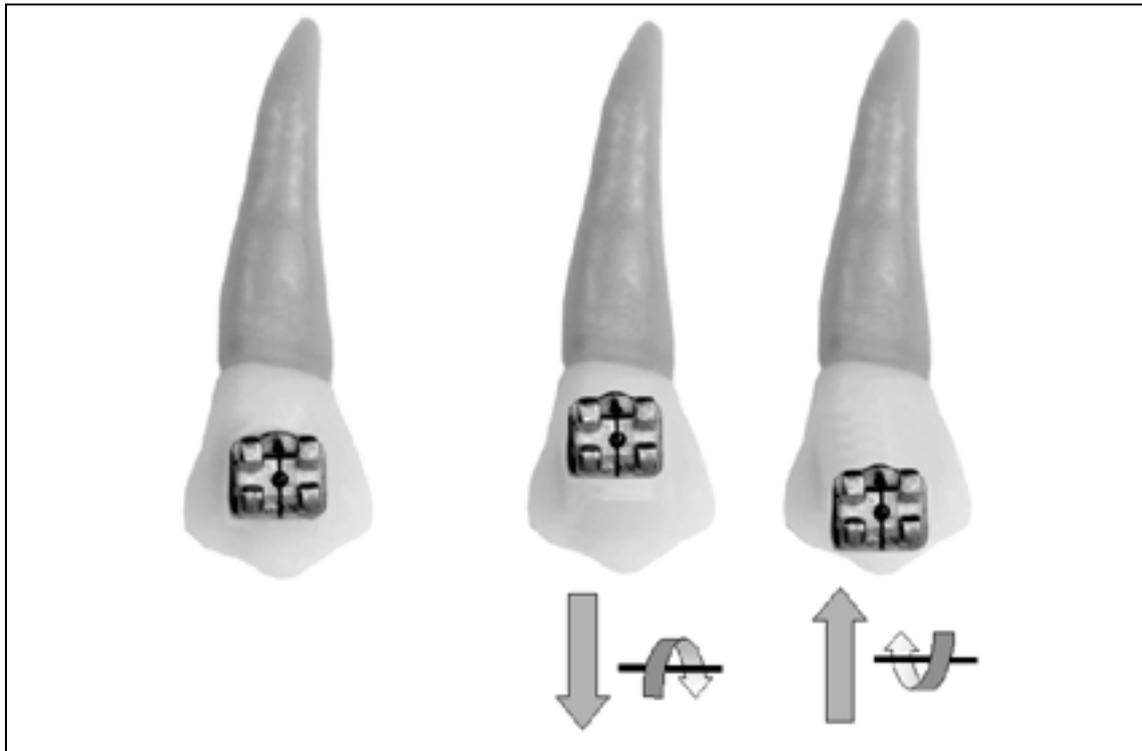


Abb. 12: Vertikaler Positionierungsfehler

Das Umkleben von Brackets bedeutet einen Rückschritt bzw. Umweg im Behandlungsablauf. Effizientes Kleben der Brackets ist eine wünschenswerte Voraussetzung für einen zügigen Therapieverlauf. Die höhere Positionierungsgenauigkeit (*Koo et al* [20]) und die Verkürzung des eigentlichen Klebevorganges (*Aguirre et al* [1], *Zachrisson und Brobakken* [43]) liegt dabei sowohl im Interesse des Behandlers als auch des Patienten. Diese Möglichkeiten bietet das indirekte Klebverfahren gerade für den ungeübten Behandler (*Milne et al* [27]). Die Positionierung am Arbeitsmodell ist ein sinnvolles Hilfsmittel, da der Behandler hier weder räumlich noch zeitlich eingeschränkt ist (*McLaughlin* [24]). Aufgrund der optimalen Übersicht über die morphologischen Verhältnisse des Kiefermodells sowie über die Zähne sind die Voraussetzungen für eine effizientere Bracketpositionierung gegeben (*Mahony* [21], *Thomas* [39]).

Hier seien nochmals die Vorteile, welche die Einführung der indirekten Klebetechnik brachte, aufgezählt:

- aufgrund der erhöhten Positionierungsgenauigkeit sind Korrekturen der geklebten Brackets weniger häufig notwendig,
- die Behandlungszeit am Patienten wird reduziert, da gleichzeitig mehrere Zähne beklebt werden können,
- ein Großteil der Behandlungszeit kann in das zahntechnische Labor verlagert werden,
- der Behandler hat optimalen Überblick und Zugang zu allen Zähnen. Dies ermöglicht ein effizienteres Positionieren der Brackets - auch nach therapeutisch unterschiedlichen Gesichtspunkten,
- reduzierte Bracketverlusten,
- höherer Patientenkomfort.

### 3. FRAGESTELLUNG

In der Diskussion um die Optimierung der direkten und der indirekten Bracket-Adhäsiv-Technik spielt unter anderem die Positionierungsgenauigkeit eine wesentliche Rolle. Die Überprüfung der Positionierungsgenauigkeit des direkten Klebverfahrens gelingt mit der Vermessung und dem Vergleich der Istposition der Brackets mit der Referenzposition einer idealen Klebposition (*Balut et al* [5]). Da die Art des Übertragungsverfahrens und der Klebeschablonen maßgeblich für die Genauigkeit eines indirekten Klebverfahrens ist, setzt eine objektive Untersuchung der Übertragungsgenauigkeit unterschiedlicher indirekter Klebverfahren den Vergleich zwischen der Sollposition auf dem Situationsmodell nach temporärer Fixierung und der Istposition nach erfolgter Klebung im Patientenmund voraus. Während des Transfers vom Situationsmodell auf die Zähne des Patienten kommt es zu Übertragungsfehlern, welche eine Diskrepanz zwischen der Sollposition auf dem Arbeitsmodell und der Istposition auf den Zähnen nach erfolgter Klebung verursachen. Eine mögliche Abweichung stellt ein verbreiteter Klebespalt dar, wenn das Bracket unzureichend an die Zahnfläche adaptiert wurde. Hierbei können sich Unterschnitte bilden, welche im schlechtesten Fall nicht mit Kunststoff ausgefüllt sind und sowohl zu einem schlechteren Haftverbund (*Hocevar und Vincent* [16]) als auch zu einem erhöhten Kariesrisiko führten. Die Vergrößerung des Klebespaltes bewirkt neben dem ungewollten Inset für den Zahn bei Rotationen des Brackets um die vertikale und mesiodistale Achse zusätzlich ungewünschte Rotations- und Inklinationseinstellungen. Bei mesiodistalen Übertragungsfehlern kommt es zu Rotationsfehlern und bei okklusogingivalen Übertragungsfehlern zu Intrusions- bzw. Extrusionbewegungen. Aufgrund der Kronenkrümmung kommt es hierbei zudem noch zu Inklinationsfehlern (*Germane* [12]). Eine Rotation des Brackets um eine orovestibuläre Achse führt zu Angulationsfehlern.

Die objektive Ermittlung der Übertragungsfehler würde die Schwächen eines indirekten Klebverfahrens, eine gewünschte Bracketposition exakt zu erfassen und im Patientenmund zu reproduzieren, aufzeigen.

Neben Studien, welche die indirekte mit der direkten Bracket-Adhäsiv-Technik vergleichen - beispielsweise in Bezug auf den Haftverbund (*Hocevar und Vincent* [16]) oder der Positionierungsgenauigkeit (*Koo et al* [20]) - sind dem Autor derzeit keine Veröffentlichungen bekannt, welche sich mit der Analyse der Übertragungsfehler bei indirekten Bracket-Adhäsiv-Techniken auseinandersetzen.

Die Aufgabe dieser Arbeit bestand darin, den Übertragungsfehler von zwei unterschiedlichen indirekten Klebverfahren zu identifizieren und diese einander gegenüberzustellen. Dies sollte einen objektiven Vergleich dieser indirekter Klebverfahren ermöglichen. Stellvertretend für die unterschiedlichen indirekten Verfahren wurde das Tiefziehfolienverfahren nach *Thomas* als nicht Set up taugliches Verfahren und eine Set up taugliche indirekte Bracket-Adhäsiv-Technik nach *Reichheld, Ritucci und Gianelly* modifiziert nach *Drescher* ausgewählt, um in dieser Arbeit einander gegenübergestellt zu werden. Im Rahmen dieser Studie sollte der Übertragungsfehler der Klebverfahren untersucht werden, weshalb für dieses indirekte Verfahren auf die Herstellung eines Set up-Modells verzichtet wurde. Wie oben erwähnt, dient dies der „therapeutischen“ Positionierungsoptimierung und war damit nicht Gegenstand dieser Arbeit. Hier sei nur auf die technische Möglichkeit, welche dieses indirekte Bracket-Adhäsiv-Verfahren bietet, hingewiesen.

## 4. MATERIAL UND METHODE

### 4.1. Vorstellung der hier gegenübergestellten indirekten Klebeverfahren

#### 4.1.1. Tiefziehfolienverfahren

Das heute häufig angewendete Tiefziehfolienverfahren wurde 1979 von *Thomas* [39] beschrieben. Nach Herstellung eines Situationsmodells werden die Brackets auf diesen positioniert und temporär geklebt. Anschließend erfolgt die Herstellung der Übertragungsschiene, indem eine Tiefziehfolie über das Modell gezogen wird (s. Abb. 13 a). Als Tiefziehfolie kam 1,5 mm starke Bioplast-Folien\* zur Anwendung. Die Herstellung der Tiefziehfolie erfolgte in einem Biostar-Gerät\* (s. Abb. 14). Die Verarbeitung der Folien wurde durch dieses Gerät elektronisch geregelt. Alle Folientypen und deren spezifische Verarbeitungstemperatur und Heizdauer waren durch ein Code - System in dem Gerät gespeichert. Dies garantiert eine konstante Verarbeitungsqualität. Die hier verwendete Folie wurde nach dem Code 162 verarbeitet. Hierbei wurde die Folie für 50 Sekunden bei 220 °C erhitzt und 60 Sekunden unter Druckluft abgekühlt. Die Tiefziehfolie wurde dann von dem Modell entfernt (s. Abb. 13 b) und die in ihr gefassten Brackets wurden gesäubert. Die Folie kann nach Belieben des Behandlers zurechtgeschnitten werden. In dieser Studie wurde die Folie unterhalb der Brackets eingekürzt und in drei Teile zerteilt. Zur Verbesserung der Handhabung erhielt man so eine Schiene zur Klebung des Frontzahnsegmentes vom Eckzahn der einen Seite, zum Eckzahn der anderen Seite und zwei Seitenzahnschablonen, welchen jeweils vom ersten Prämolaren bis zum ersten Molaren reichte. Die ersten Molaren wurden mit ihrer mesialen Hälfte gefasst, um eine möglichst großflächigere Abstützung für die Übertragungsschablone zu erreichen. Am Behandlungsstuhl müssen nach dem Konditionieren der Zähne die Brackets nur noch mit Adhäsiv versehen werden (s. Abb. 13 c). Durch Aufsetzen der Übertragungsschablone auf die Zähne werden die Bracket appliziert (s. Abb. 13 d). Nach Erhärtung des Adhäsivs wird die Folie vorsichtig von den Zähnen entfernt (s. Abb. 13 e).

---

\* Scheu Dental, Iserlohn

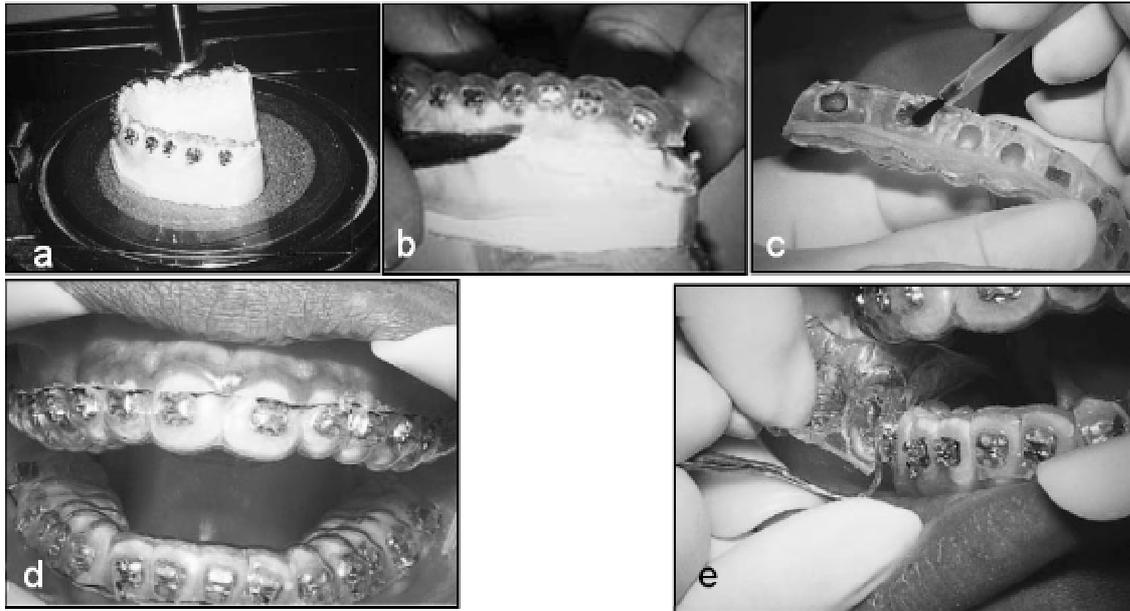


Abb. 13 a, b, c, d, e: Arbeitsschritte des indirekten Klebverfahrens mittels Tiefziehfolie nach *Thomas*. a: Herstellung der Folie im Biostar-Gerät b: Entfernung der Folie von dem Situationsmodell (Bracket sind gefasst) c: Zähne sind konditioniert; Brackets werden in der Klebeschablone mit Adhäsiv versehen d: Aufsetzen der Schiene und Applizieren der Brackets im Patientenmund e: Vorsichtiges Entfernen der Folie

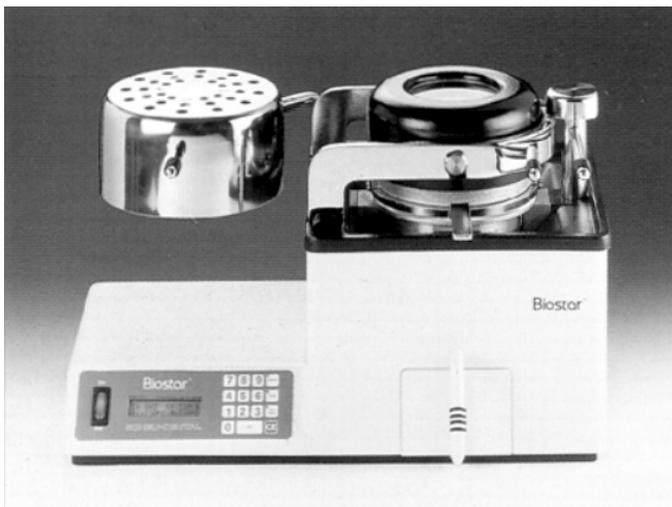


Abb. 14: Biostar-Gerät mit Code-System

#### 4.1.2. Transferschlüsselverfahren

Dieses Verfahren modifiziert nach *Drescher* verschlüsselt die Bracketposition einzelner Zähne mittels Transferschlüssel und bietet deshalb auch die Möglichkeit, die Bracketpositionierung anhand eines therapeutischen Set up vorzunehmen. Wenn nicht mit einem Set up gearbeitet wird, erfolgt die Bracketpositionierung auf dem Situationsmodell. Vor dem temporären Kleben auf den Situationsmodellen wurden in die Bracketslots jeweils Transferschlüssel einligiert (s. Abb. 15 a). Diese dienten nach der temporären Klebung der Brackets zur Verschlüsselung der Position, ähnlich den konfektionierten Bracket-Setzhilfen welche *Reichheld, Ritucci, Gianelly* [32] in ihrem Verfahren beschrieben. Die Transferschlüssel wurden aus einem geraden Stück 0,016“ Rundstahl und einem geraden Stück 0,016“ x 0,022“ Vierkantstahl hergestellt, indem sie in Form eines Kreuzes miteinander verschweißt wurden. Der Rundstahlanteil wurde mittels Gummiligatur in den Bracketslot einligiert, weshalb er so lang gestaltet wurde, dass er beidseits etwas über die Bracketflügel ragte. Der Vierkantstahlanteil wurde am gingivalen Ende eingekürzt, bis es etwas länger als die Bracketbasis war. Das okklusale bzw. inzisale Ende wurde so abgelängt, dass es bis über die Okklusalfäche bzw. Inzisalkante des Zahnes reichte. Hier wurden Retentionsbiegungen eingebracht, da dieser Anteil nach späterer Verschlüsselung in lichthärtendem Kunststoff gefasst war.

Nach temporärer Fixierung des mit dem Transferschlüssel versehenen Brackets auf dem Modell erfolgte die eigentliche Verschlüsselung mittels lichthärtendem Laborkunststoff Visio-Form\* auf der Okklusal- bzw. Inzisalfäche des Zahnes. Der Kunststoff bedeckte die Okklusalfäche bzw. Inzisalkante wie ein Käppchen und erfasste den retentiv gebogenen Anteil des Transferschlüssels. Auf diese Weise erhält man einen Kunststoffstempel der Okklusalfäche bzw. Inzisalkante, welcher in Verbindung mit dem Transferschlüssel die Bracketposition speichert (s. Abb. 15 b).

---

\* ESPE, Seefeld

Die Verwendung von Rundstahl im Slot sollte das freie Rotieren des Brackets um die Slotachse ermöglichen. Dies erlaubte eine flächige und möglichst gleichmäßige Anlagerung der Bracketbasis an die Zahnoberfläche. Nachdem alle Brackets mitsamt den Transferschlüsseln temporär geklebt waren, konnten im nächsten Schritt mittels lichthärtendem Kunststoff mehrere Übertragungsschlüssel zu Gruppen zusammengefasst werden (s. Abb. 15 c). Arbeitet man mit einem Set up, so werden zunächst alle Übertragungsschlüssel auf diesem hergestellt (s. Abb. 16) und dann auf das Situationsmodell übertragen. Der Behandler erhält so Übertragungsschablonen, die einfach zu handhaben sind und das zeitgleiche Bekleben mehrerer Zähne ermöglichen (s. Abb. 15 d). Nach erfolgter Klebung wurden die Transferschlüssel durch Lösen der Ligaturen entfernt.

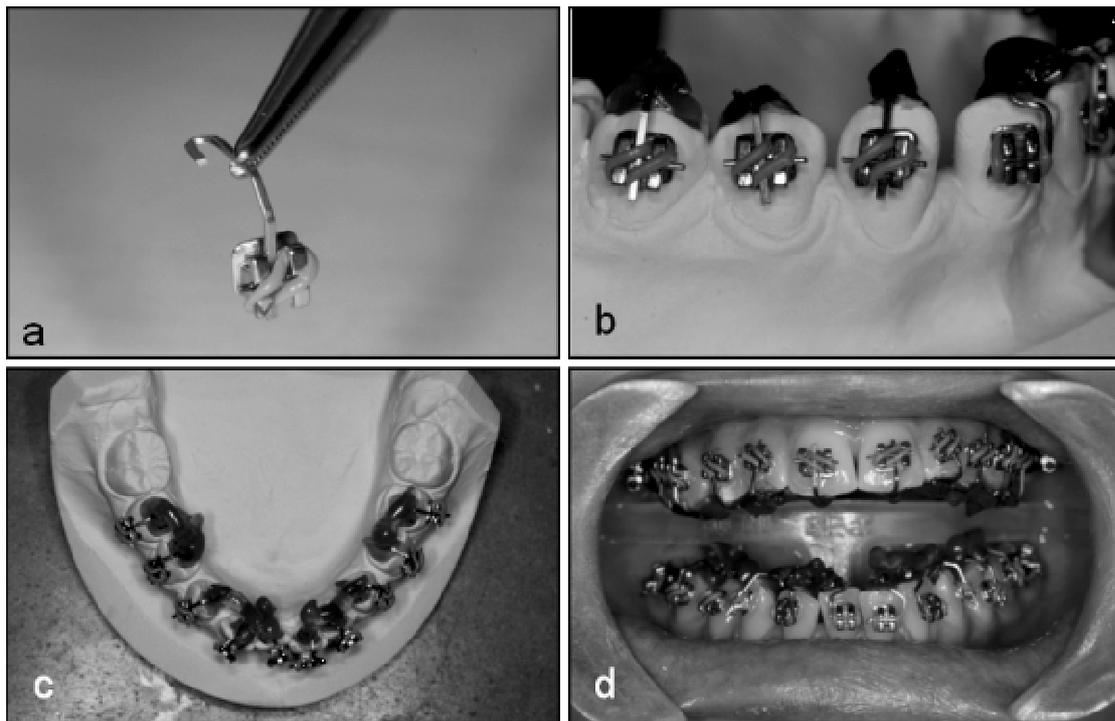


Abb. 15 a, b, c, d: Arbeitsschritte des indirekten Klebverfahrens mit Transferschlüsseln modifiziert nach *Drescher*. a: Bracket mit Transferschlüssel b: Temporäre Fixierung auf den Situationsmodellen c: Gruppierung mehrerer Transferschlüssel d: Nach erfolgter Klebung im Patientenmund



Abb. 16: Herstellung der Transferschlüssel auf einem Set up Modell

Dieses Verfahren kombiniert die Vorteile des indirekten und direkten Klebens, da es hierbei möglich ist, jedes Bracket einzeln zu adaptieren und anfallende Bondingüberschüsse sofort zu entfernen. Die Klebeschablonen sind so gestaltet, dass eine genaue visuelle Prüfung der Bracketposition sowohl vor, als auch während des Klebevorganges möglich ist. Die Transferschlüssel sind wiederverwendbar und werden zur Repositionierung bei Bracketverlust benötigt. Ein neues Bracket wird dann in den Transferschlüssel einligiert und kann wie das verlorene Bracket auf dem Zahn positioniert werden.

## 4.2. Der Phantompatient

200 Zähne von 20 Zahnbögen wurden am Phantompatienten\* indirekt mit Brackets beklebt. 100 Zähne wurden nach dem indirekten Verfahren nach *Thomas* und 100 Zähne nach dem indirekten Verfahren modifiziert nach *Drescher* indirekt beklebt. Die Zahnbögen wurden jeweils vom zweiten Prämolaren der einen Seite bis zum zweiten Prämolaren der anderen Seite beklebt.

Anhand des Phantompatienten mit Kunststoffzähnen konnten beide Klebeverfahren unter identischen Bedingungen durchgeführt werden. Die zu beklebenden Zähne, die intraoralen Verhältnisse und die Arbeitsbedingungen waren somit bei der Anwendung beider indirekter Klebeverfahren identisch. Der Phantompatient ist in einem zahnärztlichen Arbeitsplatz integriert und dient der studentischen Ausbildung von Zahnärzten. Die Zähne sind in einem Kiefermodell mit einem Gummiüberzug beliebig austauschbar. Da die Kunststoffzähne maschinell gefertigt wurden, sind Zähne eines Typs immer identisch. Die Kiefermodelle sind in einem metallischen Phantomkopf verschraubt (s. Abb. 17). Dieses metallische Schädelgerüst wurde mit einer Gummimaske überzogen, welche zur Simulation der Mundhöhle und der Wangen diente (s. Abb. 18 a, b).

---

\* KaVo, Biberach



Abb. 17: Phantomkiefer mit Kunststoffzähnen im Phantomschädel



Abb. 18 a, b: Phantompatient mit Gesichtsmaske

### 4.3. Modellherstellung

Es wurden Silikonabformungen mit Provil<sup>\*</sup> durchgeführt und mit dem synthetischen Hartgips Fujirock EP<sup>\*\*</sup> zur Herstellung der Situationsmodelle ausgegossen. Dann wurden die Brackets temporär auf den Modellen in der gewünschten Position fixiert. Die vertikale Ausrichtung erfolgte nach einem Abstand zur Inzisalkante oder Okklusionsfläche. An den Kleber zur temporären Klebung musste die Anforderung der Wasserlöslichkeit gestellt werden, da nach Herstellung der Übertragungsschablonen die restlose Entfernung dieses Klebstoffes erforderlich war. In beiden Verfahren wurden die Brackets auf den Situationsmodell temporär mit wasserlöslichem Pritt<sup>\*\*\*</sup>-Papierklebstoff fixiert. Anschließend erfolgte die Herstellung der Übertragungsschlüssel nach den jeweiligen indirekten Verfahrenstechniken (s. Abb. 19 a, b). Die endgültige Klebung auf die Zähne des Phantompatienten erfolgte mit Sekundenkleber<sup>\*\*\*\*</sup> in geliger Konsistenz, indem dieser auf die Brackets in der Tiefziehschiene oder auf die Brackets mit Transferschlüssel aufgetragen wurde. Die Brackets wurden für zwei Minuten unter leichtem Druck auf die Phantomzähne appliziert.



Abb. 19 a: Situationsmodell mit Übertragungsärmchen nach *Prof. Dr. Drescher*

---

<sup>\*</sup> Heraeus Kulzer, Dormagen

<sup>\*\*</sup> GC Europe, Leuven

<sup>\*\*\*</sup> Henkel, Düsseldorf

<sup>\*\*\*\*</sup> UHU, Bühl (Baden)



Abb. 19 b: Situationsmodell mit Übertragungsschablone mittels Tiefziehfolie nach *Thomas*



Abb. 20 a: Endgültige Klebung der Brackets mittels Transferschlüssel

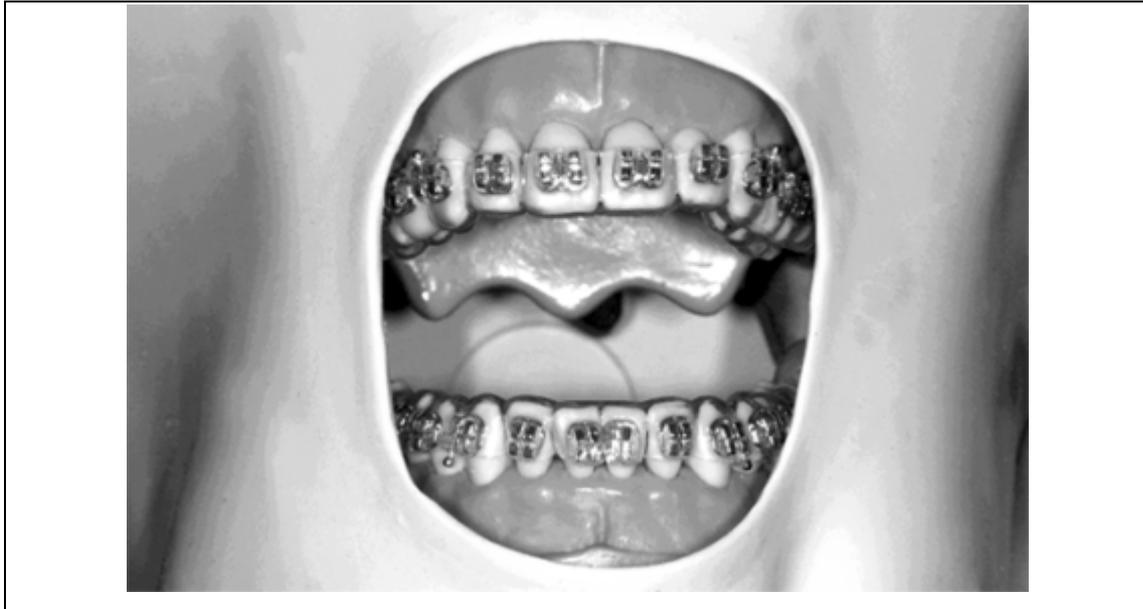


Abb. 20 b: Endgültige Klebung der Brackets mittels Tiefziehfolie

#### 4.4. Messung der Übertragungsfehler

Die indirekten Klebeverfahren sollten bezüglich ihrer Übertragungsfehler miteinander verglichen bzw. einander gegenübergestellt werden. Wie bereits zuvor erläutert, verursacht der Übertragungsfehler eine Diskrepanz zwischen der Bracketposition auf dem Arbeitsmodell (Sollposition) und der endgültigen Klebeposition auf dem Zahn (Istposition). Diese Diskrepanz hat eine translatorische und eine rotatorische Komponente. Diese sind jeweils für die drei Dimensionen des Raumes definierbar. Die Definition der Orientierung eines Körpers im Raum ist durch die Beschreibung seiner sechs Freiheitsgrade möglich. Die Diskrepanz zwischen der Soll- und der Istposition ist als ein Abweichungsvektor in einem dreidimensionalen Raum zu beschreiben, welcher ein Summenvektor aus den Einzeltranslationsvektoren in den drei Raumebenen und aus den Einzelrotationsvektoren um die drei Achsen des Raumes besteht. Auch der Summenvektor wird durch diese sechs Einzelabweichungsvektoren beschrieben. Für diese Studie wurde aus einem Laser-Abstandssensor in Kombination mit einem computergesteuerten xy-Verschiebetisch eine Scannereinrichtung entwickelt, welche das Scannen von Zähne ermöglichte. Die Zähne wurden erst in ihrer Sollposition auf dem

Gipsmodell vor der Übertragungsschlüsselherstellung und später in ihrer Istposition auf den einzelnen Kunststoffzähnen nach definitiver Klebung gescannt (s. Abb. 21). Die so erhaltenen Daten wurden mit einer Grafiksoftware digital rekonstruiert. Eine Analyse der Abweichungen zwischen Soll- und Istposition wurde anhand der erstellten Computergrafiken vorgenommen.

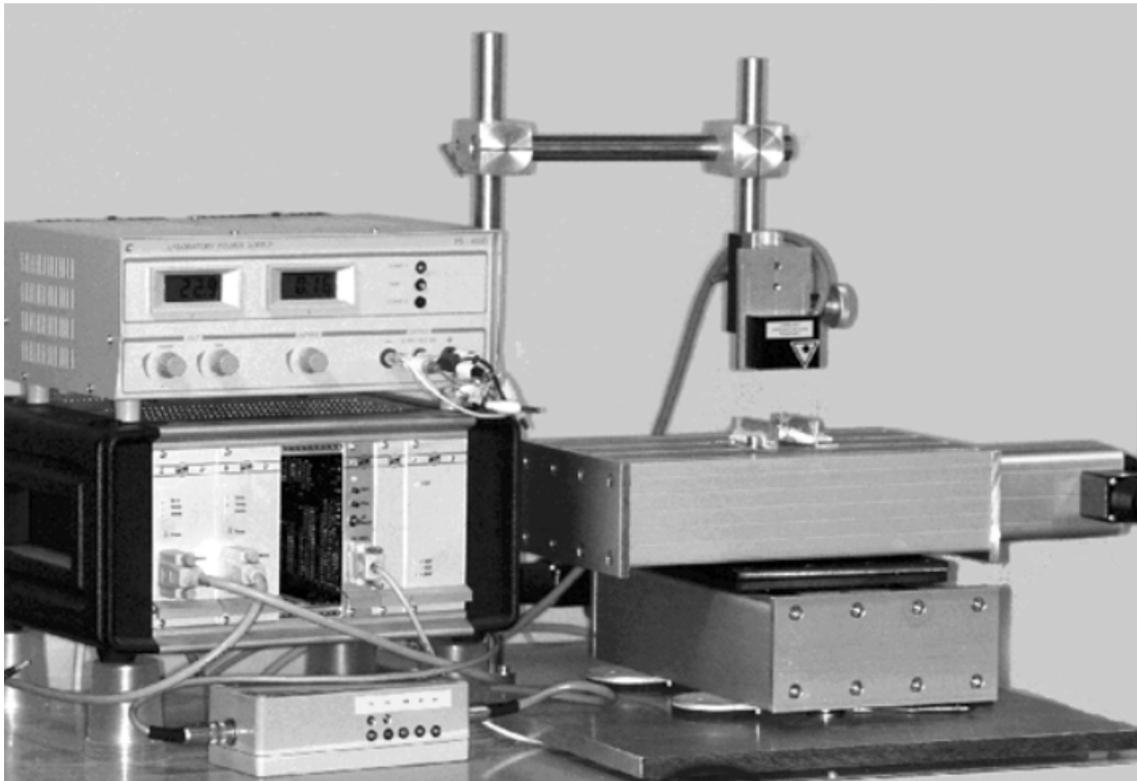


Abb. 21: Messeinrichtung mit Abstandssensor, xy-Verschiebetisch, Signalverarbeitungselektronik. Die ausgehenden Messdaten wurden über ein Multimeter an einen Computer mit der Verschiebetischsoftware weitergeleitet.

Die Messeinrichtung bestand aus vier Hauptkomponenten:

- einem Laser-Abstandssensor,
- einem computergesteuerten xy-Verschiebetisch,
- einer Software, welche die Führung des xy-Verschiebetisches bzw. die Einrichtung eines Scanrasters und die Speicherung der 3D-Koordinaten des zuvor gescannten Rasters ermöglichte,
- einer Grafiksoftware, die eine dreidimensionale Rekonstruktion der Datensätze ermöglichte.

Die zu scannenden Zähne wurden in einem Halter auf dem xy-Verschiebetisch befestigt. Die Steuersoftware des Verschiebetisches erlaubte die Festlegung eines Rasters. Die Auflösung dieses Rasters wurde mit der Anzahl der Schritte und Definition der Schrittweite definiert. Anhand dieses Rasters wurden die Zähne schrittweise unter dem Abstandssensor in x- und y-Richtung bewegt. Am Ende eines Scanvorganges entstand ein Datensatz, der aus den gesamten Abstandsmessungen des x- / y- Rasters besteht.

Die Datensätze wurden in eine Grafiksoftware überführt, welche eine dreidimensionale Rekonstruktion ermöglichte. So entstanden dreidimensionale Abbildungen der Zähne mit Brackets in der Soll- und Brackets in der Istposition. Dies ermöglichte die dreidimensionale Analyse des gleichen Zahnes vor und nach erfolgter Klebung.

Die Auswertung erfolgte durch direktes Überlagern der rekonstruierten Zähne im Soll- mit den Zähnen im Istzustand. Die Grafiksoftware erlaubte die Bestimmung der Positionierungsabweichung der Brackets als Darstellung der drei translatorischen und der drei rotatorischen Abweichungsvektoren, jeweils in der x-, y- und z-Dimension.

Nachfolgend werden die einzelnen Komponenten und ihr funktionelles Zusammenspiel detailliert dargestellt.

#### 4.4.1. Der Laser-Abstandssensor

Das Vermessen der Zähne erfolgte mit einem Laser-Abstandssensor Typ LC-ML-AT-50/10/1k\*, welcher nach dem Prinzip des Triangulationsverfahrens arbeitete (s. Abb. 22 a, b). Dieses Verfahren macht sich die Winkelbeziehung in einem Dreieck zunutze. Der Laser-Abstandssensor bestand aus einem Diodenlaser und einer Empfangsoptik mit Photoempfänger. Die Abstandsmessung erfolgte, indem das Messobjekt mit dem optoelektronischen Sender bestrahlt wurde. Ein Teil der rückgestreuten Strahlung wurde mit der Empfangsoptik auf einem Photoempfänger abgebildet. In Abhängigkeit vom Messabstand änderte sich der Empfangswinkel, wodurch unterschiedliche Punkte des Photoempfängers bestrahlt wurden (s. Abb. 3.8 a).

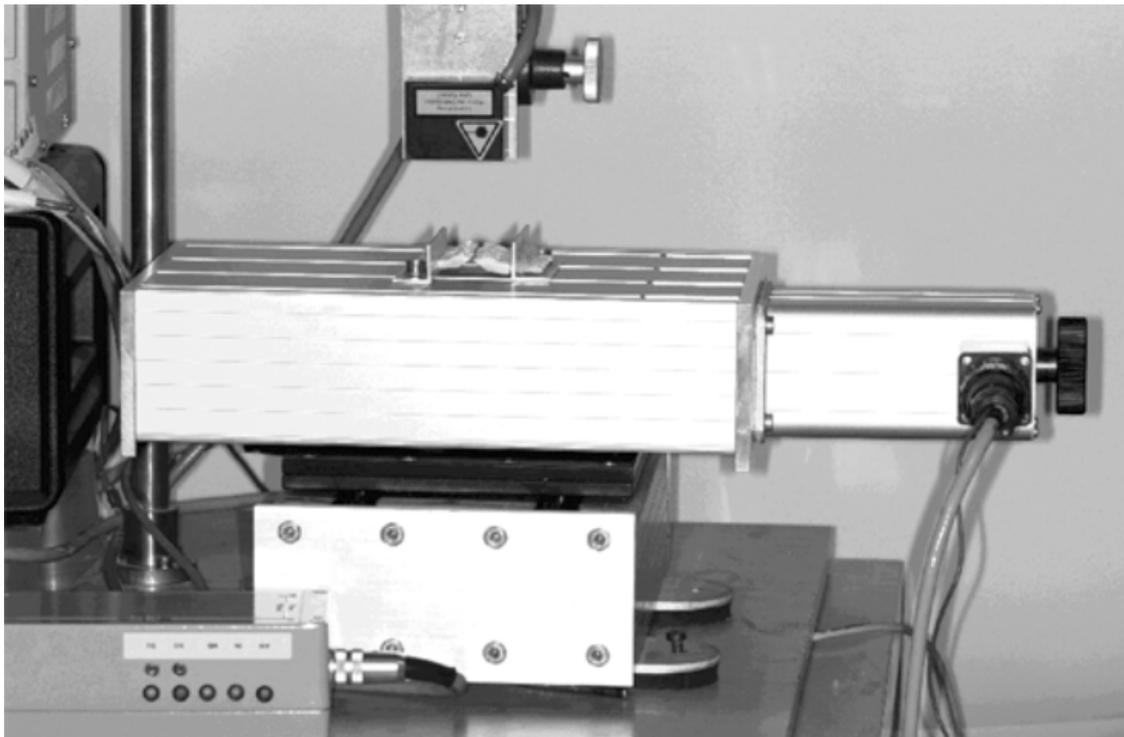


Abb. 22 a: Der Abstandssensor in seiner höhenverstellbaren Halterung

---

\*Lasercomponents, Olching

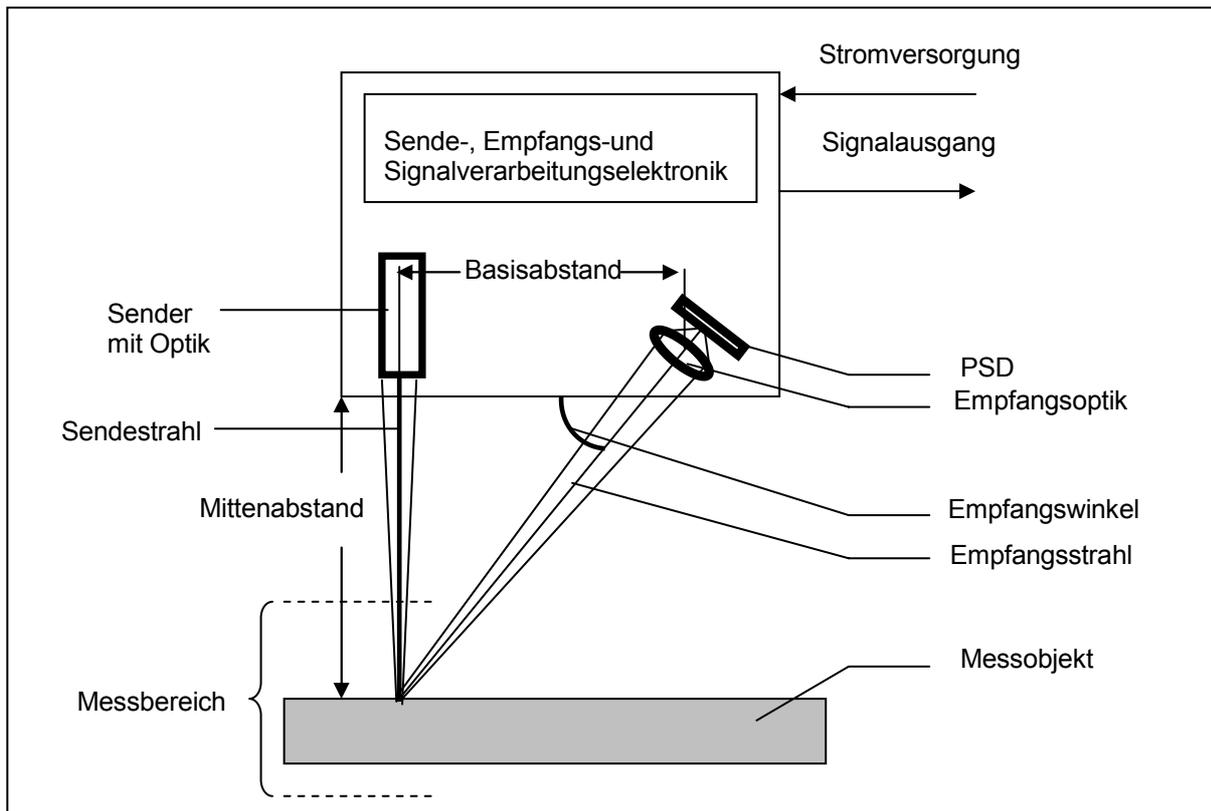


Abb. 22 b: Skizze der Abstandssensors und des Funktionsprinzips des Triangulationsverfahrens. PSD = position sensitive device (nach [30])

Bei dem Photoempfänger handelte es sich um einen positionsempfindlichen Detektor (PSD= position sensitive device), welcher in Abhängigkeit von der bestrahlten Stelle des Empfängers eine unterschiedliche Messspannung erzeugte. Aufgrund der Winkelbeziehung bestand ein fester Zusammenhang zwischen Messabstand und der bestrahlten Stelle auf dem Detektor.

Die Messempfindlichkeit des Sensors betrug  $1 \text{ V/mm}$ , was einer Messspannungsänderung von einem Volt bei einem Millimeter Abstandsänderung entsprach [30].

Die Abstandsmessungen des Sensors waren nach den Herstellerangaben bis auf  $10 \text{ }\mu\text{m}$  reproduzierbar [30].

Einige Optimierungen der Messgenauigkeit wurden durch Berücksichtigung der physikalischen Eigenschaften des hier angewandten Lasers in der Konstruktion des Sensors erreicht.

Grundsätzlich lässt sich ein Laserstrahl in longitudinale oder axiale Resonator-Schwingungs-Moden sowie in transversale Moden, welche sich senkrecht zu der Resonatorachse befinden, beschreiben. Die transversalen Moden werden in unterschiedlichen Ordnungen beschrieben, welche die Aufteilung des Strahlquerschnittes in unterschiedliche Gebiete beschreibt. Nomenklatorisch entsprechen diese Anordnungen den gegebenen  $TEM_{mn}$ -Moden (d.h. transversale elektrische und magnetische). Die Indizes  $m$  und  $n$  sind die ganzzahligen Werte transversaler Schwingungsknotenlinien in x- und y-Richtung quer zum austretenden Laserstrahl. Der hier verwendete Diodenlaser hat die niedrigste Ordnung. Diese wird  $TEM_{00}$ -Mode bezeichnet und zeichnet sich durch einen runden Brennfleckdurchmesser aus (s. Abb. 23). Diese Ordnung wird häufig genutzt, da in der  $TEM_{00}$ -Mode die Leistungsdichte über den Querschnitt eine ideale Gaußsche Verteilung hat (s. Abb. 3.10). Des Weiteren gibt es quer zum Strahl keine Phasenverschiebung im elektrischen Feld wie in anderen Moden, daher ist der Strahl vollständig räumlich kohärent; der Streuwinkel des Strahls ist der kleinste, und er kann auf den kleinsten Brennfleck gebündelt werden (*Hecht* [15]). Dies wurde durch die Verwendung einer Empfangsoptik in der Sensor konstruktion ausgenutzt. Die Empfangsoptik fokussierte die einfallende Strahlung auf den positionsempfindlichen Detektor. Hierdurch wurde eine exaktere Bestimmung des Empfangswinkels ermöglicht. Der auf den positionsempfindlichen Detektor fokussierte Laserbrennfleck hatte wie oben beschrieben in der Querschnittebene eine Graduierung in der Beleuchtungsstärke mit Gaußschem Verteilungsmuster (s. Abb. 24).

Zur Erzeugung einer möglichst homogenen Laserstrahl-Reemission wurden die Kunststoffzähne mit Brackets unter Verwendung eines verdünnten mattweißen Lacks (Innenraumlack seidenmatt plus Verdünnung für Innenraumlack\*) mattiert. Die oberflächenabhängigen Effekte verschiedener Materialien auf das Reemissionsverhalten der Laserstrahlung werden in Kapitel 6 detailliert erläutert.

---

\* OBI, Wermelkirchen

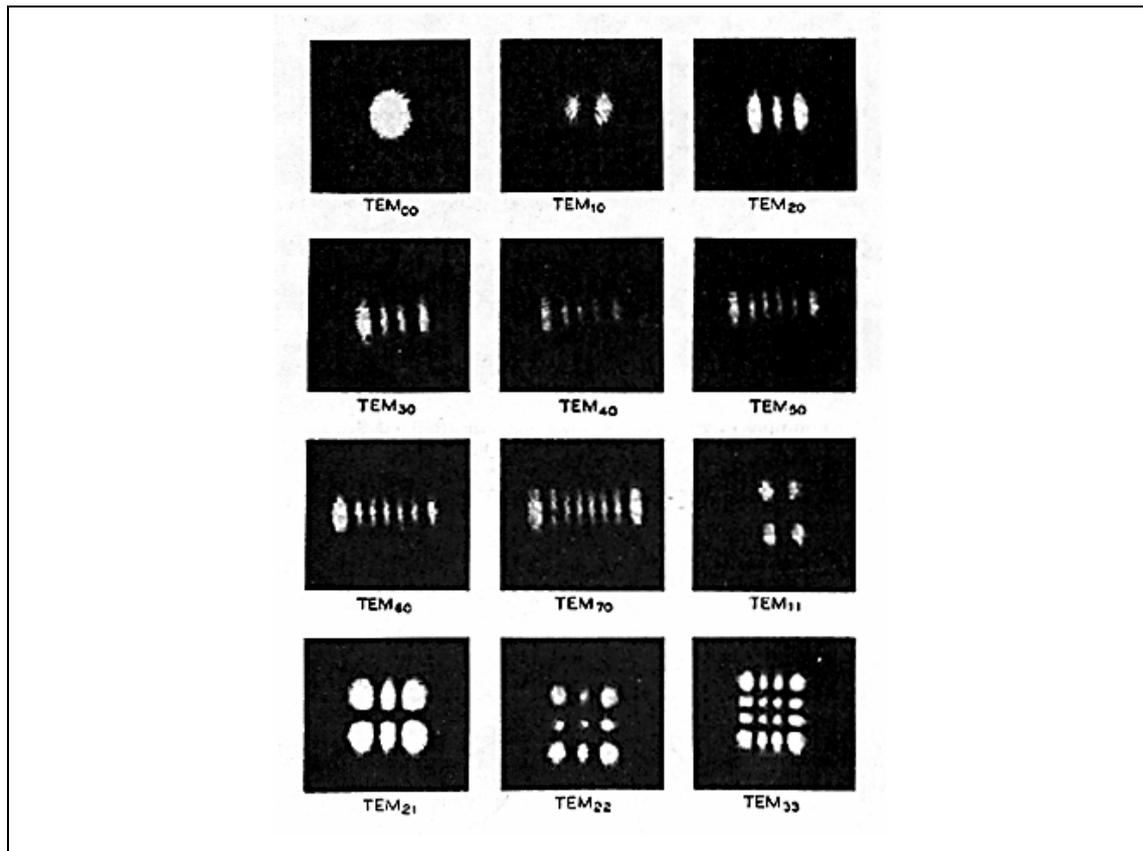


Abb. 23: Unterschiedliche Ordnungen (TEM-Moden) und deren Gebietsaufteilung der Strahlenquerschnitte (aus [15])

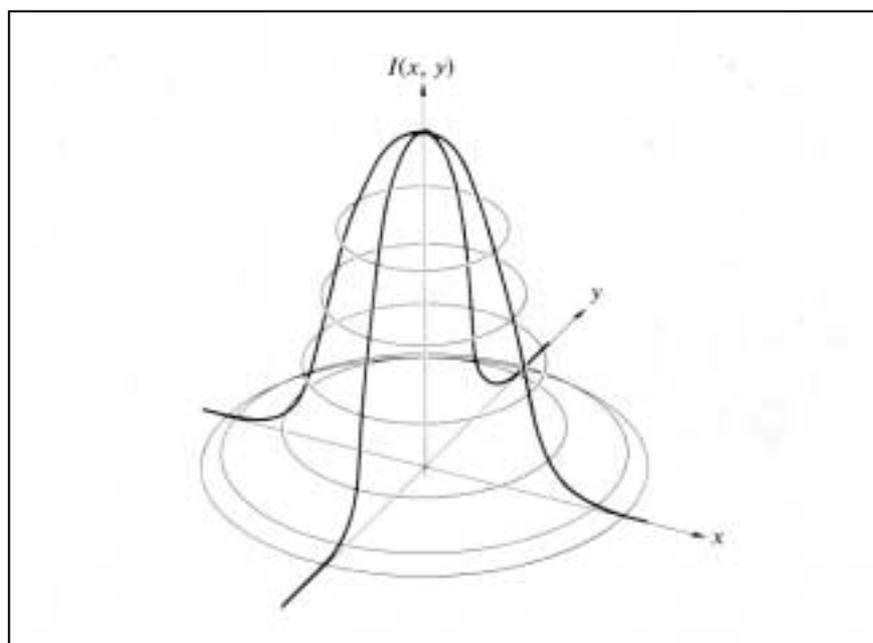


Abb. 24: Gaußsche Verteilung der Beleuchtungsstärke (aus [15])

Aus dieser Intensitätsverteilung auf den bestrahlten Detektoren ermittelte dieser die Bereiche mit maximaler Beleuchtungsstärke. Hierdurch wurde die Messempfindlichkeit erhöht. So wurden etwaige Nachteile, welche sich primär durch die Größe des Laserstrahldurchmessers bei der Bestrahlung des Messobjektes ergeben könnten, eliminiert und die Messgenauigkeit maximiert.

Des weiteren leistete die Verarbeitungssoftware des Abstandssensors noch eine Linearisierung des zunächst nichtlinearen Zusammenhangs zwischen Messspannung und Messabstand (s. Abb. 25 und Abb. 26).

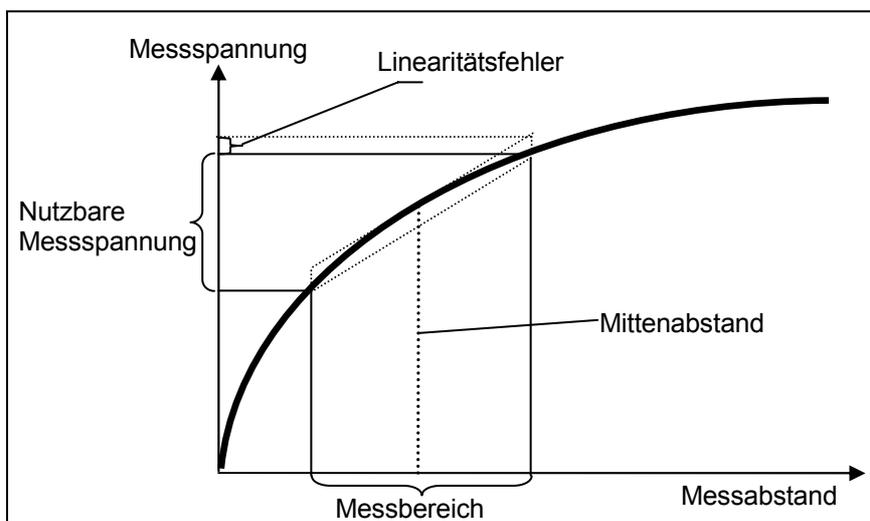


Abb. 25: Beziehung zwischen Messspannung, Messabstand und Linearitätsfehler (aus [30])

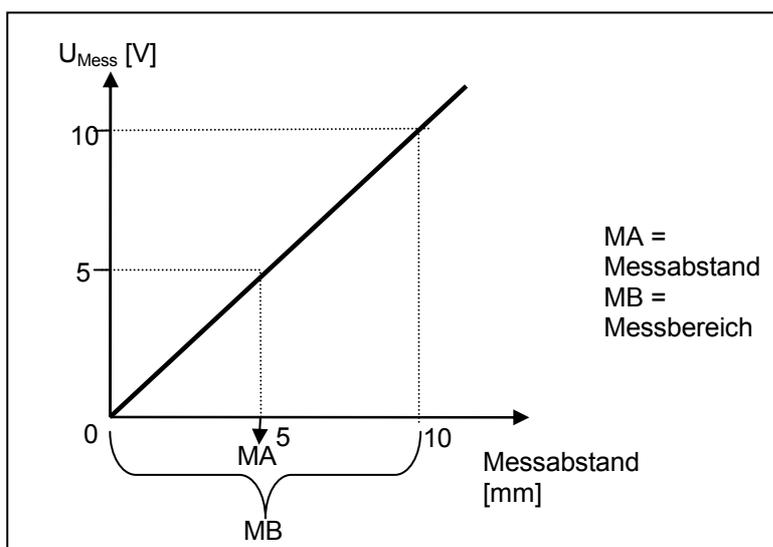


Abb. 26: Linearisierte Beziehung zwischen Messabstand und Messspannung (aus [30])

Die Ausgabe der Messspannungen aus der Sensorelektronik erfolgte mit 1 kHz und wurde zunächst an ein Multimeter Modell 2000\* gegeben. Für die Integrationszeit des A/D - Konverters ist die Einstellung „medium“ gewählt worden. Hierbei wird bei einer Netzspannungsperiode von 50 Hz eine Integrationszeit von 20 ms erreicht. Diese Einstellung wurde als optimal angesehen, da hier der Messfehler in der A/D - Konvertierung bei 0,006 Volt lag. Somit betrug der Messfehler in der Verarbeitung der Messspannungen umgerechnet auf die Abstandsmessung 6 µm.

Um eine konvexe Oberfläche eines Körpers insgesamt korrekt scannen zu können, muss die Tiefenänderung der Oberfläche während des Scanvorganges in ihrem Minimum und Maximum innerhalb des Messbereichs des Abstandensensors liegen, da nur in dem Messbereich ein linearer Zusammenhang zwischen der angegebenen Messspannung und dem gemessenen Abstand besteht.

Der hier verwendete Sensor hatte einen Messbereich von +/- 5 mm. Dies reichte zur Erfassung einer Fazialfläche eines Zahnes mit geklebtem Bracket aus. Die Adjustierung des Objektes an den Messbereich wurde durch einen höhenverstellbaren Halter realisiert. Dieser ermöglichte die Einstellung der oberen Messbereichsgrenze an den höchsten Punkt des zu scannenden Objektes.

Unter Berücksichtigung der folgenden Messreihe wurde der Messbereich im Sinne einer erhöhten Auflösung in x- und y- Richtung noch etwas verringert bzw. nicht voll ausgeschöpft. Diese Einschränkung resultierte aus nachfolgenden Überlegungen zur Erzielung einer maximalen Auflösung in x- und y- Richtung bei möglichst kleinem Laserstrahldurchmesser.

---

\* Keithley, Cleveland

#### 4.4.1.1. Optimierung der Messungen

Um eine möglichst hohe Auflösung der gescannten Objekte zu erzielen, sollte das Scanraster mit möglichst kleinen Schrittweiten in x- und y- Richtung eingerichtet werden. Der begrenzende Faktor für die Minimierung der Schrittweite eines Rasters bei einer derartigen Versuchsanordnung ist der Laserstrahldurchmesser in seinem Fokus.

Die Bestimmung des Messbereichs, in dem der Laserstrahl maximal fokussiert ist und somit sein Durchmesser minimal ist, wurde anhand einer Analyse der Abbildungsschärfe in unterschiedlichen Messspannungsbereichen durch geführt.

Hierfür wurde ein Objekt in Form einer Stufe von 1 mm zehn Mal in den zehn Messspannungsbereichen 0 - 1 V, 1 - 2 V, 2 - 3 V, .... bis 9 - 10 V jeweils zehn Mal mit einer Schrittweite von 0,05 mm gescannt.

An einem theoretischen Beispiel soll das hier gewählte Vorgehen erklärt werden:

In einem idealisierten Modell würde ein unendlich kleiner Laserstrahldurchmesser bei der Abtastung mit einer unendlich kleinen Schrittweite vor der Stufe eine konstante Messspannung anzeigen. Bei Erreichen der Stufe von 1 mm würde beim nächsten Schritt eine sofortige Messspannungsänderung von einem Volt erfolgen. Dieses Messspannungsniveau würde nach der Stufe verbleiben, sofern der Scanvorgang auf dem Abstandsniveau verbleibt. In einer Punktabbildungsfunktion, welche die Ableitung der Messdaten darstellt, würde sich dies in einer Senkrechten mit unendlich großer Steigung darstellen. Diese Ableitung ließe sich statistisch beschreiben. Da die Steigung unendlich groß ist, wäre die Standardabweichung unendlich klein. Da die Standardabweichung ein Maß für die Auflösung der Messung in x- und y- Richtung darstellt, würde hieraus resultieren, dass die Schrittweite für das Raster unendlich klein gewählt werden kann, um eine möglichst hohe Auflösung zu erreichen.

Ein größerer Laserbrennfleck mit definiertem Durchmesser stellt eine gescannte scharfe Stufe nicht in einem Schritt sondern in mehreren Teilschritten dar: Der Funktionsgraph hätte demnach eine kleinere Steigung. Nach Ableitung würde sich in der Punktabbildungsfunktion keine Senkrechte, sondern eine Kurve mit geringerer Steigung darstellen. Die Kurve hat dann die typische Form einer Gaußschen Funktion und kann statistisch beschrieben werden, wobei die Standardabweichung wieder als ein Maß für die Auflösung des Sensors in x- und y- Richtung gilt.

Aus den Ergebnissen (s. Kapitel 5) der Untersuchung der Abbildungsschärfe mittels statistischer Analyse der Punktabbildungsfunktionen ergab sich eine Optimierung des Messverfahrens durch die Begrenzung des Gesamtmessbereiches von 0 bis 10 Volt auf einen Teilbereich von 0 bis 7 Volt. Dies entspricht einem Tiefenbereich von 7 mm, welcher zur Erfassung aller Zähne ebenfalls ausreichend war.

#### 4.4.2. Der computergesteuerte Verschiebetisch und seine Software

Um die Zähne scannen zu können, wurden sie auf einem computergesteuerten Verschiebetisch in einer Halterung befestigt (s. Abb. 27). Ein der Zahngröße entsprechendes Raster wurde durch Eingabe der Anzahl der Schritte und deren Schrittweite angelegt. So konnte ein der Zahngröße entsprechendes Feld in x- und y- Richtung gescannt werden (s. Abb. 28), indem der Verschiebetisch den Zahn unter dem Abstandssensor herführte.



Abb. 27: Mit Brackets beklebte Zähne in einer Halterung auf dem Verschiebetisch

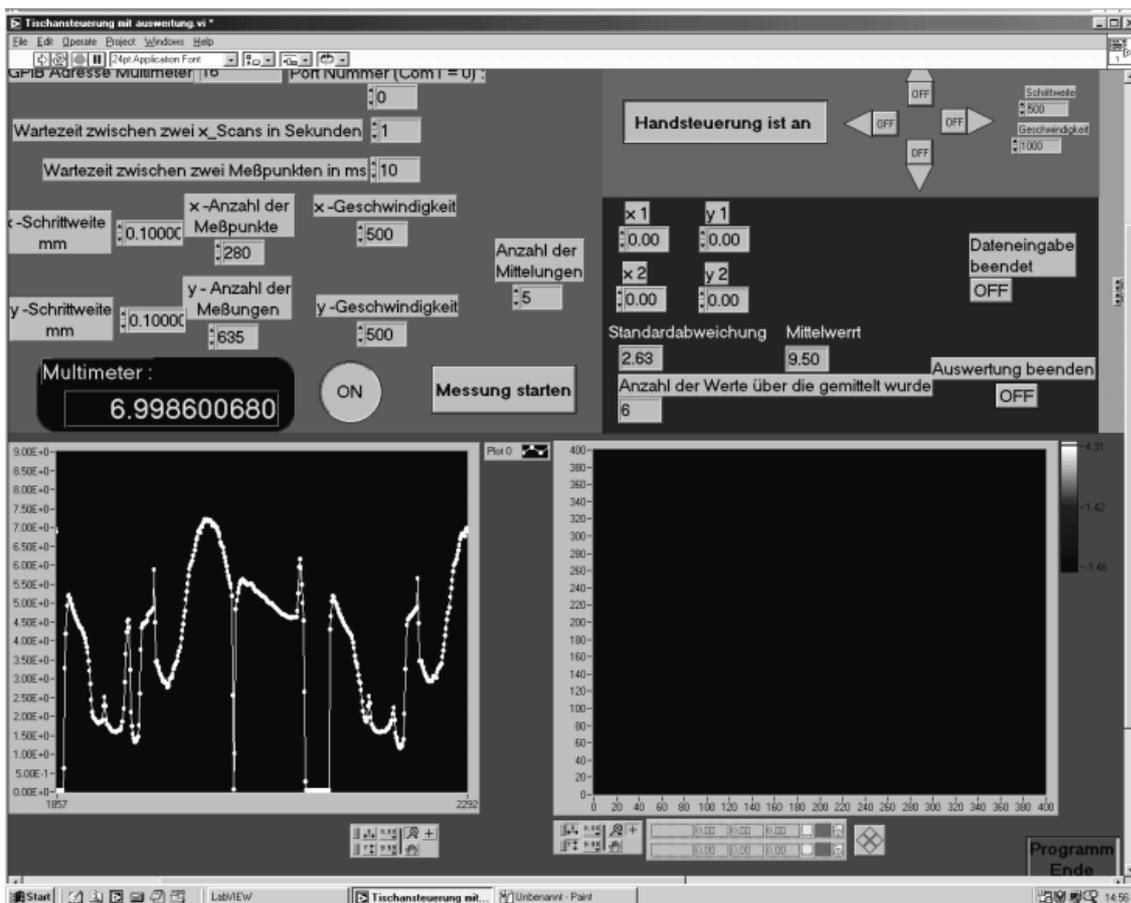


Abb. 28: Die Steuerungs- und Datenerfassungssoftware für den Verschiebetisch

An einem Beispiel soll hier das Anlegen eines Rasters erklärt werden:

Ein beklebter Zahn hat eine Fazialflächenhöhe von 12 mm und eine Facialflächenbreite von 7 mm. Zur Erfassung aller Oberflächenanteile ist die Einrichtung eines Rasters von mindestens 7 x 12 mm notwendig. Wird die Schrittweite in x- und y-Richtung mit 0,1 mm eingestellt, entsteht ein Datensatz von  $(7 \times 10) \times (12 \times 10) = 8400$  Einzeldaten beziehungsweise eine Auflösung von 700 x 120 Pixel. Der Scanvorgang ist eine Zusammensetzung aus einzelnen Abstandsmessungen - hier 700 x 120 -, welche durch das Raster vorgegeben sind und vom Verschiebetisch schrittweise abgefahren wurden.

Nach Digitalisierung der ausgehenden Messspannungen des Sensors durch das Multimeter erfolgte deren Erfassung mit der Software des Verschiebetisches. Die Software des Verschiebetisches ermöglichte es, aus den einzelnen Abstandsmessungen eine Datenwolke zu erstellen, die der Größe des Scanrasters in x- und y-Richtung entsprach. Die Daten konnten dann der weiteren Verarbeitung zugeführt werden, indem sie direkt im ASCII Dateiformat abgespeichert wurden. Die Datenwerte der Abstandsmessungen stellten in der späteren digitalen Rekonstruktion mittels Grafiksoftware die z-Dimension dar. Die x- und y- Dimensionen wurden durch die Einstellung der Anzahl der Schritte und deren Schrittweite im Scanrasters definiert.

#### 4.4.3. Dreidimensionale Rekonstruktion und Auswertung der Abweichungen mittels Grafiksoftware

Die dreidimensionale Rekonstruktion und Auswertung erfolgte mit der Grafiksoftware 3D Studio Max 2.5\*. Mit einem eigens programmierten Eingangsdatenfilter wurden die ASCII-Datensätze in eine dreidimensionale Grafik konvertiert. So war es möglich, ein und denselben Zahn in seinem Zustand mit dem temporär geklebten Bracket (Sollposition) und dem endgültig geklebten Bracket (Istposition) nebeneinander dreidimensional zu betrachten. Die Analyse der Abweichungen in allen drei Dimensionen des Raums wurde durch freies Positionieren und Rotieren der dreidimensionalen

---

\* Kinetix, Milpitas

Rekonstruktionen möglich. Die Grafiksoftware erlaubte zudem die Darstellung der Datensätze in unterschiedlichen Modi. Die Darstellung im gerenderten und im „wire-frame“-Modus wurden für die Auswertung angewendet, da hierbei eine übersichtliche räumliche Annäherung der Objekte möglich war. So wurde der zu bewegende Zahn als Gitternetzstruktur dargestellt. Dieser konnte dann auf den ortsständigen Zahn, welcher im gerenderten Modus dargestellt wurde, angenähert werden. Zur Auswertung wurden vier Arbeitsperspektiven eingerichtet, um die nun folgenden Auswertungsschritte exakt beurteilen zu können (s. Abb. 29).

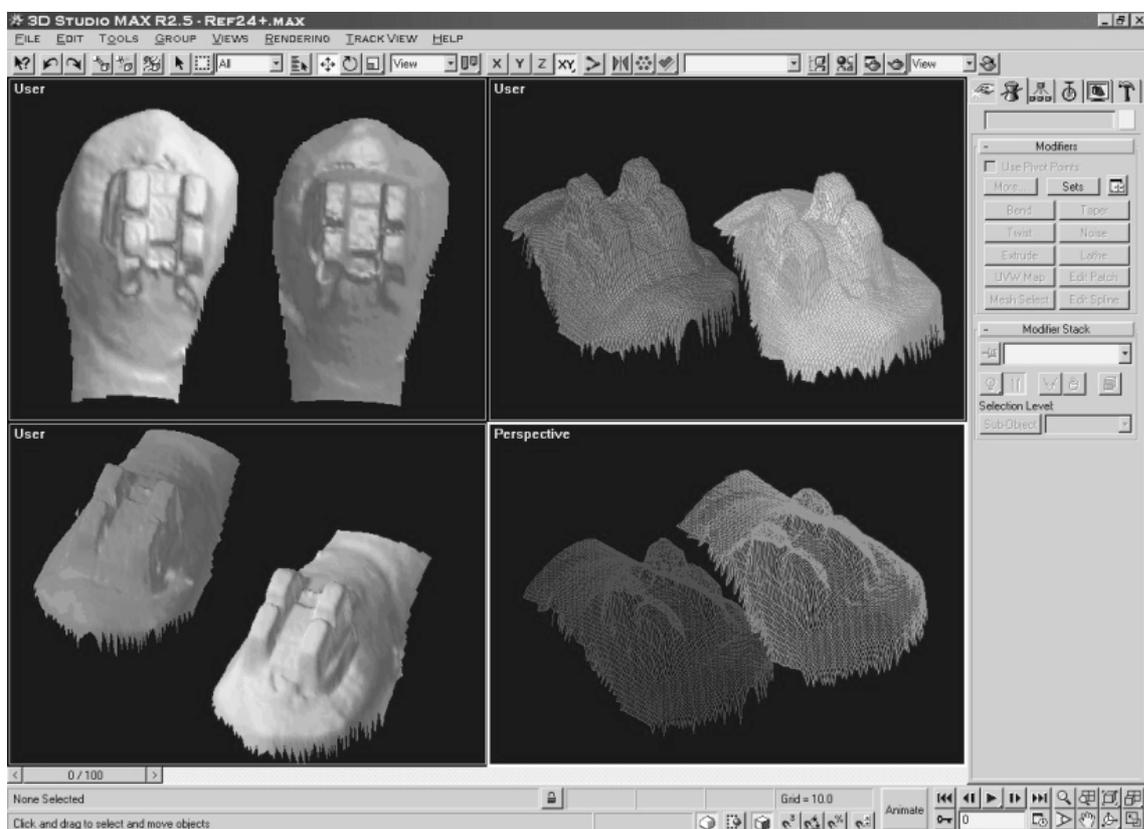


Abb. 29: Ausgangssituation ist die Darstellung der dreidimensional rekonstruierten Datensätze der Zähne, wobei die Sollposition dunkel und die Istposition hell dargestellt sind

Der Zahn mit dem Bracket in der Sollposition stellte die Nullposition dar. Dies wurde durch Setzen des Koordinatenursprunges in die Mitte der Bracketbasis erreicht. Für diesen Punkt sind alle Rotations- und Translationsvektoren gleich Null. Des Weiteren haben hier die drei Raumachsen ihren Anfangspunkt. Nachfolgend seien die Anordnungen und Orientierungen der räumlichen Achsen dargestellt:

- Die x-Achse wurde parallel zu den Bracketflügeln mittig angelegt. Alle Abweichungen, die sich in Richtung oberhalb des Nullpunktes bzw. okklusal dieses Punktes ergeben, erhielten ein positives Vorzeichen. Eine abweichende Bracketposition nach okklusal hatte demnach ein positives Vorzeichen.
- Die y-Achse wurde durch den Bracketslot angelegt. Die Richtung mit dem positiven Vorzeichen wurde nach distal gelegt. Eine abweichende Bracketposition nach distal hatte demnach ein positives Vorzeichen.
- Die z-Achse verlief in ihrer positiven Richtung vom Nullpunkt in Richtung durch den Zahn. Das bedeutet, dass sich ein dickerer Klebespalt nach erfolgter Klebung in einer negativen Abweichung äußerte.
- Rotationen um die Raumachsen hatten ein positives Vorzeichen, sofern sie im Uhrzeigersinn erfolgten. Eine Abweichung der Bracketposition mit einer Rotation um die y-Achse mit der Konsequenz eines erhöhten lingualen bzw. palatinalen Wurzeltores hatten demnach ein negatives Vorzeichen, da dies einer Rotationsabweichung entgegen dem Uhrzeigersinn entsprach.

Nachdem der Koordinatennullpunkt auf dem Zahn mit Bracket in Sollposition positioniert war, erfolgte die eigentliche Auswertung, indem die Zahndarstellungen in zwei Schritten überlagert wurden. Hierbei wurde folgendermaßen vorgegangen:

Der Zahn mit dem Bracket in der Istposition hat sein eigenes Koordinatensystem, welches unverändert bleiben konnte. Im ersten Schritt wurde dieser über den Zahn mit dem Bracket in Sollposition geschoben und

solange in seiner Position verändert, bis eine möglichst exakte Überlagerung der Zahnoberflächen der Zähne erreicht wurde. Graphisch stellte sich dies wie eine Zahnoberfläche des zu untersuchenden Zahnes mit zwei Brackets, eins in der Sollposition und das andere in der Istposition, dar (s. Abb. 30). Die Diskrepanz zwischen den beiden Brackets ist die Folge der Übertragungsfehler.

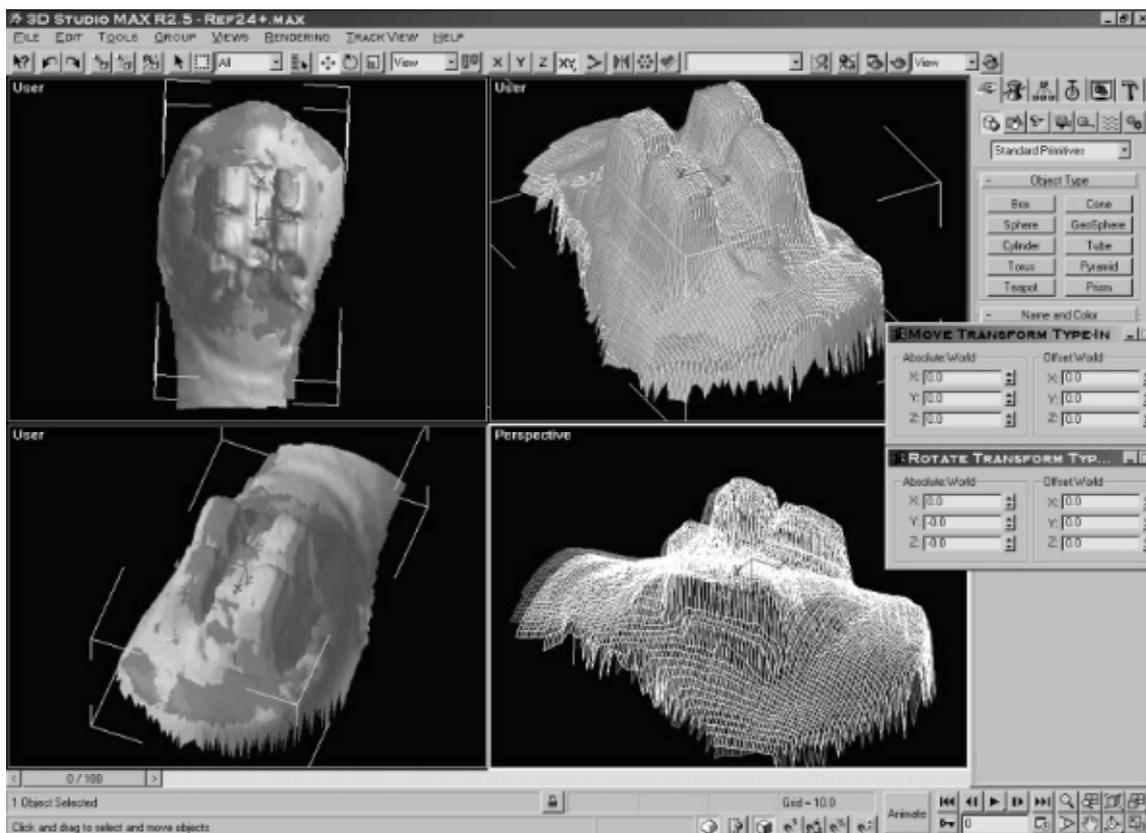


Abb. 30: Die Zahnoberflächen sind zur Deckung gebracht worden. Diese Überlagerungssituation stellt die Nullposition dar. Die Positionsdiskrepanz der Brackets zwischen Soll- und Istposition wird schon erkennbar. Erst im nächsten Schritt werden die sechs Abweichungsvektoren ermittelt.

Im zweiten Schritt erfolgte die exakte Bestimmung der Übertragungsfehler anhand einer zweiten Überlagerung. Hierfür wurde ausschließlich der Zahn mit Bracket in der Sollposition bewegt, bis die beiden Brackets zur Deckung kamen. Da das Koordinatensystem dieses Körpers an den zuvor bestimmten Koordinatenursprungspunkt translatorisch und rotatorisch in seiner Position räumlich festgelegt war (Nullposition), wurde die Verlagerung anhand der drei translatorischen und der drei rotatorischen Abweichungsvektoren dargestellt. Diese Abweichungsvektoren entsprechen den Übertragungsfehlern und konnten direkt abgelesen werden (s. Abb. 31).

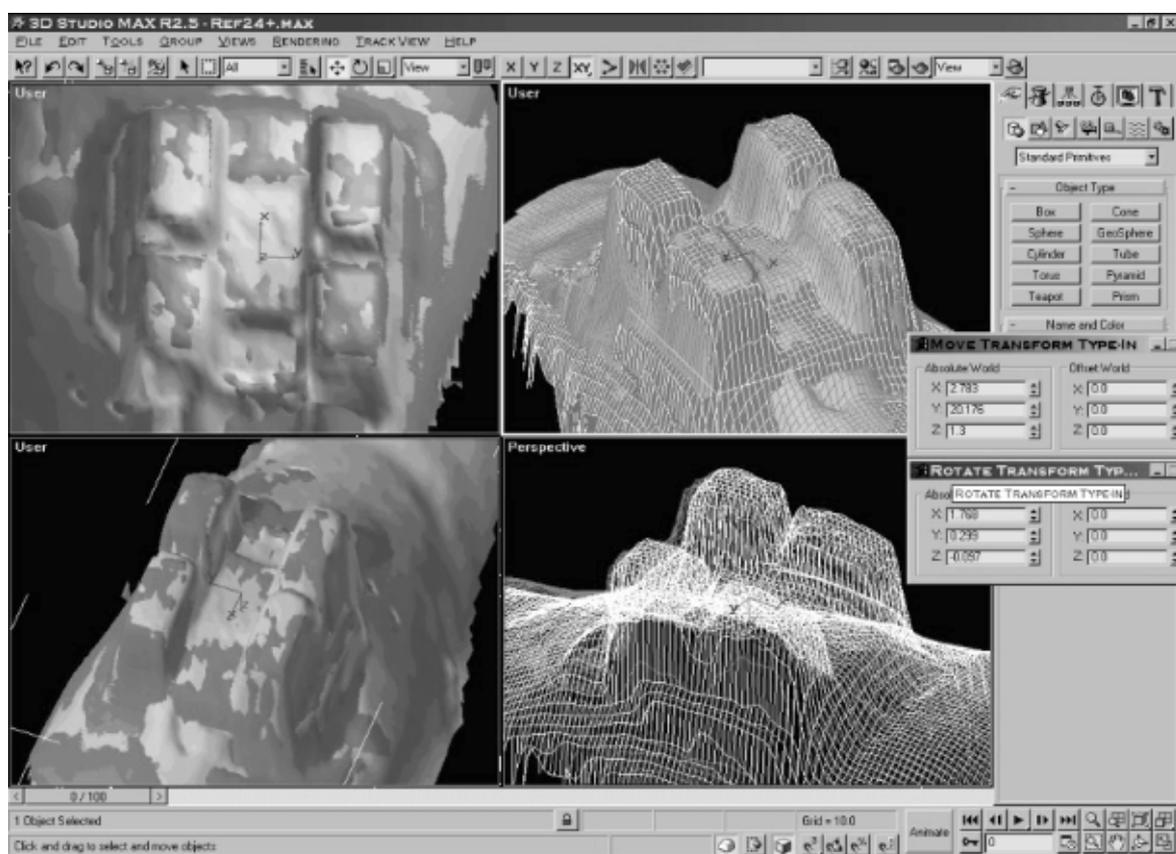


Abb. 31: Erfassung der sechs Abweichungsvektoren durch den zweiten Überlagerungsschritt. Die Bracketoberflächen wurden durch Verlagerung des Brackets in Sollposition zur Deckung gebracht. Dieses wurde aus der festgelegten Nullposition in die Überlagerungsposition gebracht.

Die Gitterstruktur der rekonstruierten Zähne entsprach dem gescannten Raster und der hiermit erfassten Datenwerten. Mit der Grafiksoftware wurde jeder Rasterschritt noch zehnmal unterteilt, so dass die kleinstmöglichen Bewegungsschritte zur Translation der Körper bei der Überlagerung 10  $\mu\text{m}$  entsprachen.

Die kleinstmöglichen Rotationen waren 0,01 Grad. Für die optische Überlagerung waren diese feinen Unterschiede sowohl bei Translationen als auch bei Rotationen selten erkennbar. Jedoch waren diese feinen Schrittmöglichkeiten in Zweifelsfällen bei der optischen Einschätzung einer Überlagerungssituation durchaus von Nutzen.

#### 4.5. Analyse der Messgenauigkeit

Um die Gesamtmessgenauigkeit dieses Messverfahren zu bestimmen, wurden Probekörper hergestellt. In diesen Probekörpern waren bekannte Abweichungen eingearbeitet (s. Abb. 32). Die Probekörper wurden aus einem Aluminiumblock gefräst und hatten jeweils die Gestalt eines großen Quaders, auf dem ein kleiner Quader positioniert ist (in Annäherung an die späteren Messobjekte). Ein Quader stellte den Referenzquader dar. Hier war der kleine Quader mittig und symmetrisch auf dem großen Quader positioniert. Der andere Quader war mit einer Abweichung des kleinen Quaders von  $45^\circ$  und 2 mm Translation versehen.

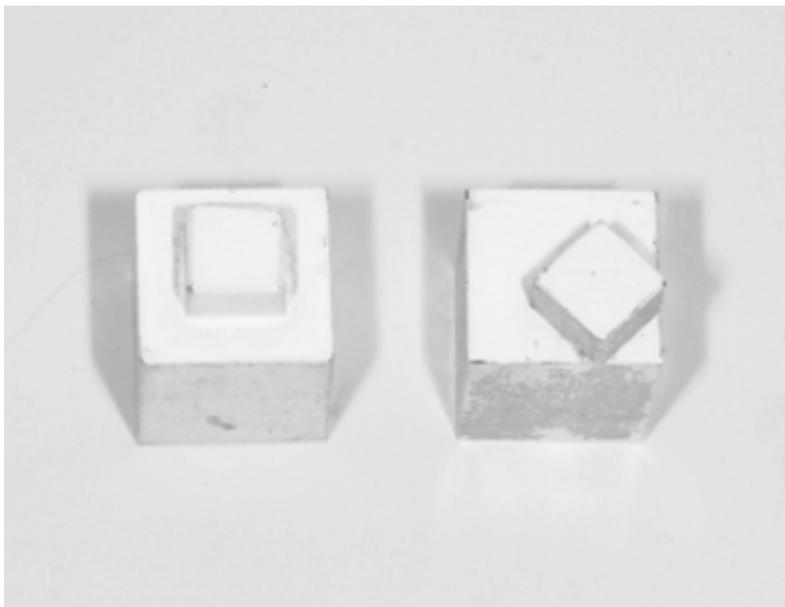


Abb. 32: Probekörper mit eingearbeiteter Abweichung nach dem Mattieren der zu scannenden Oberflächen

Diese Probekörper wurden gescannt und dreidimensional rekonstruiert. Die Auswertung wurde so durchgeführt, wie es mit den Zähnen später ebenfalls erfolgen sollte. Die zehnmahlige Überlagerung der dreidimensionalen Grafiken ergaben die Mittelwerte für die Abweichungsvektoren der Translation und der Rotation (s. Abb. 33 a, b, c).

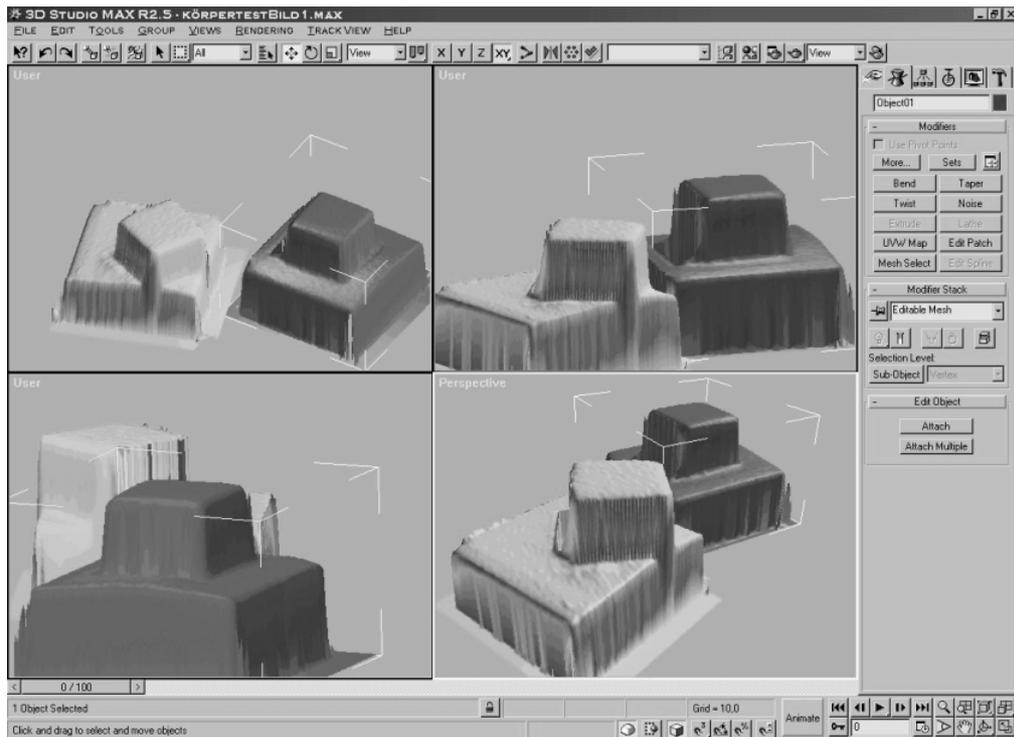


Abb. 33 a: Ausgangssituation

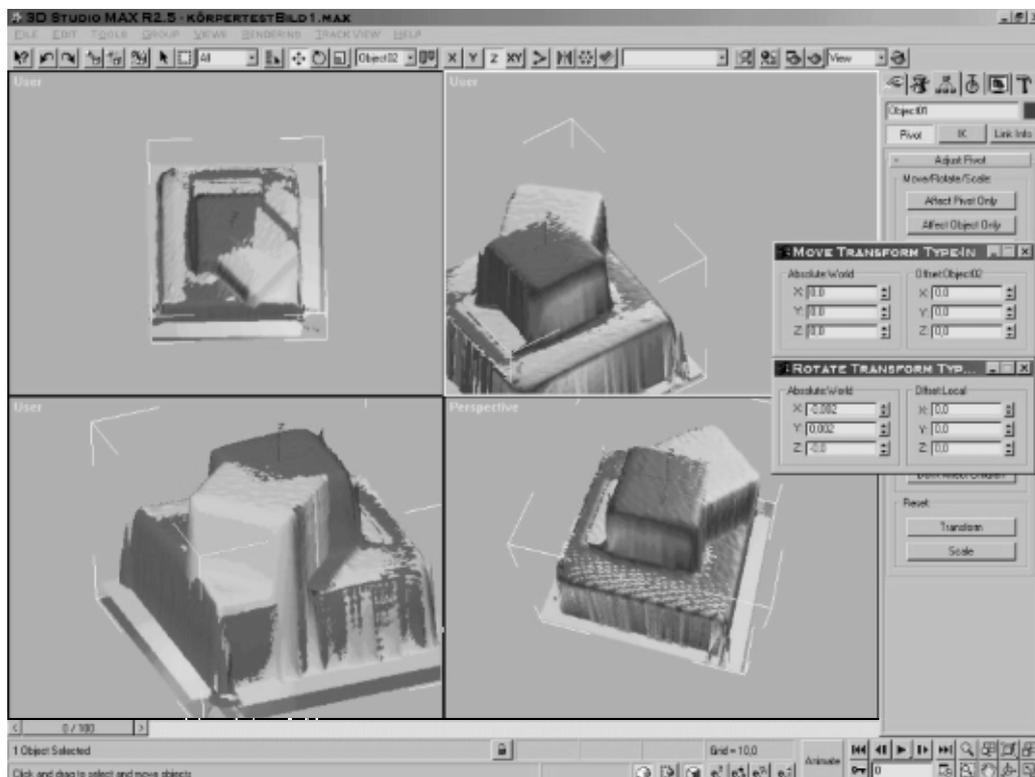


Abb. 33 b: Nullposition: Die Oberflächen der großen Quader sind zur Deckung gebracht worden.

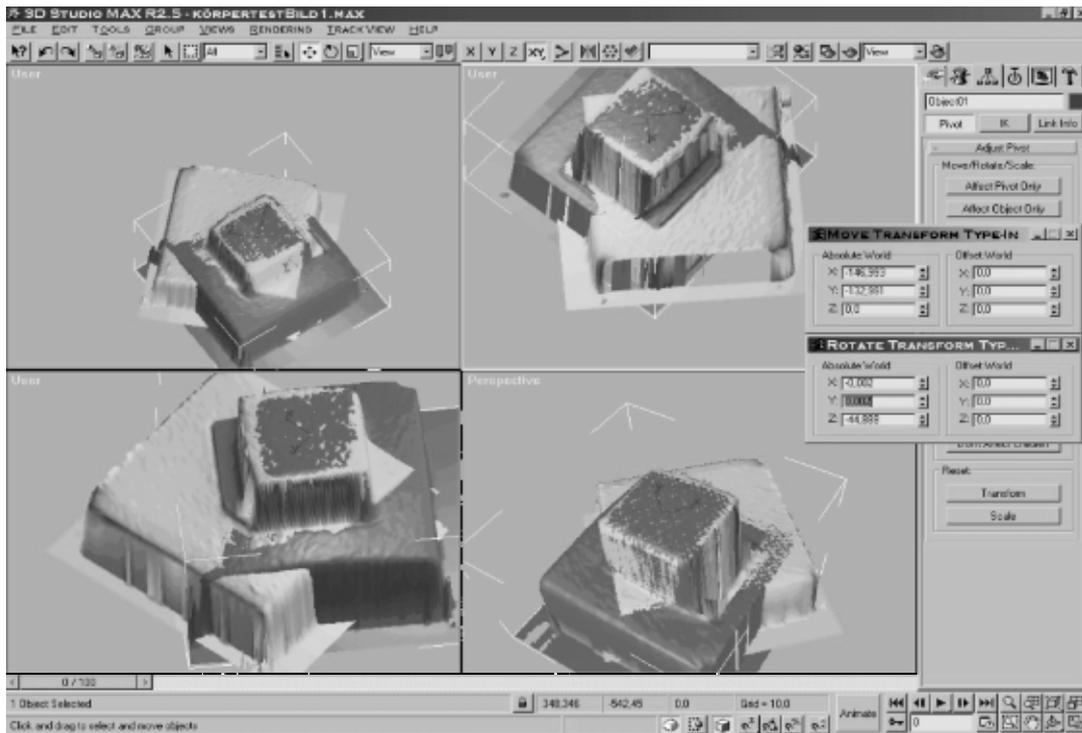


Abb. 33 c: Ermittlung der Abweichungsvektoren

#### 4.6. Statistische Auswertung

Die Auswertungen von 200 gescannten Zähnen ergaben für jeden Zahn sechs Werte, drei Rotations- und drei Translationsvektoren. Die Datenmenge entsprach 1200 Einzelwerten.

Die Auswertung der Verteilung für jeden der sechs Abweichungsvektoren mit der Statistiksoftware SPSS 10.0\*<sup>\*</sup> ergab, dass alle Werte der einzelnen Übertragungsfehler bezüglich Translation und Rotation beider Verfahren in einer Normalverteilung vorlagen. Zur Ermittlung eines signifikanten Unterschiedes zwischen den beiden Verfahren wurden die Daten jedes einzelnen Übertragungsfehlers beider Klebeverfahren einem t-Test für unabhängige Stichproben unterzogen.

\* SPSS, Chicago

In einer zweiten Statistik wurde jeder Übertragungsfehler der beiden Verfahren für die einzelnen Zahngruppen untersucht. Die Daten wurden nach Inzisivi, Eckzähnen und Prämolaren gruppiert, um den morphologischen Unterschieden Rechnung zu tragen. Dies sollte eine zuvor ermittelte signifikante Abweichung bei einem einzelnen Abweichungsvektor genauer spezifizieren, denn ein signifikanter ( $p < 0,05$ ) Unterschied in der Statistik für einen Übertragungsfehler für alle Zähne könnte seine Ursache in einer hochsignifikanten Abweichung ( $p < 0,001$ ) in einer bestimmten Zahngruppe haben. So könnten etwaige Schwächen bei den Verfahren in der Verschlüsselung bestimmter Zahnmorphologien ermittelt werden, da gerade die Einzelzahnmorphologie bei der Herstellung der Übertragungsschlüssel eine wichtige Rolle spielt.

Da die Werte für die einzelnen Zahngruppen ebenfalls in einer Normalverteilung vorlagen, sind die Zahngruppen der beiden Klebeverfahren ebenfalls einem t-Test für unabhängige Stichproben bezogen auf jeden einzelnen Übertragungsfehler unterzogen worden.

In beiden Statistiken wurde ebenfalls mittels Levene-Test für Varianzgleichheit das Ausmaß der Wertestreuung der Übertragungsfehler beider indirekter Klebeverfahren untersucht, weil gerade für eine objektive Beurteilung der Übertragungsgenauigkeit die Streuungswerte ein wichtiges Kriterium darstellt. Die graphische Darstellung der statistischen Werte ist zur besseren Übersichtlichkeit in Form von Boxplot-Diagrammen vorgenommen worden.

## 5. ERGEBNISSE

### 5.1. Optimierung der Messungen

Für den hier verwendeten Abstandssensor mit einem Messbereich von 0 - 10 Volt (10 mm) ergab diese Messreihe eine optimale Fokussierung des Laserstrahles bei Messspannungen zwischen 0 und 7 Volt. Bei diesen Spannungen wurde die gescannte Stufe von 1 mm als Spannungsänderung von einem Volt mit den wenigsten Zwischenspannungen (Teilschritten im Funktionsgraphen) angegeben (s. Abb. 34 a). Bei einem Scanvorgang zwischen 0-7 Volt und einer Schrittweite von 0,05 mm würde dies für die dreidimensionale Rekonstruktion bedeuten, dass ein Objekt mit einer Kante nicht scharf, sondern wie ein Übergang bzw. etwas abgerundet in diesem Bereich abgebildet wird. Stellt nun der Sensor eine scharfe Stufe beispielsweise mit drei Zwischenspannungen (-schritten) dar, ergäbe sich für die digitale graphische Rekonstruktion ein Übergang mit einer Länge von  $3 \times 0,05 \text{ mm} = 0,15 \text{ mm}$ .

Nach Ableitung der Daten dieser Messreihen ergaben sich Punktabbildungsfunktionen mit der größten Steigung (s. Abb. 34 b). Da sich in den Messspannungsbereichen zwischen 0 und 7 Volt die Datencharakteristik nicht änderte, seien hier die Graphen anhand eines repräsentativen Datensatzes aus einer Messreihe in einem Messspannungsbereich von 5 – 6 V dargestellt (s. Abb. 34 a und b). Die Analyse der Standardabweichung für die Abbildungsschärfe in x - und y - Richtung ergab einen Wert von 0,042 mm.

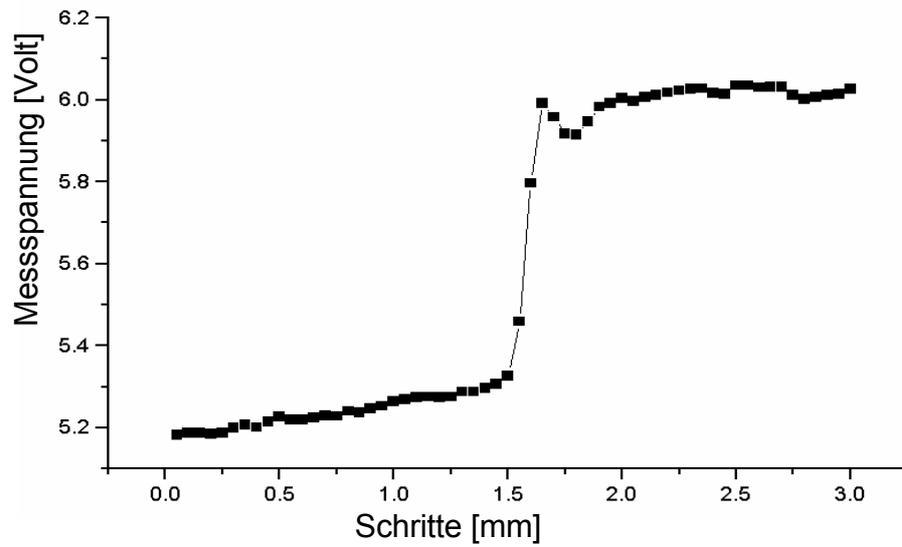


Abb. 34 a: Funktionsgraph der Messung einer Stufe von einem Millimeter im Messbereich zwischen fünf und sechs Volt

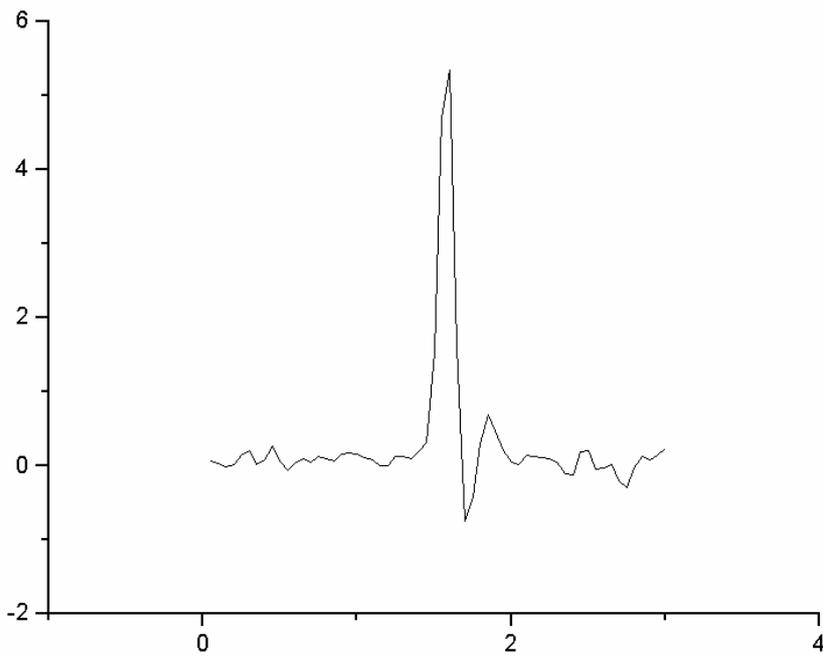


Abb. 34 b: Punktabbildungsfunktion des Funktionsgraphen  
Standardabweichung: 0,042 mm

Die Messspannungsbereiche ab 7 - 10 Volt wiesen ansteigend häufigere Zwischenspannungen und eine niedrigere Steigung in den Punktabbildungsfunktionen auf. Die Analyse der Standardabweichung ergab hier einen Wert von 0,087 mm. Dies sei hier ebenfalls anhand der Messreihe im Messspannungsbereich von 9 – 10 Volt dargestellt (s. Abb. 35 a und b).

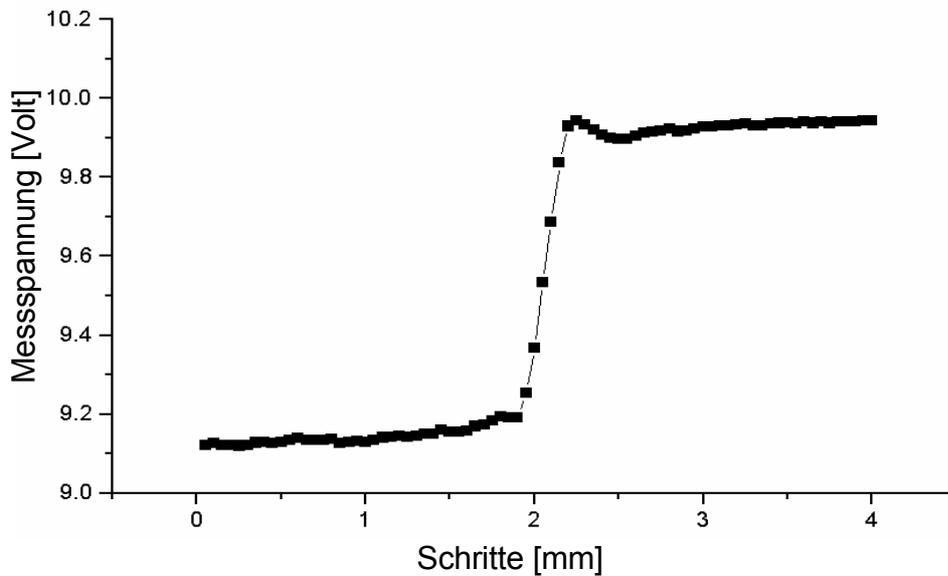


Abb. 35 a: Funktionsgraph der Messung einer Stufe von einem Millimeter im Messbereich zwischen neun und zehn Volt

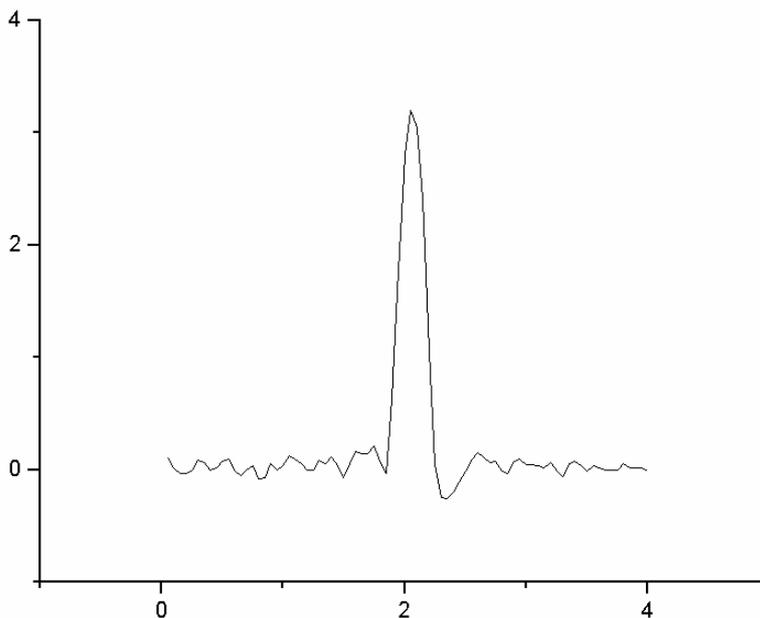


Abb. 35 b: Punktabbildungsfunktion des Funktionsgraphen.  
Standardabweichung: 0,087 mm

Da die Messreihe im Messbereich von 0 bis 7 Volt die beste Abbildungsschärfe des gescannten Objektes (Stufe 1 mm) zeigte, erfolgten dann auch die Messungen in diesem Messbereich.

## 5.2. Messgenauigkeit

Die Messungen der Gesamtmessgenauigkeit anhand der Probekörper mit einer eingearbeiteten translatorischen Abweichung von 2 mm und einer rotatorischen Abweichung von 45° ergaben im Mittel eine rotatorische Abweichung von 44,8° und eine translatorische Abweichung von 1,98 mm.

Der Summenvektor der translatorischen Abweichung ergab sich aus den Einzelvektoren in x- und y- Richtung nach der Formel:

$$c = \sqrt{a^2 + b^2}$$

Translationsvektor in x-Richtung: 1,47 mm;

Translationvektor in y-Richtung: 1,33 mm;

Translationsvektor in z-Richtung: 0 mm

$$\Rightarrow \sqrt{(1,47^2) + (1,33^2)} = 1,98$$

Das Messverfahren erzielte somit eine Genauigkeit von < 0,1 mm in der Translation. Die rotatorischen Abweichungen ließen lediglich Ungenauigkeiten bis 0,2° zu.

## 5.3. Die Übertragungsfehler

Eine Auflistung der Mittelwerte und Standardabweichungen der translatorischen und rotatorischen Abweichungen des generellen Vergleiches beider indirekten Klebverfahren liefert Tabelle 1.

	Verfahren	N	Mittelwert	Standard- abweichung
TRANSX	TZF	100	,204	,277
	TSV	100	-,004	,163
TRANSY	TZF	100	-,018	,314
	TSV	100	-,016	,224
TRANSZ	TZF	100	-,174	,128
	TSV	100	-,030	,083
ROTX	TZF	100	,676	3,524
	TSV	100	,271	2,329
ROTY	TZF	100	-3,186	2,895
	TSV	100	,554	1,744
ROTZ	TZF	100	,153	2,280
	TSV	100	,097	2,140

Tabelle 1: Mittelwerte und Standardabweichungen für den generellen Vergleich der Abweichungen beider indirekter Klebeverfahren (TZF=Tiefziehfolienverfahren, TSV=Transferschlüsselverfahren)

Die Wertestreuung und die signifikanten Abweichungen seien hier im einzelnen anhand der Boxplots in den Abbildungen 36 - 41 dargestellt (\*t-Test, +Levene-Test).

Bei der Betrachtung der Werte in den Diagrammen bedeutet ein positives Vorzeichen in der Translation immer ein Versatz in Richtung der betreffenden räumlichen Achse. Ein positives Vorzeichen bei der Betrachtung von Rotationsabweichungen bedeutet immer eine Rotation um die betreffende Raumachse im Uhrzeigersinn.

---

\*/+ p<0,05

\*\*/+ p<0,01

\*\*\*/+ p<0,001

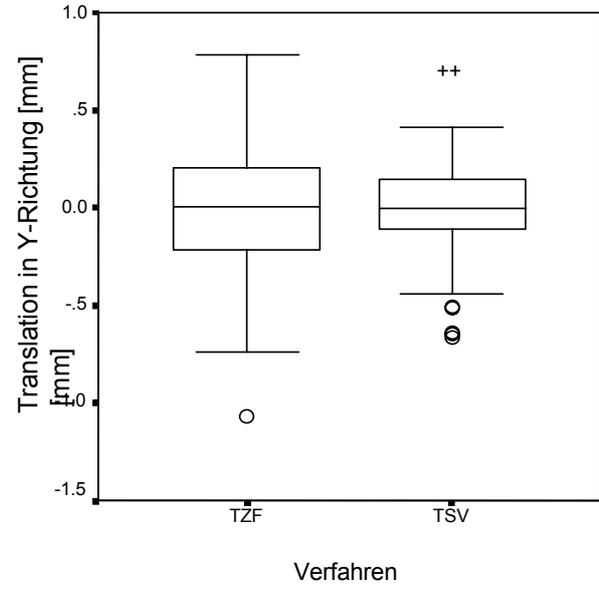
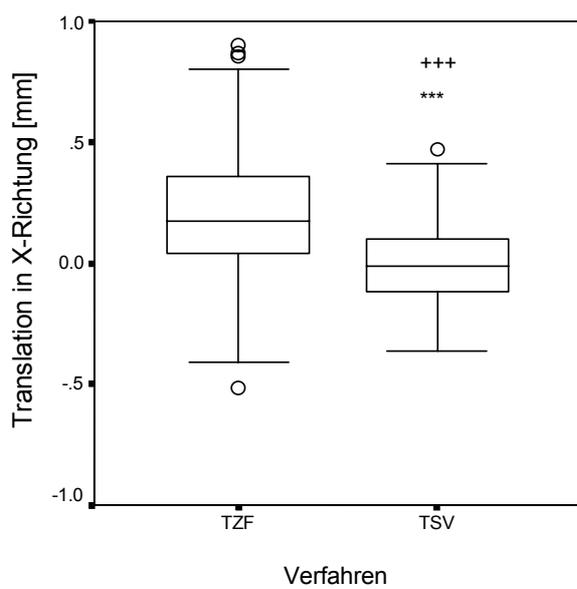


Abb. 36 und 37: Die Translationsabweichung in x-Richtung erreicht ein hochsignifikantes Niveau im t-Test. Im Levene-Test zeigen sich für die Translationsabweichungen in x- und in y-Richtung signifikante Unterschiede.

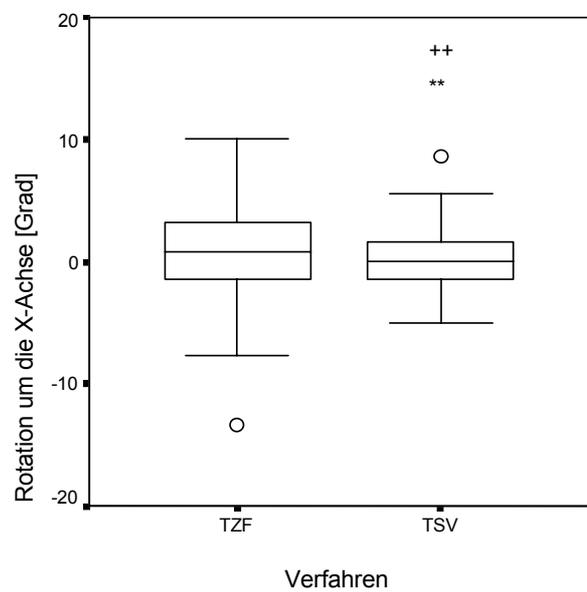
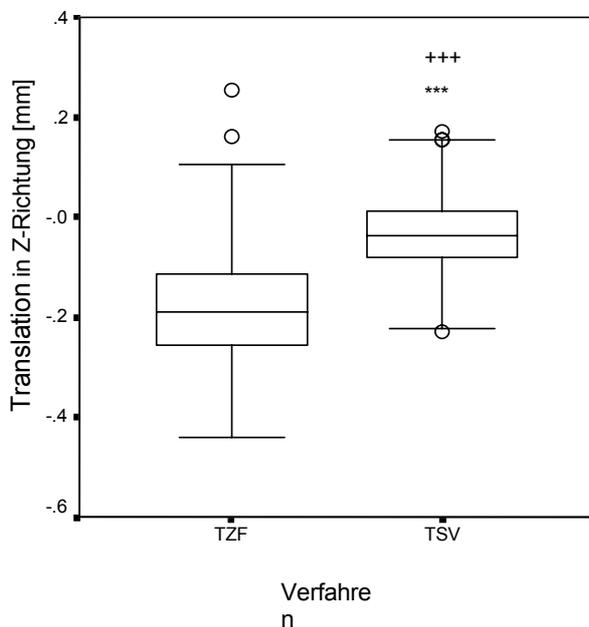


Abb. 38 und 39: Sowohl die Translationsabweichungen in z-Richtung als auch die Rotationsabweichungen um die x-Achse zeigten signifikante Unterschiede.

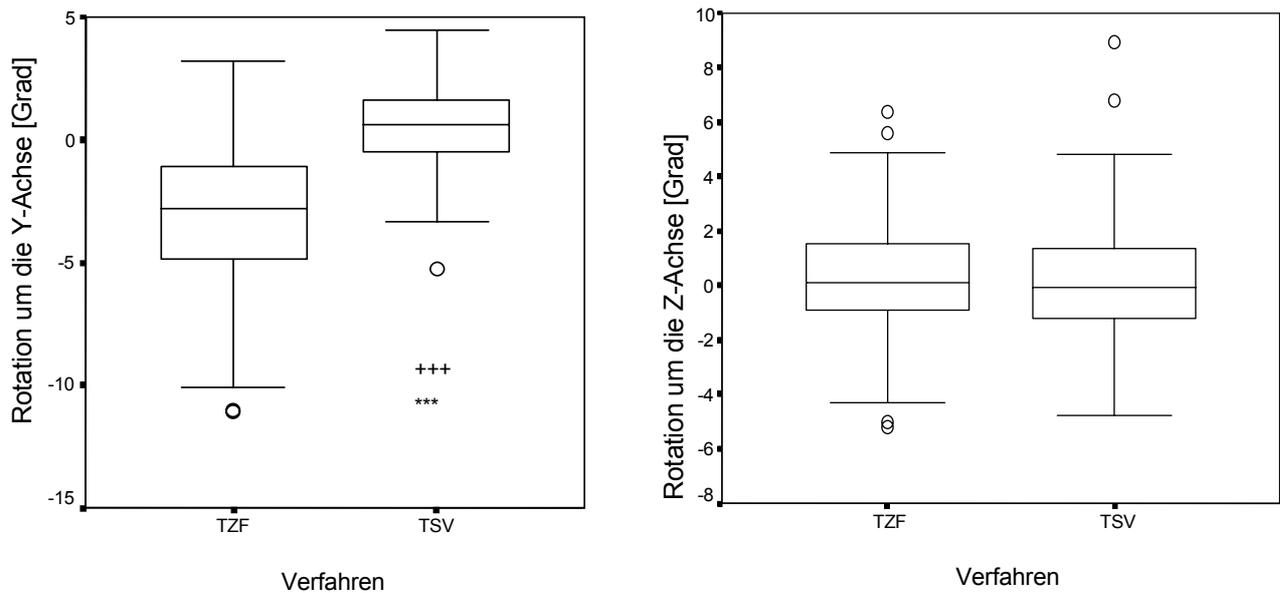


Abb. 40 und 41: Die Rotationsabweichungen um die y-Achse erreichten ein hochsignifikantes Niveau. Hingegen zeigten die Rotationsabweichungen um die z-Achse keine signifikanten Unterschiede.

Eine Übersicht über die Mittelwerte und Standardabweichungen der translatorischen und rotatorischen Abweichungen für die einzelnen Zahngruppen liefern Tabelle 2 - 4.

Inzisivi				
	Verfahren	N	Mittelwert	Standardabweichung
TRANSX	TZF	40	,162	,252
	TSV	40	,035	,147
TRANSY	TZF	40	,092	,295
	TSV	40	,017	,223
TRANSZ	TZF	40	,224	,081
	TSV	40	,039	,089
ROT_X	TZF	40	,100	2,227
	TSV	40	-,200	1,257
ROT_Y	TZF	40	-1,830	1,912
	TSV	40	,414	1,750
ROT_Z	TZF	40	-,206	1,903
	TSV	40	-,083	2,433

Tabelle 2: Mittelwerte und Standardabweichungen bei den Inzisivi

### Eckzähne

	verfahren	N	Mittelwert	Standard- abweichung
TRANSX	TZF	20	,185	,330
	TSV	20	,062	,209
TRANSY	TZF	20	-,296	,348
	TSV	20	-,114	,182
TRANSZ	TZF	20	,117	,135
	TSV	20	,002	,106
ROT_X	TZF	20	1,108	2,574
	TSV	20	,371	2,228
ROT_Y	TZF	20	-1,332	2,811
	TSV	20	-,039	1,416
ROT_Z	TZF	20	1,108	2,574
	TSV	20	,633	2,284

Tabelle 3: : Mittelwerte und Standartabweichungen bei den Eckzähnen

### Prämolaren

	verfahren	N	Mittelwert	Standard- abweichung
TRANSX	TZF	40	,257	,272
	TSV	40	-,076	,124
TRANSY	TZF	40	,013	,225
	TSV	40	,000	,236
TRANSZ	TZF	40	,152	,139
	TSV	40	,030	,060
ROT_X	TZF	40	,150	2,298
	TSV	40	-,136	1,419
ROT_Y	TZF	40	-3,687	2,777
	TSV	40	,600	1,419
ROT_Z	TZF	40	,034	2,395
	TSV	40	,009	1,725

Tabelle 4: : Mittelwerte und Standartabweichungen bei den Prämolaren

Die Wertestreuung und die signifikanten Abweichungen bei den einzelnen Zahngruppen seien hier im einzelnen anhand der Boxplots in den Abbildungen 42-45 dargestellt (\*t-Test, +Levene-Test).

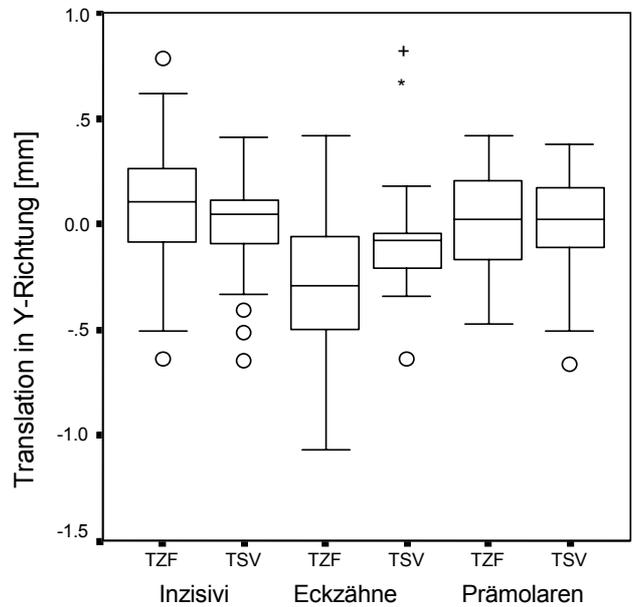
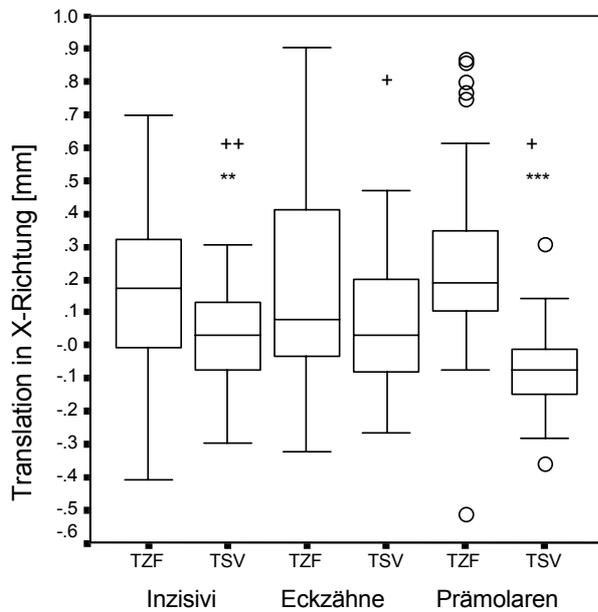


Abb. 42 und 43: Die Inzisivi und Prämolaren zeigen signifikante Abweichungen in x-Richtung (vertikale Positionierungsfehler). Die Eckzähne zeigen lediglich geringere Signifikanzen im Levene-Test. Die Translationsabweichungen in y-Richtung (mesio-distale Positionierungsfehler) zeigen lediglich bei den Eckzähnen ein niedrig signifikantes Niveau für beide Tests.

\*/<sup>+</sup> p<0,05

\*\*/<sup>++</sup> p<0,01

\*\*\*/<sup>+++</sup> p<0,001

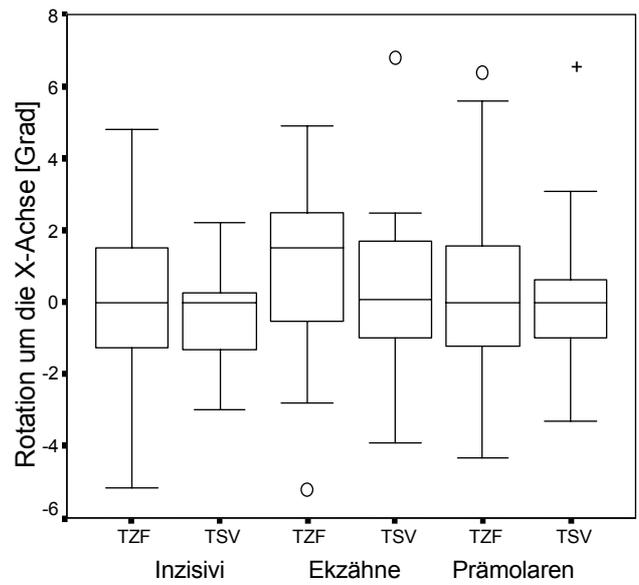
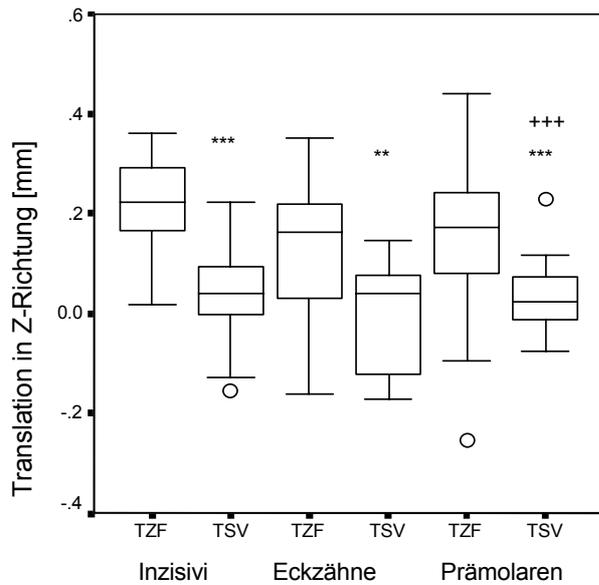


Abb. 44 und 45: Alle Zahngruppen zeigten signifikante Abweichungen im t-Test für die Translationsabweichungen in z-Richtung (Klebspaltdicke). Die Prämolaren erreichten hierbei auch im Levene-Test ein hochsignifikantes Niveau. Die Rotationsabweichungen um die x-Achse zeigten lediglich für die Prämolaren ein niedrig signifikantes Niveau im Levene-Test für Varianzgleichheit.

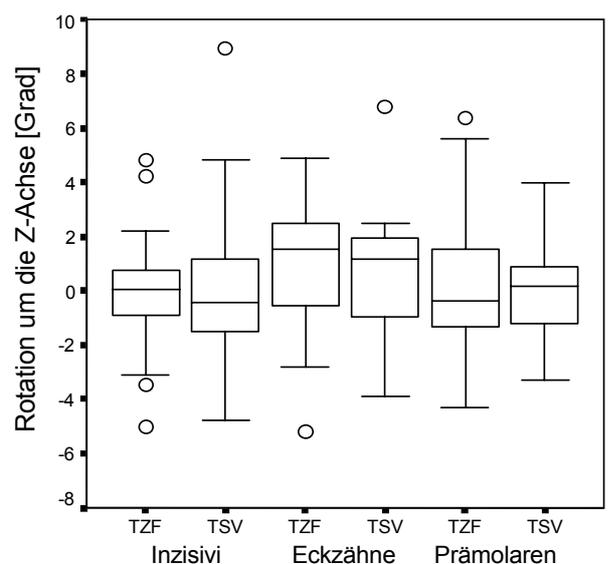
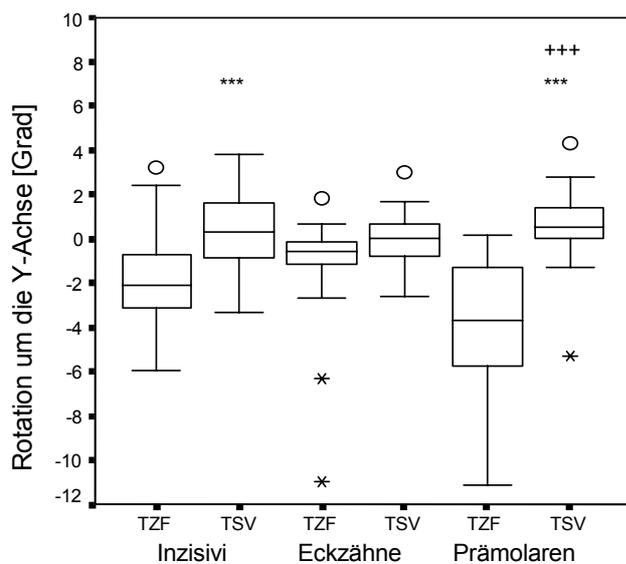


Abb. 46 und 47: Bei den rotatorischen Abweichungen um die y-Achse (Torquewirkung) erreichten die Inzisivi und die Prämolaren ein hochsignifikantes Niveau im t-Test. Ebenso zeigen die Prämolaren im Levene-

Test ein hochsignifikantes Niveau. Hingegen zeigten die Rotationsabweichungen um die z-Achse (Angulationsfehler) keinerlei signifikante Abweichungen.

## 6. DISKUSSION

### 6.1. Fehlerquellen des Messverfahrens

#### 6.1.1 Abschattungsphänomene

Ein Nachteil dieses Messverfahrens liegt in dem Triangulationsverfahren begründet. Eine Abstandsmessung konnte nur erfolgen, wenn die reemittierte Strahlung des Lasers von dem bestrahlten Objekt an der Empfangsoptik ankommt (s. Abb. 22 b Kap. 4). Wird der Strahlengang der reemittierten Strahlung durch Teile des zu scannenden Objektes unterbrochen, so erfolgt eine Fehlmessung, welche sich in einem hohen Messwert äußert. Dies wiederum erscheint in der dreidimensionalen Rekonstruktion als ein Peak. Typischerweise traten solche Abschattungsphänomene an tiefen, engen Rillen auf. Deshalb wurde darauf geachtet, dass die Zähne mit den geklebten Brackets so ausgerichtet wurden, dass möglichst wenig Abschattungsphänomene auftraten. Die Bereiche, die dann für solche Erscheinungen für die dreidimensionale Rekonstruktion in Frage kamen, konnten durch den dargestellten Peak leicht identifiziert werden. Dementsprechend wurden sie für die Auswertung mittels Überlagerung erkannt und berücksichtigt. Eine Verbesserung dieses Verfahrens läge sicherlich in der Entwicklung einer Auswertungssoftware, welche die Ermittlung der bestmöglichen Überlagerungsposition der Grafiken mittels eines Annäherungsalgorithmus leisten könnte. Jedoch liegt in den oben geschilderten Abschattungsphänomenen das Hauptproblem, da diese in der Überlagerungsfunktion nicht eingehen dürften. Darum wäre eine Grundvoraussetzung für diese Software eine Art variable Selektivität in Bezug auf die zu berücksichtigenden Bereiche des Datensatzes, da es nicht nur gilt die Peaks der Abschattungen, sondern auch gezielt zunächst die Brackets und später die Zähne bei der Berechnung zu eliminieren. So gelänge die bestmögliche Überlagerung zunächst der Zähne und dann der Brackets, um den exakten Unterschied zwischen Soll- und Istposition zu ermitteln. Die Lösung dieses Problems würde über den Rahmen dieser Untersuchung hinaus

gehen, jedoch soll betont werden, dass gerade durch die optische Auswertung diese Abschattungsphänomene zuverlässig identifiziert wurden und in der Überlagerung ausgewählter Bereiche berücksichtigt wurden.

Des weiteren stellten die oberflächenspezifischen Effekte der hier zu untersuchenden Materialien das größte Problem dar.

Das hier angewendete Triangulationsmessverfahren beruht auf dem Prinzip der Reflexion der bestrahlten Oberfläche des Messobjektes. Die physikalischen Eigenschaften der Messobjekte und die Beschaffenheit der Oberflächen haben erheblichen Einfluss auf deren Reflexionsverhalten bei der Bestrahlung mit einem Laserstrahl. Aus diesem Grund sollen hier die möglichen Effekte diskutiert werden.

### 6.1.2. Oberflächenabhängige Effekte

Hier seien die grundsätzlichen Oberflächentypen und ihr Einfluss auf das Reflexionsverhalten dargestellt. Abbildung 48 zeigt die vier grundsätzlich anzunehmenden Oberflächentypen mit ihrem Reflexionsverhalten:

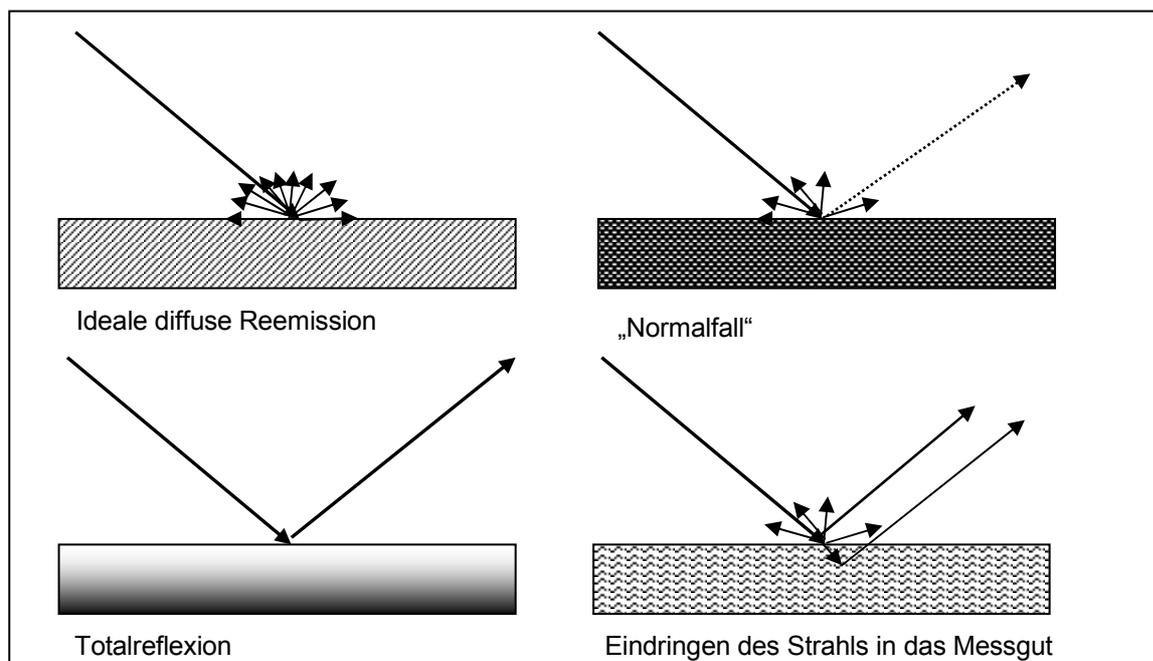


Abb. 48: Zwischen diesen grundsätzlichen Oberflächentypen existieren beliebig viele Zwischenstufen.

Die Totalreflexion des Messstrahles tritt an einer spiegelnden Oberfläche wie z. B. bei verchromten, hochglanzpolierten Teilen oder an einem Spiegel auf (Hecht [15]). Dies kann zu einer fehlenden Reemission an die Empfangsoptik führen, wenn die Totalreflexion an der Optik vorbei führt.

Den Idealfall stellt die diffuse Reemission dar, da hierbei das Licht vom Auftreffpunkt in alle Richtungen gleichmäßig reemittiert wird (Hecht [15]). Dies ist selten anzutreffen. Diese Art der Reemission tritt annähernd bei feinematten Oberflächen auf.

Der Normalfall ist eine Mischung aus Totalreflexion und diffuser Reemission, wobei ein Großteil des eingebrachten Lichtes in der Achse der direkten Reflexion abgestrahlt wird, während ein weiterer Teil diffus reemittiert wird (Hecht [15]).

Bei Kunststoffen dringt der Messstrahl eine gewisse Strecke in das zu messende Material ein. Damit wird der am Sensor abgebildete Leuchtpunkt um den Betrag der Eindringtiefe erweitert, so dass die Messgenauigkeit negativ beeinflusst wird.

Die in dieser Studie untersuchten Materialien - der polierte Edelstahl der Brackets und der Kunststoff der Zähne - sind in ihrer Kombination als zu scannendes Objekt eher als ungünstig zu bewerten. Aufgrund des zuvor beschriebenen Zusammenhangs zwischen den Materialeigenschaften und dem Reemissionsverhalten der Messobjekte wurden die Kunststoffzähne mit den beklebten Brackets mittels mattweißem Lack behandelt, um so die möglichst idealere diffuse Reemission zu erreichen. Durch die Mattierung der Kunststoffzähne und der Brackets gelang es, ein Reflexionsverhalten zu erzeugen, welches für beide Materialien annäherungsweise gleich war. Dies spiegelte sich beispielsweise in den Messwerten für die Translation in z-Richtung wieder, die nach statistischer Auswertung eine signifikante Abweichung in der Klebspaltdichte ergaben.

Da der unverdünnte Lack zu viel aufgetragen hätte, empfahl sich seine Verdünnung. Die optimale Konsistenz des Lackes wurde anhand einer Verdünnungsreihe ermittelt. Das optimale Verhältnis ergab wenig Materialauftrag bei maximal gleichmäßiger Mattierungswirkung und betrug 100:60 (Innenraumlack seidenmatt : Verdünnung für Innenraumlack).

### 6.1.3. Optimierung der Messgenauigkeit

Aus den Ergebnissen der Untersuchung der Abbildungsschärfe mittels statistischer Analyse der Punktabbildungsfunktionen ergab sich eine Optimierung des Messverfahrens durch die Begrenzung des Messbereiches von 0 und 10 Volt auf 0 und 7 Volt.

Des Weiteren muss festgehalten werden, dass sich in diesem Messbereich für eine optimale Auflösung in x- und y- Richtung eine Schrittweite von etwas weniger als die Standardabweichung empfohlen hätte. Jedoch hat sich eine Schrittweite von 0,1 mm in x- und y- Richtung als Kompromiss in dieser Studie bewährt, da so der Aufwand in einem besseren Verhältnis zum Nutzen stand. Wie in einem zuvor beschriebenen Beispiel ergab ein Scanraster für einen Zahn mit einer Dimension von 7 x 12 mm bei einer Schrittweite von 0,1 mm einen Datensatz von  $(7 \times 10) \times (12 \times 10) = 8400$  Einzeldaten.

Die Anzahl der Schritte in x- und y- Richtung geht mit der zweiten Potenz in die Datenmenge ein. Wird die Schrittweite in der x- und y- Richtung halbiert, so erhöht sie die Anzahl der Abstandsmessungen um den Faktor vier ( $2^2$ ). Schrittweiten von 0,05 mm ergaben somit für eine identische Rasterdimension einen Datensatz von  $(7 \times 20) \times (12 \times 20) = 33.600$  Einzeldaten. Dies entspricht einem quadratischen Anstieg der Datenmenge.

Die Größe der Datenmenge korreliert direkt mit der nötigen Arbeitszeit des Scanners. Somit steigt auch die nötige Scanzeit im direkt quadratischen Verhältnis. Schrittweiten unterhalb von 0,05 mm wurden ebenfalls analysiert. Insgesamt muss jedoch betont werden, dass der erheblich größere Zeitaufwand kleinerer Schrittweiten als 0,1 mm in keinem effektiven Verhältnis

zu der Auflösungsverbesserung stand, da diese nach digitaler Rekonstruktion der Datensätze in der späteren Auswertung optisch kaum erfassbar waren.

#### 6.1.4. Alternative Messverfahren

Die Ausführung dieser Studie als in vitro Studie an einem Phantomarbeitsplatz mit einem Phantompatienten schaffte reproduzierbare Verhältnisse. So lagen für jedes indirekte Klebverfahren die gleichen Umstände während des Klebens vor. Dies galt sowohl für die Einzelzahnmorphologie, da es sich um identische Zähne handelte, als auch für die Morphologie des Zahnbogens und die immer gleichbleibenden „intraoralen“ Verhältnisse während des Klebevorgangs. Mit diesem Messverfahren und insbesondere mit diesem Versuchsaufbau können weitere unterschiedliche bzw. modifizierte indirekte Bracket-Klebverfahren bezüglich ihrer Fähigkeit, eine Bracketposition reproduzierbar zu verschlüsseln, untersucht werden.

Die Analyse der Diskrepanz in der Bracketposition sollte dreidimensional erfolgen, um wirklich den gesamten Übertragungsfehler zu ermitteln. Dies setzte voraus, dass die Soll- und die Istposition der Brackets dreidimensional erfasst wurden. Die dreidimensionale Erfassung musste zudem eine Analyse der Bracketposition anhand der Beschreibung der sechs räumlichen Freiheitsgrade ermöglichen. Deshalb wurde für diese Studie eine Scanvorrichtung installiert, welche die dreidimensionale Erfassung und digitale Rekonstruktion der temporär- und definitiv beklebten Zähne ermöglichte. Grundsätzlich sind optische Messverfahren problematisch zu bewerten, wenn die Messobjekte viele Unterschnitte aufweisen. Der Versuch ein mit Brackets beklebtes Modell mittels Lichtschnittverfahren - auch bekannt als Moriè-Verfahren - zu vermessen scheiterte aufgrund des hohen Detailreichtums und der vielen Unterschnitte. Dieses Verfahren bot zudem eine zu geringe Auflösung. Für eine exakte dreidimensionale Auswertung der Bracketpositionen auf dem Gipsmodell und der Position nach der Klebung am Phantompatienten kamen auch keine fotometrischen Verfahren in Frage.

## 6.2. Schlussfolgerungen

Die herausgestellten Abweichungen zeigten, dass das indirekte Klebeverfahren mittels Tiefziehfolie insgesamt einen höheren Streubereich in der Positionierungsabweichung hat. Obwohl hier nicht immer ein Signifikanzniveau erreicht wurde, spricht dies für eine geringere Übertragungsgenauigkeit. Die Werte der vertikalen Abweichungen, die rotatorischen Diskrepanzen um die y-Achse und der erhöhte Klebespalt bei dem Tiefziehfolienverfahren haben hingegen deutlich signifikante Abweichungen ergeben. Der signifikant höhere Übertragungsfehler in der Vertikalen beim Klebeverfahren mittels Tiefziehfolien und die rotatorischen Abweichungen um die y-Achse, also um die Slotachse, dürfen nicht getrennt betrachtet werden. Diese Werte sind miteinander gekoppelt, da aufgrund der konvexen Zahnoberfläche eine Bracketpositionierung weiter oberhalb auf der Kronenlängsachse eine Rotation um die Slotachse zur Folge hat. Dieser Zusammenhang spiegelte sich auch in den signifikanten Unterschieden für die Prämolaren wider. Sie erreichten ein hochsignifikantes Niveau bei dem Translationsfehler in x-Richtung und bei dem Rotationsfehler um die y-Achse.

Hingegen ist die Konstruktion der Übertragungsschlüssel des Set up tauglichen Verfahrens so ausgelegt, dass möglichst die vertikale und die mesio-distale Positionierung exakt erfasst wird. Eine Beweglichkeit des Brackets um die Slotachse soll durch die Verwendung des Rundstahls gewährleistet bleiben. Dadurch wird eine exakte und flächige Anlagerung des Brackets an das Arbeitsmodell und später an die Zähne des Patienten realisierbar. Die exaktere vertikale Positionierung und die geringere Streuung der Positionierungsabweichungen zeigen, dass dieses indirekte Klebeverfahren gegenüber dem Tiefziehfolienverfahren überlegen ist.

Hingegen zeigten die ermittelten Werte für Rotationsfehler, welcher zu ungewünschten Angulationen führen, keinen Unterschied zwischen den beiden Verfahren. Bei den Eckzähnen zeigten sich lediglich signifikante Unterschiede für die Klebespaltstärke. Ansonsten waren für diese Zahngruppe die Unterschiede nicht signifikant. Die Eckzahnmorphologie schien in beiden Verfahren eine gleich gute Übertragung der Brackets zu ermöglichen.

Bei dem Tiefziehfolienverfahren wurde hingegen die möglichst flächige Adaptation der Brackets durch ein leichtes Wippen der Folie erschwert. Die materialspezifische Elastizität der Tiefziehfolie und die schlechte Sicht auf die Brackets waren wohl die Hauptursache für die regelmäßig auftretenden hohen Streubreiten der Werte für die einzelnen Übertragungsfehler. Des Weiteren mag wohl die nicht spannungsfrei auf den Zähnen ruhende Tiefziehfolie der Grund für die breiteren Klebespalten sein. Die Folie neigte beim Aufsetzen auf die Zähne bei der Klebung am Patienten dazu, sich kaum merklich von den Zähnen abzuheben.

Die großen Diskrepanzen in der vertikalen Positionierung sind wohl eine Folge des Herstellungsprozesse beim „Tiefziehen“ der Folie. Die Folie wurde nach den Herstellervorgaben auf 220°C erhitzt und dann unter Druckluft auf das Modell mit den temporär fixierten Brackets aufgebracht und auf Raumtemperatur abgekühlt. Bei dem verwendeten Biostar Gerät wurde der Verarbeitungsvorgang der Folien elektronisch gesteuert. Der Arbeitsablauf und die einzelnen Schritte bei der Herstellung der Tiefziehschablone waren auf einem eingebauten Computerchip mittels Code-System gespeichert. Alle folienspezifischen Daten wie Anheiztemperatur, Anheizdauer und Abkühlzeit waren nicht manipulierbar und sollten den Herstellerangaben zufolge eine konstante und optimale Verarbeitungsqualität gewährleisten. Somit ist anzunehmen, dass die Verarbeitung der Folien konstant und in optimaler Qualität erfolgte. Aufgrund des thermoplastischen Expansionsverhaltens, welches allen Kunststoffen eigen ist, erfuhr die Folie während der Erhitzung eine Volumenzunahme. Während des eigentlichen „Tiefziehvorgangs“ wurde sie dann unter Druckluft auf das Modell gezogen und abgekühlt. Während der Erkaltungsphase entstehen Kontraktionsspannungen, da nun die Folie aufgrund der sinkenden Temperatur wieder an Volumen verliert. Die Volumenabnahme resultierte letztendlich in einem Versatz der Brackets nach okklusal bzw. inzisal. Dies ist umso verständlicher, wenn man sich vergegenwärtigt, dass bei dem Tiefziehvorgang die Folie bei der Erfassung von vertikalen Strukturen am stärksten gedehnt wurde und sich somit auch in dieser Richtung die thermoplastischen Deformationen am stärksten auswirkten. Dies könnte auch den signifikant höheren Translationsfehler nach inzisal insbesondere und gerade bei den Inzisivi erklären.

In der Konsequenz bedeutet eine Fehlpositionierung nach okklusal bzw. inzisal bei Zähnen mit ausgeprägter Kronenkurvatur auch eine Rotation um die Slotachse, so dass neben ungewünschten Intrusionsbewegungen noch mit einer zusätzlichen Torquewirkung zu rechnen ist. Die Vergrößerung des Klebebspaltes führt zu verringerten Haftkräften wobei es zu höheren Bracketverlusten (*Hocevar und Vincent [16]*) und somit indirekt zu Behandlungsverzögerungen kommt. Somit würde sich ein Vorteil des indirekten Klebeverfahrens relativieren.

### 6.3. Ausblick

Mit dem hier vorgestellten Laser-Messverfahren war es erstmals möglich, den Übertragungsfehler verschiedener indirekter Bracket-Adhäsiv-Techniken zu identifizieren und diesen einem quantitativen Vergleich in Bezug auf das Klebeergebnis zu unterziehen. Die besonderen Vorteile dieses Verfahrens lagen in der Analyse der Bracketposition anhand der dreidimensional rekonstruierten Grafiken. Sie ermöglichten den Vergleich der Bracketposition in allen Richtungen des Raumes. Dies war die Grundvoraussetzung für die Ermittlung des Übertragungsfehlers.

So könnten zuvor geschilderte Methoden zur optimierten Bracketpositionierung am Arbeitsmodell durch Anwendung eines Verfahrens mit möglichst kleinem Übertragungsfehler auch effizient am Patienten realisiert werden. Beispielsweise wäre eine am Arbeitsmodell individualisierte Bracketbasis bzw. Bracketposition mittels Slot Machine nur sinnvoll, wenn die Übertragungsfehler nicht größer als die eingestellten Individualisierungen sind. Wo läge der Sinn, wenn ein um 2° bukkalen Wurzeltoque angepasstes Bracket mit einem Verfahren übertragen wird, welches im Schnitt einen Übertragungsfehler bezüglich der Inklination – beispielsweise durch unsaubere Adaptation an die Zahnoberfläche – von + / - 1,5° (also bis zu 3°) aufweist? Eine adäquate indirekte Bracket-Adhäsiv-Technik kann mit diesem Verfahren ermittelt und „Verbesserungen“ der Verfahren können objektiviert werden.

## 7. LITERATURVERZEICHNIS

1. Aguirre MJ, King GJ, Waldron JM: Assessment of bracket placement and bond strength when comparing direct bonding to indirect bonding techniques. *Am J Orthod* 82 (1982), 269-276
2. Aguirre MJ: Indirect bonding for lingual cases. *J Clin Orthod* 18 (1984), 565-569
3. Andrews LF: The Six keys to normal occlusion. *Am J Orthodont* 62 (1972), 296-309
4. Andrews LF: The straight-wire-appliance explained and compared. *J Clin Orthod* 10 (1976), 174-195
5. Balut N, Klapper L, Sandrik J, Bowman D: Variations in bracket placement in the preadjusted orthodontic appliance. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 102 (1992), 62-67
6. Brandt S, Servoss JM, Wolfson J: Practical methods of bonding direct and indirect. *J Clin Orthod* 9 (1975), 610-621
7. Creekmore TD, Kunik RL: Straight wire: The next generation. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 104 (1993), 8-20
8. Dellinger EL: A scientific assessment of the straight-wire appliance. *Am J Orthod* 73 (1978), 290-299
9. Diedrich P: Die linguale Bracketfixation – Problematik und erste klinische Erfahrungen. *Fortschr Kieferorthop* 45 (1984), 65-72
10. Drescher D, Holtkamp C, Gisbertz M: Die Herstellung des diagnostischen Set up. *Quintessenz Zahntech* 16 (1990), 1341-1351
11. Garn NW: Direct bonding: a clinical study using an ultraviolet-sensitive adhesive system. *Am J Orthod* 69 (1976), 455-463

12. Germane N, Bentley BE, Isaacson RJ: Three biologic variables modifying faciolingual tooth angulation by straight-wire appliances. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 96 (1989), 312-319
13. Hablutzel W: Direct bonding in orthodontics. *Schweiz Monatsschr Zahnheilkd* 86 (1976), 236-259
14. Hasund A, Rudzki-Janson I, Bingler P in: Diedrich P (Hrsg.): *Praxis der Zahnheilkunde Bd. 11, Kieferorthopädie II. 4. Auflage.* Urban & Fischer, München 2000, 189-220
15. Hecht E: *Optik. 3. Auflage.* Addison-Wesley Verlag, Bonn 1994
16. Hocevar RA, Vincent HF: Indirect versus direct bonding: bond strength and failure location. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 94 (1988), 367-371
17. Hoffman BD: Indirect bonding with a diagnostic setup. *J Clin Orthod* 22 (1988), 509-511
18. Jost-Brinkmann PG: Indirektes Kleben nach Set-up. *Quintessenz* 2 (1990), 251-261
19. Kasrovi PM, Timmins S, Shen A: A new approach to indirect bonding using light-cure composites. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 11 (1997), 652-656
20. Koo BC, Chung CH, Vanarsdall RL: Comparison of the accuracy of bracket placement between direct and indirect bonding techniques. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 116 (1999), 346-351
21. Mahony D: An update on the indirect-bonding technique (non-custom base). *J Gen Orthod* 10 (1999), 7-14
22. Maino BG, Cociani S, Pagin P: New indirect method of orthodontic bracket application. *Mondo Ortod* 15 (1990), 561-565
23. McAlarney ME, Brenn P: A modified direct technique versus conventional direct placement of brackets: in vitro bond strength comparison. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 104 (1993), 575-583

24. McLaughlin D: Bonding in Orthodontics – With Emphasis on the Indirect Method. *Int J Orthod* 15 (1977), 6-21
25. McLaughlin RP, Bennett JC: Bracket placement with the preadjusted appliance. *J Clin Orthod* 29 (1995), 302-311
26. Meyer M, Nelson G: Preadjusted edgewise appliances: Theory and practice. *Am J Orthod* 73 (1978), 485-498
27. Milne JW, Andreasen GF, Jakobsen JR: Bond strength comparison: a simplified indirect technique versus direct placement of brackets. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 96 (1989), 8-15
28. Moin K, Dogon IL: Indirect bonding of orthodontic attachments. *Am J Orthod* 72 (1977), 261-275
29. Newman GV: Direct and indirect bonding of brackets. *J Clin Orthod* 8 (1974), 264-272
30. Optoelektrische Messtechnik, Produktübersicht. Laser Components GmbH
31. Read MJ: Indirect bonding using a visible light cured adhesive. *Br J Orthod* 14 (1987), 137-141
32. Reichheld SJ, Ritucci RA, Gianelly AA: An indirect bonding technique. *J Clin Orthod* 24 (1990), 21-24
33. Roth RH: Behandlungsmechanik für die Straight-Wire-Apparatur in: Graber TM, Swain BF (Hrsg.): Grundlagen und moderne Techniken der Kieferorthopädie. Quintessenz Verlags-GmbH, Berlin 1989, 851-912
34. Schmuth GPF, Holtgrave EA, Drescher D: Checkliste der Zahnmedizin. Kieferorthopädie. Thieme, Stuttgart 1997
35. Silverman E, Cohen M, Gianelly AA, Dietz VS: A universal direct bonding system for both metal and plastic brackets. *Am J Orthod* 62 (1972), 236-244
36. Silverman E, Cohen M: A report on a major improvement in the indirect bonding technique. *J Clin Orthod* 9 (1975), 270-276

37. Simmons MD: Improved Laboratory Procedure For Indirect Bonding Of Attachments. *J Clin Orthod* 12 (1978), 300-302
38. Sondhi A: Efficient and effective indirect bonding. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 115 (1999), 352-359
39. Thomas RG: Indirect bonding: simplicity in action. *J Clin Orthod* 13 (1979), 93-106
40. Trimpeneers LM, Dermaut LR: A clinical trial comparing the failure rates of two orthodontic bonding systems. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 110 (1996), 547-550
41. Vardimon AD: Das diagnostische Set up. *Fortschr Kieferorthop* 47 (1986), 141-156
42. Vardimon AD: Statistical evaluation of torque angles in reference to straight-wire- appliance theories. *Am J Orthod* 89 (1986), 56-66
43. Zachrisson BU, Brobakken BO: Clinical comparison of direct versus indirect bonding with different bracket types and adhesives. *Am J Orthod* 74 (1978), 62-78

## 8. ANHANG

### Testergebnisse des generellen Vergleiches beider indirekter Bracket-Adhäsiv-Techniken

Test bei unabhängigen Stichproben

		Levene-Test der Varianzgleichheit		T-Test für die Mittelwertgleichheit		
		F	Signifikanz	T	df	Sig. (2-seitig)
TRANSX	Varianzen sind gleich	16,422	,000	6,483	198,000	,000
	Varianzen sind nicht gleich			6,483	159,984	,000
TRANSY	Varianzen sind gleich	10,131	,002	-,034	198,000	,973
	Varianzen sind nicht gleich			-,034	179,334	,973
TRANSZ	Varianzen sind gleich	11,487	,001	-9,425	198,000	,000
	Varianzen sind nicht gleich			-9,425	170,033	,000
ROTX	Varianzen sind gleich	9,878	,002	,961	198,000	,338
	Varianzen sind nicht gleich			,961	171,619	,338
ROTY	Varianzen sind gleich	17,983	,000	-11,068	198,000	,000
	Varianzen sind nicht gleich			-11,068	162,497	,000
ROTZ	Varianzen sind gleich	,300	,585	,178	198,000	,859
	Varianzen sind nicht gleich			,178	197,205	,859

Testergebnisse für die einzelnen Zahngruppen des Vergleiches beider  
indirekter Bracket-Adhäsiv-Techniken

Inzisivi

		Levene-Test der Varianzgleichheit		T-Test für die Mittelwertgleichheit		
		F	Signifikanz	T	df	Sig. (2-seitig)
TRANSX	Varianzen sind gleich	8,644	,004	2,768	78,000	,007
	Varianzen sind nicht gleich			2,768	62,704	,007
TRANSY	Varianzen sind gleich	2,793	,099	1,282	78,000	,204
	Varianzen sind nicht gleich			1,282	72,600	,204
TRANSZ	Varianzen sind gleich	,033	,855	9,666	78,000	,000
	Varianzen sind nicht gleich			9,666	77,344	,000
ROT_X	Varianzen sind gleich	8,815	,004	,743	78,000	,460
	Varianzen sind nicht gleich			,743	61,559	,461
ROT_Y	Varianzen sind gleich	,350	,556	-5,475	78,000	,000
	Varianzen sind nicht gleich			-5,475	77,394	,000
ROT_Z	Varianzen sind gleich	1,043	,310	-,252	78,000	,802
	Varianzen sind nicht gleich			-,252	73,726	,802

## Eckzähne

		Levene-Test der Varianzgleichheit		T-Test für die Mittelwertgleichheit		
		F	Signifikanz	T	df	Sig. (2-seitig)
TRANSX	Varianzen sind gleich	5,006	,031	1,408	38,000	,167
	Varianzen sind nicht gleich			1,408	32,177	,169
TRANSY	Varianzen sind gleich	5,864	,020	-2,070	38,000	,045
	Varianzen sind nicht gleich			-2,070	28,689	,048
TRANSZ	Varianzen sind gleich	1,324	,257	2,982	38,000	,005
	Varianzen sind nicht gleich			2,982	35,981	,005
ROT_X	Varianzen sind gleich	,732	,398	,968	38,000	,339
	Varianzen sind nicht gleich			,968	37,237	,339
ROT_Y	Varianzen sind gleich	1,706	,199	-1,836	38,000	,074
	Varianzen sind nicht gleich			-1,836	28,060	,077
ROT_Z	Varianzen sind gleich	,331	,569	,618	38,000	,540
	Varianzen sind nicht gleich			,618	37,469	,540

## Prämolaren

		Levene-Test der Varianzgleichheit		T-Test für die Mittelwertgleichheit		
		F	Signifikanz	T	df	Sig. (2-seitig)
TRANSX	Varianzen sind gleich	9,966	,002	7,024	78,000	,000
	Varianzen sind nicht gleich			7,024	54,565	,000
TRANSY	Varianzen sind gleich	,106	,746	,247	78,000	,805
	Varianzen sind nicht gleich			,247	77,829	,805
TRANSZ	Varianzen sind gleich	15,217	,000	5,092	78,000	,000
	Varianzen sind nicht gleich			5,092	53,100	,000
ROT_X	Varianzen sind gleich	4,483	,037	,671	78,000	,504
	Varianzen sind nicht gleich			,671	64,968	,505
ROT_Y	Varianzen sind gleich	18,719	,000	-8,694	78,000	,000
	Varianzen sind nicht gleich			-8,694	58,060	,000
ROT_Z	Varianzen sind gleich	2,388	,126	,053	78,000	,958
	Varianzen sind nicht gleich			,053	70,886	,958

## **9. DANKSAGUNGEN**

Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Drescher für die Überlassung dieser interessanten Arbeit und die angenehme Betreuung dieser Studie. Des weiteren gilt mein Dank Herrn Prof. Dr. Hering, Leiter des Institutes für Lasermedizin und den Mitarbeitern Herrn Osterholz, Herrn Bongartz, Herrn Dr. Terrenghi sowie Herrn Dr. Willmann für deren fürsorgliche und tatkräftige Unterstützung. Ohne diese hilfsbereite Zusammenarbeit wäre diese Studie kaum möglich gewesen. Ein besonderer Dank gilt meiner Familie - insbesondere meiner Mutter, die mich immer unterstützt hat. Diesen Personen möchte ich hiermit meinen außerordentlichen Dank bekunden.

## 10. ZUSAMMENFASSUNG

Die indirekte Bracket-Adhäsiv-Technik stellt eine Alternative zur direkten Bracketpositionierung dar. Das indirekte Klebeverfahren wurde zur Verbesserung der Positionierungsgenauigkeit und zur Vereinfachung des Klebevorganges am Patienten eingeführt. Hierzu werden auf einem Situationsmodell die Brackets zunächst reversibel in der richtigen Position auf die Zähne geklebt. Hierfür werden zumeist wasserlösliche Klebstoffe verwendet. Dann erfolgt die Herstellung einer Übertragungsschablone, welche die zuvor festgelegte Bracketposition am Modell erfasst und „speichert“. In der Regel sind die Übertragungsschlüssel in der Weise mit den Brackets verbunden, dass eine korrekte intraorale Positionierung durch einfaches Aufsetzen der Übertragungsschlüssel auf die Zähne möglich ist. Verschiedene Übertragungsverfahren kommen heute in unterschiedlichen indirekten Bracket-Adhäsiv-Techniken zur Anwendung. Die Übertragungsgenauigkeit wird im wesentlichen von den Eigenschaften des angewendeten Übertragungsverfahrens beeinflusst. Dies führt zu Übertragungsfehlern, deren Ermittlung die Voraussetzung für einen objektiven Vergleich von unterschiedlichen indirekten Klebeverfahren darstellt.

In der Literatur wurden einige Methoden zur Optimierung der indirekten Bracket-Adhäsiv-Techniken vorgestellt. Dem Autor waren keine Publikationen bekannt, welche sich mit einem objektiven Vergleich der indirekten Verfahren befassen.

Das Ziel dieser Arbeit war, ein Verfahren zu entwickeln, welches die Ermittlung der Übertragungsfehler von indirekten Klebeverfahren ermöglicht, um tatsächliche verfahrenstechnische Verbesserungen zu identifizieren. Dies sollte anhand von zwei unterschiedlichen indirekten Klebeverfahren dargestellt werden. Es sollten die Übertragungsfehler des indirekten Klebeverfahrens mittels Tiefziehfolie nach *Thomas* und die Übertragungsfehler eines Set up tauglichen indirekten Klebeverfahrens mittels Transferschlüsseln modifiziert nach *Drescher* ermittelt und in einem objektiven Vergleich einander gegenübergestellt werden.

Basierend auf einem Laser- Triangulationsabstandssensor wurde ein 3D-Laser-Triangulationsscanner eingerichtet. Die Übertragungsfehler konnten in ausreichender Genauigkeit dreidimensional erfasst werden. Dies gelang durch Scannen der Sollposition und der Istposition der Brackets, einmal auf dem Situationsmodell und dann nach erfolgter Klebung am Phantompatienten. Hierzu wurden die Kunststoffzähne zum Scannen aus den Kiefern entfernt.

Hochsignifikante Abweichungen in der Übertragungsgenauigkeit konnten insbesondere in vertikaler Richtung zwischen den Verfahren ermittelt werden. Das Tiefziehfolienverfahren hatte einen größeren vertikalen Übertragungsfehler in Richtung Inzisalkante bzw. Okklusalfäche. In einer Analyse der Zahngruppen (Inzisivi, Eckzähne, Prämolaren), wurden die rotatorischen Nebenwirkungen der vertikalen Übertragungsfehler insbesondere für Zähne mit ausgeprägt konvexer Kronenkontur (Prämolaren) deutlich. Des Weiteren wurde für das Tiefziehfolienverfahren ein breiterer Klebespalt ermittelt.

## 11. LEBENS LAUF

### Persönliche Daten

Name, Vorname:	Lohe, Röttger-Michael
Geburtsdatum:	26.11.1971
Geburtsort:	Düsseldorf
Wohnort:	41564 Kaarst, Münchener Straße 8

### Schulische Ausbildung

1978-1982	Elsa-Brandström-Grundschule Düsseldorf
1982-1991	Heinrich-Heine-Gesamtschule Düsseldorf, Allgemeine Hochschulreife
1991-1992	Zivildienst, ASG-Bildungsforum (Erwachsenenbildungsinstitut)

## Akademische Ausbildung

Winter 1993	Test für medizinische Studiengänge der ZVS
WS 1994/95 bis SS 1999	Immatrikulation im Studiengang Zahnmedizin an der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf
SS 1995	Naturwissenschaftliche Vorprüfung
WS 1996/97	Zahnärztliche Vorprüfung
12.07.1999 – 25.10.1999	Staatsexamen Zahnmedizin
20.04.2000 – heute	Kieferorthopädische Weiterbildung Poliklinik für Kieferorthopädie Universitätsklinikum Düsseldorf  Direktor: Prof. Dr. Drescher