

Aus der Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik
der
Universität Würzburg
Direktor: Professor Dr. Dipl. Ing. E.-J. Richter

**Aufzeichnung einiger Parameter der Kiefergelenksführung durch
unterschiedliche extraorale Registriersysteme – Vergleich der
Handhabung und Ergebnisse**

Inaugural – Dissertation
zur Erlangung der Doktorwürde der
Medizinischen Fakultät
der
Bayerischen Julius - Maximilians - Universität zu Würzburg

vorgelegt von
Bernhard Orth
aus Dudenhofen/Pfalz

Würzburg, Januar 2004

Referent: Prof. Dr. med. dent. A. Renk

Korreferent: Prof. Dr. med. Dr. med. dent. J. Reuther

Dekan: Prof. Dr. med. S. Silbernagl

Tag der mündlichen Prüfung: 04.05.2004

Der Promovend ist Zahnarzt

**Diese Arbeit ist meinen Eltern in grosser Dankbarkeit gewidmet,
meiner Frau Eva, die mich unermüdlich motiviert hat
und meiner verstorbenen Grosstante Maria Orth, deren grösster Wunsch
es war, zu erleben, welchen Lebensweg ihre Nichten und Neffen
einschlagen würden.**

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	Seite 1
2. Historie	Seite 3
2.1 Die Erstbeschreibung der Unterkieferbewegung und direkte graphische Registrierung	Seite 3
2.2 Indirekte graphische Registrierung	Seite 7
2.2.1 Elektronische Verfahren	Seite 7
2.3 Bildgebende Verfahren	Seite 10
2.3.1 Photographische Verfahren	Seite 10
2.3.2 Photoelektronische Verfahren	Seite 13
2.3.3 Röntgen, Cineradiographie und Cineflourographie	Seite 15
2.3.3.1 Röntgenuntersuchung	Seite 15
2.3.3.2 Röntgenkymographie und Röntgenkinematographie	Seite 15
2.3.3.3 Cineradiographie oder indirekte Cineflourographie	Seite 17
2.4 Magnetische Aufzeichnungen	Seite 17
2.5 Andere Registrierverfahren	Seite 19
3. Material und Methode	Seite 21
3.1 Aufgabenstellung	Seite 21
3.2 Messgrößen	Seite 21
3.2.1 Sagittaler Kondylenbahnneigungswinkel	Seite 21
3.2.2 Bennettwinkel	Seite 23
3.2.3 Initiale Bennettbewegung	Seite 24
3.3 Probandengut	Seite 25
3.4 Erhebungsbogen	Seite 26
3.5 Untersuchungsablauf	Seite 27

3.6	Messsysteme	Seite 28
3.6.1	Axiograph 2	Seite 28
3.6.2	Arcus Pro	Seite 30
3.6.3	String-Condylcomp LR3	Seite 31
3.7	Statistische Methoden	Seite 33
3.7.1	Überblick über die angewandten Verfahren	Seite 33
3.7.2	Überblick über die verwendeten Test- verfahren	Seite 33
3.7.3	Hinweise zur statistischen Symbolik	Seite 35
4.	Ergebnisse	Seite 36
4.1	Probandengut	Seite 36
4.2	Überblick über die Basisdaten	Seite 36
4.3	Korrelationsprüfung	Seite 37
4.3.1	Zusammenfassung der Korrelationsbefunde	Seite 40
4.4	Prüfung auf Unterschied	Seite 40
4.5	Prüfung auf Äquivalenz	Seite 41
5.	Diskussion	Seite 44
5.1	Allgemeines	Seite 44
5.2	Probanden	Seite 44
5.3	Untersuchungsmethoden	Seite 44
5.4	Sagittaler Kondylenbahnneigungswinkel	Seite 46
5.5	Bennettwinkel	Seite 47
5.6	Initiale Bennettbewegung	Seite 48
6.	Zusammenfassung	Seite 49
7.	Literaturverzeichnis	Seite 51

1. Einleitung

Die Funktionen des Kiefergelenkes sind sehr komplex. Beim Menschen sind die Gelenkköpfe beider Seiten durch die Unterkieferspange miteinander verbunden, sodass die Bewegung eines Gelenkes auch immer eine Bewegung des anderen Gelenkes bedeutet. Die meisten Bewegungen gliedern sich in zwei Teile: Eine Rotation im hinteren disko-kondylären und eine Gleitbewegung im vorderen disko-temporalen Gelenk. Die Bewegungen selbst lassen sich überwiegend in drei Komponenten gliedern: Eine Rotationsbewegung, z.B. beim Öffnen und Schließen, eine Vor- und Rückschubkomponente und Seitwärtsbewegungen. Die meisten Bewegungen sind aus mindestens zwei dieser Komponenten zusammengesetzt [9, 20, 39, 54].

Die Anatomen Monro und Ferrein richteten in der Mitte des 18. Jahrhunderts als erste besonderes Augenmerk auf das Kiefergelenk, das einen wichtigen Anteil an der Funktion des Kauystems einnimmt.

Um 1840 wurden die Bewegungsbahnen der Kiefergelenke erstmals graphisch auf Papier dargestellt. Die Resultate dieser und folgender Untersuchungen dienten dazu, das Verständnis der gesamten Kaufunktion mit allen daran beteiligten Strukturen zu verbessern.

Ziel der Untersuchungen war es, herauszufinden, wie sich der Unterkiefer als beweglicher Anteil gegenüber der Schädelbasis als starrem Anteil bewegt. Zunächst stellte man sich das Kiefergelenk als Scharniergelenk vor, das Bewegungen um eine starre Achse erlaubt, wie z.B. die Mittel- und Endgelenke der Fingerglieder. Nachfolgende Studien ergaben, dass die Achse nicht starr ist, sondern sich im Raum bewegt. Durch Verfeinerung der Messmethoden konnte die Bewegung der Achse zunehmend genauer bestimmt werden und es

konnten Achsbewegungen entlang von sechs Freiheitsgraden (auf, ab, rechts, links, vor, zurück) nachgewiesen werden.

Von weiterem Interesse war dann, welche Bewegungsbahnen ein „gesundes“ Kiefergelenk durchläuft, beziehungsweise wie viel Bewegungsspiel es besitzen darf, was durch die sogenannten Grenzbewegungen beschrieben wird. Veränderte Bewegungsbahnen und Grenzbewegungen geben Hinweise auf Störungen und Erkrankungen des Systems.

Derartige diagnostische Informationen rund um das stomatognathe System dienen demnach der Erkennung und Behandlung direkter und indirekter Störungen der Gelenkfunktion, physiologischer und pathologischer anatomischer Gegebenheiten und ihrer Auswirkungen auf das Kauorgan. Daraus resultierend können therapeutische Schlüsse gezogen und entsprechende Behandlungsmittel hergestellt, angewendet, sowie der Therapieerfolg überprüft werden. Die Informationen der instrumentellen Funktionsanalyse dienen auch prophylaktisch der Vermeidung von Kiefergelenksschädigungen bei der Anfertigung von Zahnersatz.

In der vorliegenden Untersuchung sollte das mechanisch-graphische Messsystem ARCUS PRO der Firma KaVo EWL zur Aufzeichnung von Unterkieferbewegungen im Bereich der Kiefergelenke mit zwei etablierten Systemen verglichen werden. Dabei sollen die Messergebnisse einiger Standardparameter zur individuellen Artikulatorprogrammierung sowie die Handhabung verglichen werden. Als Referenz dienen Messungen mit bewährten Geräten zur instrumentellen Funktionsdiagnostik, wie dem Axiograph 2 der Firma SAM als ebenfalls mechanisches und dem String Condylcomp LR3 der Firma Dentron als berührungslos messendes optoelektronisches Registriersystem.

Beide Systeme stellen etablierte Verfahren zur Ermittlung spezifischer Strecken, Winkel und Bewegungsabläufe im Bereich der Kiefergelenke dar. Zu

ihnen gehören, neben anderen, die in dieser Studie untersuchten folgenden Größen: Der sagittale Kondylenbahnneigungswinkel, der Bennettwinkel, sowie die initiale Bennettbewegung. Die Strecken und Winkel können auf einen justierbaren Artikulator übertragen werden, um die anatomischen Gegebenheiten und Bewegungsabläufe des Patienten bestmöglich nachzuahmen. Daraus können weitere diagnostische Informationen gewonnen, sowie entsprechende therapeutische Geräte und/oder möglichst störungsfreier Zahnersatz hergestellt werden. Die Referenzsysteme sind seit geraumer wegen ihrer Praktikabilität und Zuverlässigkeit unter Anwendern der instrumentellen Funktionsdiagnostik weit verbreitet. Obwohl ihre diagnostische Bedeutung durch den Einsatz der Computer- und Magnetresonanztomographie gesunken ist, bieten sie häufig eine diagnostische Ergänzung zu bildgebenden Verfahren bei Kiefergelenksbeschwerden bzw. -erkrankungen. Ihre Reproduzierbarkeit und Genauigkeit konnte in zahlreichen Studien belegt werden [3, 7, 8, 11, 32, 46, 79, 94, 150, 153, 184, 188, 190, 192, 193, 204]. Konsensus der bisherigen Untersuchungen sowohl zum Axiograph als auch zum String-Recorder war, dass beide Systeme unter genauer Beachtung der Montageanleitungen und bei entsprechender Kenntnis der Fehlermöglichkeiten eine ausreichend hohe Genauigkeit zur Programmierung individueller Artikulatoren gewährleisten [2, 12, 32, 79, 128, 133, 153, 154, 184, 190, 191, 192, 204]. Zum Arcus Pro liegen in der Literatur bisher keine Untersuchungen vor.

2. Historie

2.1 Die Erstbeschreibung der Unterkieferbewegungen und direkte graphische Registrierungen

Während man sich zur Zeit von Monro, um 1735 die Öffnungsbewegung des Unterkiefers als reine Rotationsbewegung um eine Achse unterhalb des Gelenkkopfes vorstellte [65], fand der französische Anatom M. Ferrein heraus, dass sich der Unterkiefer bei Öffnungsbewegungen entlang einer Scharnierachse bewegt und bei Seitwärtsbewegungen gleichzeitig eine Abwärtsbewegung durchführt [40], was er 1744 veröffentlichte.

Langer zeichnete 1840 Unterkieferumrisse seiner Probanden in verschiedenen Bewegungsphasen der Mundöffnung auf Papier auf und setzte durch Überlagerung die gesamte Öffnungsbewegung zusammen. Dabei stellte er fest, dass die Rotationsachse im Raum fortschreitet [65].

Balkwill, dessen Arbeit erst 30 Jahre später veröffentlicht und anerkannt [4] wurde, entdeckte 1866, dass sich die Kondylen vorwärts, abwärts und seitwärts bewegen.

Dass die Kiefergelenksköpfchen von ihrer habituellen Position aus auch die Möglichkeit zur Bewegung nach dorsal besitzen, stellte Bonwill 1865 fest [16].

Walker fand 1896 die Möglichkeit zur Aufwärts- und Abwärtsbewegung der Kondylen. Er befestigte Griffel an einem Gesichtsbogen und Schreibplatten am Kopf des Probanden, um so in verschiedenen Ebenen die Gelenkbahnen aufzuzeichnen. Aus diesen Aufzeichnungen bestimmte er die Gelenkbahnneigung [195].

1886 entdeckte Ulrich bei seinen Aufzeichnungen eine Seitwärtsbewegung des Unterkiefers [189]. Da seine Veröffentlichung aber in Dänisch war, wurde sie erst 1908 durch die Untersuchungen von N. G. Bennett bekannt, der ebenfalls die gleichen Seitwärtsbewegungen registrierte [10]. Gysi stellte im gleichen Jahr den nach Bennett benannten Winkel graphisch dar [61].

Ebenfalls 1908 untersuchte Ganzer die Öffnungsbewegung mittels zweier 0,5 Meter langer Stäbe, die er am Ober- und Unterkiefer in horizontaler und medialer Richtung befestigte. Durch die Länge dieser Stäbe konnte er zusätzlich eine starke Vergrößerung der Bewegungsbahn erreichen.

Nach der Jahrhundertwende nahm die Zahl der Forscher zu, die auf diesem Gebiet Untersuchungen und Weiterentwicklungen vornahm. Zu ihnen gehören Christensen 1901, Champion 1902, Parfitt 1903, Bennett 1908 und Gysi 1910. Sie zeichneten gelenknah graphisch Bewegungsspuren des Unterkiefers auf, zum Teil mit selbstgebauten Registriervorrichtungen und Übertragungsgeräten.

Champion stellte 1905 fest, dass sich die Öffnungsbewegung des Unterkiefers in zwei Abschnitte unterteilt [24]. Zum ersten eine reine Rotationsbewegung zu Beginn der Öffnung und daran anschließend eine Translationsbewegung.

Chissin [28] war 1906 der Erste, der herausfand, dass sich die Gelenkachse während der Bewegung ständig verändert und löste sich damit von der Vorstellung, sie sei starr. Nyffenegger et al. [147] fanden 1971 bei Versuchen mit einer ähnlichen Versuchsanordnung wie Posselt 1952 [160] heraus, dass nur bei passiv geführten Öffnungsbewegungen eine reine Rotationsbewegung stattfindet.

Als 1925 Christensen die Gelenkbahnneigung zusätzlich mit Hilfe von Bisschablonen untersuchte, fand er bei der Protrusion eine Disklusion im Seitenzahnbereich entsprechend des Gelenkbahnverlaufs, der er als dem Christensensches Phänomen seinen Namen gab [29].

Parfitt [156] fand bei Seitwärtsbewegungen des Unterkiefers eine Rotation um eine vertikale Achse und stellte weiterhin fest, dass die rechte und linke Gelenkbahn nicht identisch sind.

Bereits 1892 hatte Warnekros [197] in seiner Dissertation ein intraorales Registrierverfahren entwickelt, nach dessen Vorlage Hesse 1897 Registrierstifte zwischen den unteren ersten Molaren befestigte und auf einer am Oberkiefer befestigten Platte die Bewegungsbahnen aufzeichnete [69].

Münzesheimer konnte 1922 nachweisen, dass die Gelenkbahnneigung nicht von der Zahnführung abhängig ist [145].

McMillen [137] versuchte an anästhesierten Patienten, wie zuvor bereits Posselt, Boucher und Jacoby, herauszufinden, welche anatomischen Strukturen Einfluss auf die Grenzbewegungen ausüben.

Gemeinsam mit Stuart [187] registrierte McCollum [136] 1934 mittels eines zentralen Stützstiftes dreidimensional Unterkieferbewegungen von extraoral. Dieses Verfahren wurde Gnathographie genannt und gilt als der Vorläufer der Pantographie. Daraus resultierend entwickelte Stuart 1955 den Stuart-Pantographen.

Weber, Gerber, Guichet, Wipf und Stachniss [199, 200, 203, 49, 39] entwickelten in den Jahren 1965-1982 ähnliche Geräte, die dazu dienen sollten, Kiefermodelle bezüglich der individuellen Gelenksbewegungen der Patienten in einen Artikulator zu übertragen.

1980 stattete Jähmig [39] den Denar-Pantographen mit pneumatischen Schreibstiften aus und erhöhte dadurch den Automatisierungsgrad und die Genauigkeit.

In den Jahren 1967 bis 1981 nutzen viele Autoren die Pantographie zur Untersuchung physiologischer und pathologischer Bewegungsabläufe und Darstellung der Grenzbewegungen im Kiefergelenk. Von ihnen seien auszugsweise Le Pera (1967) Clayton (1971), Roura (1975), Shields (1978),

Crispin (1978), Mongini (1980 und 1982) und Simmonet (1981) genannt [116, 31, 33, 142, 143, 167, 178, 179].

1982 befand Ott [152], dass die Pantographie ein reproduzierbares Verfahren ist, das sich durch seine geometrischen Grundlagen zur Funktionsdiagnostik eignet.

1982 stellten Slavicek und Mack den Axiographen vor, mit dem gelenkbezogene Aussagen in diagnostischer und therapeutischer Hinsicht möglich sind [181]. Utz et al. [190, 192] untersuchten 1987 und 1989 Protrusionsbahnen und Bennettwinkel mittels des Axiographen und fanden dabei heraus, dass dieses System eine ausreichend hohe Genauigkeit und Reproduzierbarkeit aufweist.

2.2 Indirekte graphische Registrierungen

2.2.1 Elektronische Verfahren

Die elektronischen Verfahren unterteilen sich weiter in gelenknah, d.h. im Bereich des Kiefergelenks und gelenkfern messende Verfahren, die meist einen Inzisalpunkt als Referenzpunkt verwenden.

Bewersdorff war 1967 [14] der erste, der ein elektronisches dreidimensionales Registriersystem entwickelte. Dieses Verfahren wurde als Elektrognathographie bezeichnet. Bewersdorff hängte seine Apparatur vor dem Patienten über ein Seilsystem auf, befestigte eine Bissgabel im Mund und verwendete so genannte Resolver als Messaufnehmer. Diese messen Winkeländerungen anhand von an den Messorten befestigten Drähten. Die Daten wurden in einem Visicorder gespeichert.

Knap [98, 99] entwickelte 1970 ein dreidimensionales Registriersystem, das mit Hilfe von 6 Potentiometern die Unterkieferbewegungen im Raum aufzeichnen konnte (Abb. 1).

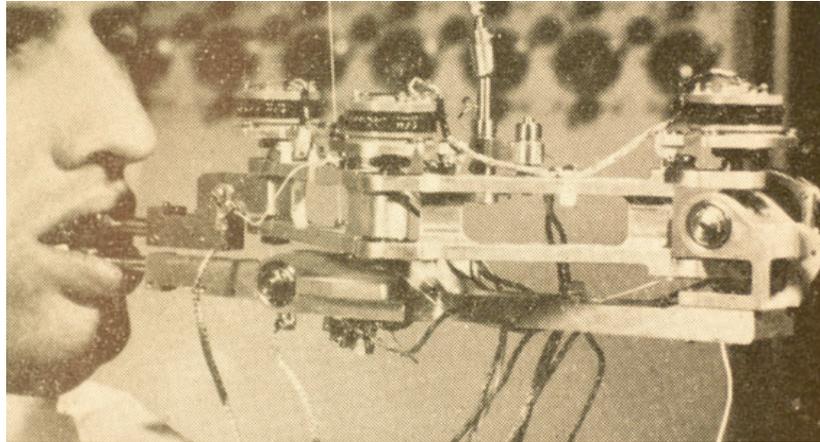


Abb. 1:Registriersystem nach Knap mit Drehpotentiometern

Körper [104] stellte 1971 ein mit Miniaturdrehbewegungswandlern arbeitendes System vor, mit dem er sowohl gelenknah, als auch gelenkfern maß. Die Daten wurden einem xy-Schreiber zugeführt. Ein Vorteil gegenüber der Elektrognathographie war, dass der Einfluss von Eigenbewegungen des Patienten minimiert werden konnte.

Heners [67] stellte 1973 ein zweidimensional messendes System mit Drehmesswandlern, die er im gleichen Jahr weiterentwickelte, so dass sie über Widerstandsgeber räumliche Bewegungen erfassen und über einen Weg-Zeitschreiber ausgeben konnten [74].

Der Mandibulograph von Johannsen und Goodson [59] aus dem Jahr 1975 war das erste Verfahren, das einen Computer zur mathematischen Bestimmung der räumlichen Unterkieferbewegungsbahn verwendete. Um die Messungen korrekt durchzuführen, war es hierbei nötig, den Kopf des Probanden mittels einer Kopfgipskappe unbeweglich am Behandlungsstuhl zu befestigen.

Pietro (1963) und Pameijer (1975) entwickelten ebenfalls eigene elektronische Systeme für gelenknahe Registrierungen der Unterkieferbewegung [159, 155].

1978 stellte Ohlrogge [178] ein Gerät vor, dessen Signalgeber gelenknah befestigt waren, während sich die Messwertaufnehmer integriert im Behandlungsstuhl befanden.

Das ECRS-System von Körber und Luckenbach [105] aus dem Jahr 1981, konnte als elektronisches Mess- und Registriersystem jede beliebige Position eines Punktes im Kiefer relativ zur Messapparatur bestimmen. Grundlage dafür sind sieben Drehpotentiometer, die eine dreidimensionale Darstellung der Ober- und Unterkieferposition zum Kiefergelenk ermöglichen.

1985 erweiterten Meyer und Dal Ri [140] den Axiographen von Slavicek und Mack, indem sie die mechanische Messuhr gegen induktive Messtaster und die Schreibplatten gegen spezielle Widerstandsfolien tauschten. Dadurch erhöhten sich die Messgenauigkeit und die Reproduzierbarkeit der dreidimensionalen Messungen. Durch die Rotationssymmetrie des Gerätes konnten auch Projektionsfehler deutlich reduziert werden.

Mochiozuki und Hobo [74] verwendeten 1983 ein System, bei dem die Unterkieferbewegung in sechs Freiheitsgraden mit einer Genauigkeit von $\pm 0,06\text{mm}$ gemessen werden konnte. Über eine paraokklusale Bissgabel standen dabei drei Griffel in T-Form angeordnet mit drei Leiterplatten, die am Oberkiefer befestigt waren, in Verbindung.

1987 benutzte Pröschel [163, 164] den von ihm entwickelten Elektrogathographen, um Kaubewegungen in verschiedene Kaubewegungsmuster einzuteilen.

Handel [39] führte 1987 unter Zuhilfenahme des Stereognathographen von Burckhardt und dem von Gerdes entwickelten Auswertungsprogramm Aufzeichnungen zum zeitlich-räumlichen Vergleich beider Kiefergelenke durch.

2.3 Bildgebende Verfahren

2.3.1 Photographische Verfahren

Photographische Verfahren zur Darstellung von Bewegungsbahnen sind ein sehr altes Verfahren, welches bereits bei anderen Gelenken des Körpers zum Einsatz kam [134].

Als erster beschrieb Luce [126] 1889 ein Registrierverfahren, bei dem er an den Schneidezähnen des Unterkiefers einen Holzstab befestigte, der zunächst nur eine Silberkugel trug. Diese wurde während des Registriervorgangs angestrahlt und von Kameras aus zwei Ebenen aufgenommen. Später wurde ein Gerüst mit mehreren Kugel verwendet.

Marey [134], der mit dem gleichen Verfahren bereits andere Gelenke des Körpers auf ihre Funktion hin untersucht hatte, führte 1894 auch Gelenkbahnaufzeichnungen des Unterkiefers durch. Er fotografierte Bewegungsbahnen, indem er polierte Drähte an verschiedenen Stellen des Unterkiefers befestigte, ein schwarzes Tuch zwischen Drähten und Haut positionierte und die Drähte anstrahlte.

Im Jahre 1896 veröffentlichte Ulrich [189] seine Aufzeichnungen, bei denen er über eine Schiene kleine Silberkugeln am Unterkiefer im Bereich der Schneidezähne, des Kieferwinkels, auf Höhe des Foramen mandibulare und der Kondylen befestigte, diese ebenfalls anleuchtete und die Bewegungsbahn aus verschiedenen Ebenen photographisch festhielt.

Er stellte dabei als erster ein seitliches Versetzen des Unterkiefers fest (Abb. 2).

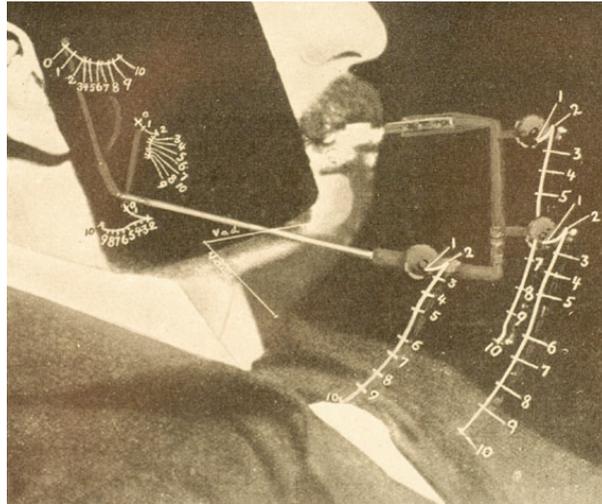


Abb. 2: Der Versuchsaufbau von Ulrich 1896

Da Ulrich seine Ergebnisse auf dänisch publizierte und dadurch kaum Verbreitung fand, wurde die gefundene Bewegung nach dem Autor der Zweitbeschreibung Bennettsche Lateralbewegung genannt [10].

Bennett montierte Lampen im Bereich der Kondylen und des Kinns des Patienten und fokussierte das Licht über Linsen in sagittaler oder frontaler Richtung auf eine Wand. Dort wurden die Bahnen mitgezeichnet und anschließend auf Originalgröße zurückgerechnet.

Ebenfalls nach dem Prinzip von Ulrich führte Walker 1896 Registrierungen durch.

Münzesheimer [146] verfeinerte dieses Verfahren durch Einführung der Stroboskopie und Aufzeichnung aus drei verschiedenen Ebenen.

Kurth [111] (1942) und Shanahan et. al. [175] (1959) arbeiteten bei ihren Untersuchungen ebenfalls mit den genannten Verfahren.

Schweitzer [173] benutzte 1961 Stillbild- und Bewegungsfilmkameras, um über Spiegel am Kinn oder der UK-Front befestigte Lämpchen zu filmen.

Hickey et al. [70] zeichnete die Bewegung von Kondylen und Mandibula auf, indem sie unter Lokalanästhesie Metallpins in die Kiefergelenke der Probanden inserierten und einen weiteren an den Uk-Inzisiven befestigten.

Die Bewegung der Pins wurde dreidimensional mit Kameras aufgenommen (Abb. 3 und 4).

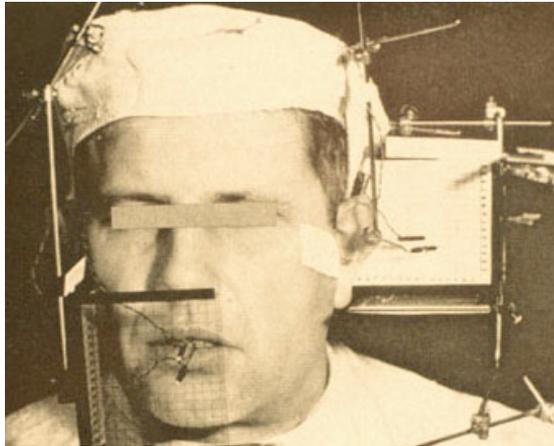


Abb. 3: Messapparatur nach Hickey et al.

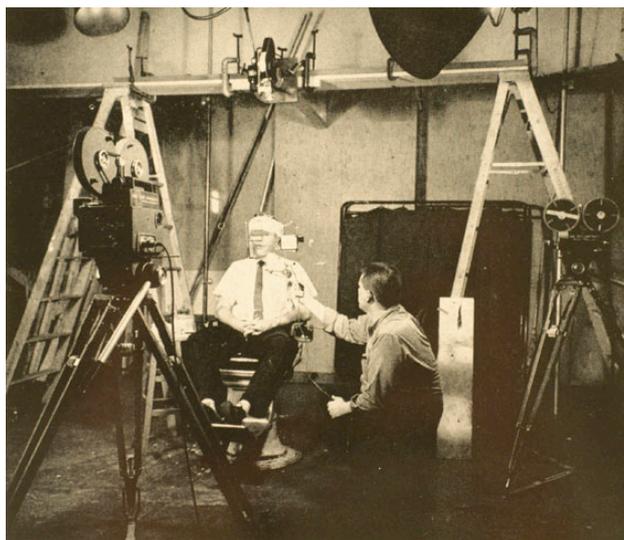


Abb. 4: Dreidimensionale Bewegungsaufzeichnung nach Hickey et al.

Hickey kam, wie auch schon Ulrich 1896 zu dem Schluss, dass die Kondylenführung und daraus resultierend der Bewegungsablauf des Unterkiefers individuell verschieden und nicht nach feststehenden Bahnen abläuft.

2.3.2 Photoelektronische Verfahren

Diese Verfahren bedienen sich zum Messen photoelektrischer Elemente wie Lichtdioden, Photozellen u.ä. Auch hier existieren gelenknah und gelenkfern messende Systeme.

Gillings [58] konstruierte 1967 eine Apparatur, bei der am Unterkiefer ein Lampe befestigt war, während am Oberkiefer ein Rahmen mit Photozellen montiert wurde, der die Bewegung der Lampe relativ zu den Photozellen registrierte.

Der Case-Gnathic-Replicator von Messerman [138] erlaubte die Bewegungsmessungen um 6 Freiheitsgrade. Er bestand aus einem Doppelgesichtsbogen mit sechs optischen Messeinheiten.

1981 benutzten Gibbs et al. [39] ebenfalls den Case-Gnathic-Replicator für ihre Untersuchungen.

Lindholm und Oeberg [123] benutzten 1974 ein System, bei dem Lichtdioden an Stirn und Unterkiefer befestigt wurden. Eine entfernt stehende Kamera hielt die Unterkieferbewegungen photographisch fest.

Knap et al. [100] registrierten 1975 dreidimensionale Unterkieferbewegungen durch Verwendung von sechs optischen Elementen, die ihre Aufzeichnungen zu einem Computer leiteten, der sie graphisch ausgeben konnte.

Carlsson [25] befestigte 1977 Infrarot-LEDs an der Stirn und intraoral am Unterkiefer der Probanden. Dieses System überarbeitete er später mit Jemt, wobei über ein Computerprogramm störende Eigenbewegungen des Probanden korrigiert wurden. An einem Brillengestell wurden Licht emittierende Dioden befestigt, die als zusätzliche Referenz zu den am Oberkiefer befestigten Emittlern fungierten.

Auch Graf [60] benutzte dieses Verfahren 1985 für seine Untersuchungen. Unter dem Begriff der Motographie nahmen Fischer und Baum [42], im selben Jahr und ebenfalls mit dem von Carlsson und Jemt entwickelten System die Bewegungsbahnen des Unterkiefers mittels Sofortbildkamera direkt auf Fotopapier auf.

In den Jahren 1983 und 1984 befestigten Iwata [83] und Hobo [75] optische Wegaufnehmer über Trägerplatten vor dem Ober- und Unterkiefer und leiteten die gewonnenen Daten zur Aufbereitung an einen Computer.

Das erste gelenknah berührungslos messende System stellten 1977 Waysenson und Salomon vor [198]. Es war allerdings gegenüber Kopfbewegungen des Probanden sehr störungsanfällig, was Van Willingen [202] 1979 kompensieren konnte.

Ohlrogge [149] entwickelte 1982 ein System, welches er als Pantoskopie bezeichnete. Es besteht aus zwei Gesichtsbögen, von denen einer die Sendeeinheit und der andere die Empfangseinheit der mit Infrarot arbeitenden Messeinheiten trug. Mit der Pantoskopie sind Aufzeichnungen in drei Dimensionen möglich.

Klett [96, 97] stellte ebenfalls 1982 sein optoelektronisch arbeitendes, gelenknah messendes String-Recorder-System vor. Es besteht aus einer Kopfhalterung, welche die Messboxen mit den Infrarotsendern trägt, während die Reflexionsvorrichtung über eine Bissgabel und einen weiteren Bogen am Unterkiefer befestigt ist. Messboxen und Reflexionseinheiten berühren sich beim Messen nicht. Auch dieses Messverfahren ermöglicht die dreidimensionale Darstellung und Analyse der Bewegungsbahn, sowie die Möglichkeit einer Bewegungsdarstellung über die Zeit als vierte Dimension. Dieses System wurde mehrfach weiterentwickelt und verfeinert bis 1990 zum CondylComp LR3.

Burckhardt [22] entwickelte 1982 ein auf Infrarotlichtstreckenmessung basierendes System. Es wird ähnlich einem Brillengestell am Kopf des Probanden befestigt und besitzt im Bereich der Kondylen je drei übereinander liegende Infrarotlichtstrecken, welche mit Filtern am Unterkieferbogen interagieren.

Eine Weiterentwicklung dieses Systems stellt der Stereognathograph dar, mit dem Auswertungsprogramm von Gerdes [39], welches dem Behandler ermöglicht, dreidimensionale perspektivische und zeitliche Darstellung vorzunehmen.

2.3.3 Röntgen, Cineradiographie, Cinefluorographie

2.3.3.1 Röntgenuntersuchungen.

Die von Conrad Wilhelm Röntgen in Würzburg gefundenen Strahlen wurden erstmals von Sicher [177] 1929 zur Kondylenpositionsanalyse mittels Röntgenphotographie verwendet.

Mit einem 1934 von Speidel und Maxon [182] hergestellten Justiergerät untersuchten Higley und Logan [72] im Jahre 1941 Kiefergelenke in verschiedenen Öffnungsstadien.

Frank [44] stellte 1948 ebenfalls Kondylenpositionen während verschiedener Öffnungszustände mittels Röntgenaufnahmen dar.

2.3.3.2 Röntgenkymographie und Röntgenkinematographie

Goett und Rosenthal [39] entwickelten 1912 ein Verfahren zur röntgenologischen Aufzeichnung von Kiefergelenksbewegungen auf einer sich bewegenden Röntgenfilmplatte. Dieses Verfahren wurde zwischen 1926 und

1931 von Stenström, Lysholm und Hildebrand [73] verfeinert und zur Untersuchung bestimmter Bewegungsarten, wie Öffnung, Kauen und andere verwendet. 1941 stellte Zimmer [39] bei seinen Forschungen nach dieser Methode fest, dass entgegen der bisherigen Meinung die Bahn der Kondylen nicht S-förmig sondern erst kaudal und dann gerade nach ventral verläuft.

Bei der Röntgenkinematographie werden Serien von Aufnahmen während eines Bewegungsablaufes aufgenommen. 1962 konnten Frommholt und Hielscher [47] die Bewegungsbahn der Kondylen durch Herauskopieren von Einzelbildern aus Röntgenfilmen darstellen. Ihre Ergebnisse beschreiben Bewegungsbahnen, die an allen Stellen bogenförmig verlaufen und somit denen von Zimmer widersprechen.

Eichner [38] (1964) und Schmitthelm [172] (1966) maßen nach demselben Prinzip Kondylenbahnen am zahnlosen Probanden und fanden ebenfalls an allen Stellen bogenförmige Bewegungsbahnen.

Puff und Krause [166] stellte mit dem Verfahren 1965 fest, dass sich die Bewegungsbahn in Abhängigkeit von Bewegungsrichtung und Belastung ändert, was gegen eine Führung knöcherner und für eine Führung durch muskuläre Strukturen sprach.

Bereits 1959 benutzte Sheppart [176] Bleimarkierungen im Bereich der oberen und unteren Schneidezähne, wie auch an den Prämolaren, um den Bewegungsablauf festzuhalten.

Gernert et al. [50] kamen ebenfalls zu dem Schluss, dass die Kiefergelenksführung neuromuskulär geführt sein müsse, indem sie röntgenkinematographische Vergleichsuntersuchungen an zahnlosen Patienten nach unterschiedlichen Kieferrelationsbestimmungen durchführten.

Ein Jahr später fanden Gernet et al. [51] bei Vergleichsuntersuchungen zwischen röntgenkinematographischen Aufzeichnungen von Bewegungen mit und ohne Stützstiftführung abgeflachte Bahnen bei Bewegungen mit

Stützstiftführung, während die zahngeführten Bewegungen denen der röntgenkinematographischen Aufzeichnung sehr ähnlich waren.

2.3.3.3 Cineradiographie oder indirekte Cinefluorographie

Klatsky [90, 91] war 1941 der erste, der die Cinefluorographie in der Zahnheilkunde benutzte. Er wendete ein Verfahren an, das im Ursprung auf Macintyre [185] (1897) zurückgeht und von Stewart [186] als Erstellung von Filmen aus einzelnen Röntgenbildern, die von einem Leuchtschirm abgefilmt werden, beschrieben ist. Dieses Verfahren erlaubte Vergleichsaufzeichnungen, um Behandlungserfolge zu überprüfen.

1948 – 1951 untersuchte Lindblom [121, 122] mittels der Cineradiographie die Kondylenbahn. Bei diesem Verfahren wird durch Röntgenstrahlen ein Fluoreszenzbild der zu untersuchenden Strukturen erzeugt, das über Spiegel und Linsen auf einen Film übertragen wird.

1959 führten Berry und Hofmann [13] Aufnahmen durch, wobei sie ein ähnliches Gerät wie Lindblom verwendeten mit einem zusätzlichen Bildverstärker, der auf elektronischem Weg das erzeugte Bild direkt verstärkt.

Isberg-Holm und Westesson [81, 82] zeichneten 1982 mittels Cineradiographie die Kondylenbewegungen von pathologisch veränderten Kiefergelenken auf, die Knackgeräusche aufwiesen. Im weiteren Verlauf untersuchten sie mittels Hochgeschwindigkeits-Cinematographie Kiefergelenke mit und ohne Knacken.

2.4 Magnetische Aufzeichnungen

Jankelson et. al [85] entwickelten 1975 ein magnetisches Verfahren, das sie als Kinesiometrie bezeichneten. Dabei befestigten sie einen Permanentmagneten an der Unterkieferfront und ein Magnetometer außerhalb des Mundes und

konnten so über einen Oszillographen einen zweidimensionalen Bewegungsablauf darstellen.

Bock et al. [15] stellten bei eigenen Untersuchungen fest, dass das Gerät von Jankelson nicht für quantitative Analysen geeignet sei, da es eine starke Störanfälligkeit gegenüber anderen magnetischen Feldern aufweist und die Registrierungen nicht reproduzierbar sind.

Im Jahr 1976 konnten Lemmer, Lewin und Van Rensburg [117. 118] o.g. Verfahren verfeinern, indem sie an einem Magnetometer über ein Gestell, das an einer Brille befestigt war, drei ferromagnetische Sensoren befestigten. Jedes Sensorenpaar maß die Bewegungen des Magneten an der Unterkieferfront in einer anderen Raumebene, so dass es möglich war, eine dreidimensionale Bewegungsbahn über einen Drucker aufzuzeichnen.

Später wurde in Form eines zeitabhängigen Vergleichsfaktors die Zeit als vierte Dimension hinzugefügt (Abb. 5).

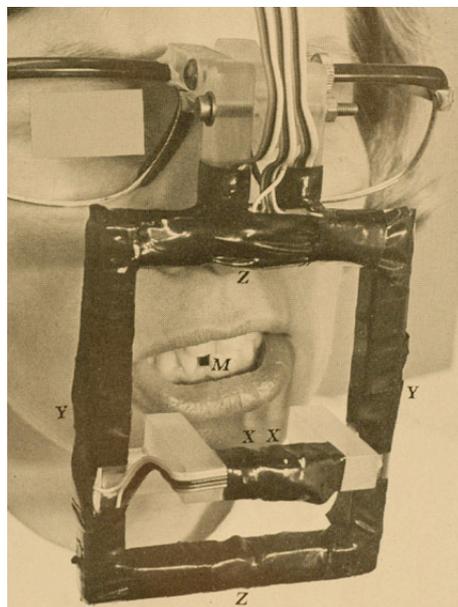


Abb. 5: Magnetische Messapparatur nach Lemmer, Lewin und Van Rensburg

Gernet [52, 53] verbesserte die Kinesiographie von Jankelson, nachdem er sie mit anderen Registriersystemen verglichen hatte, so dass dreidimensionale

Aufzeichnungen ermöglicht und eine tolerierbare Reproduzierbarkeit erreicht wurden.

1985 untersuchte Behneke [8] den Sirognathographen der Firma Siemens, welcher auf den Entwicklungen von Lewin, Lemmer und Van Rensburg basiert. Auch Pröschel [163] benutzte dieses Gerät für Funktionsanalysen, die er anschließend in sechs Hauptgruppen ordnete.

Schindler et al. [171] nutzten 1985 ein neu entwickeltes System, bei dem Magnete und induktive Messwandler extraoral am Kopf des Probanden befestigt werden und die Ergebnisse von einem Rechner umgewandelt über einen Oszillographen ausgegeben werden.

2.5 Andere Registrierverfahren

Zu den Autoren, die andere Registrierverfahren entwickelten, gehörte Lee [115], der 1969 durch am Unterkieferbogen angebrachte Bohrer die Bewegungsbahnen in Kunststoffblöcke im Bereich der Kondylen und der Unterkieferfront einfräste (Abb. 6).

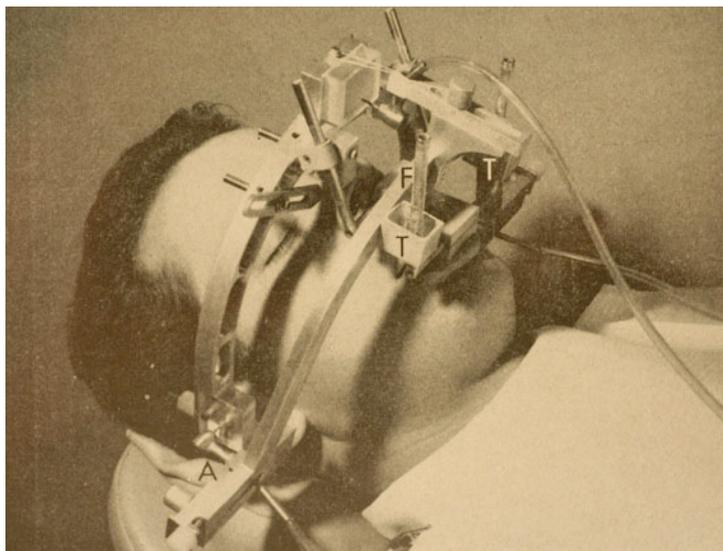


Abb. 6: Registriersystem nach Lee mit 3 Turbinen und Kunststoffblöcken

Nach dieser Methode untersuchten Lundeen et al. [130, 131] in den Jahren 1973 78 Probanden und fanden bei der Aufzeichnung von Grenzbewegungen eine gute Reproduzierbarkeit.

Spranger [183] benutzte 1977 Ultraschallecho-Untersuchungen und Drum [37] führte 1985 Spektralanalysen von Gelenkgeräuschen durch, um die Gelenke darzustellen.

Ebenfalls mittels Ultraschall führte Häring [64] 1986 Versuche durch, bei denen er drei Sender im Bereich der unteren Inzisivi, der ersten Molaren und auf den Kondylus ausgerichtet montierte. Mit Hilfe eines Echtzeit-Ultraschall-Topometers der Fa. Hansen und einem dafür entwickelten Computerprogramm wurden die Registrierungen aufgezeichnet, ausgewertet und graphisch dargestellt. Aus diesem Gerät wurde der MT 1602 der Fa. Hansen weiterentwickelt.

Auch Edinger [39] benutzte 1990 ein auf Ultraschall basierendes Gerät, bei dem er zusätzlich durch einen schrittmotorgesteuerten Simulator Bewegungen reproduzieren konnte.

Ebenfalls mit Ultraschall arbeitet das System Arcus digma der Firma Kavo EWL, das 2002 eingeführt wurde und Bewegungen in sechs Freiheitsgraden misst und gegen die Zeit aufträgt.

3. Material und Methode

3.1 Aufgabenstellung

Die Aufgabenstellung der vorliegenden Arbeit bestand in der Erhebung von drei Parametern der Kiefergelenksfunktion mit drei unterschiedlichen Registriersystemen zur instrumentellen Funktionsdiagnostik zum Zweck einer Äquivalenzprüfung der Messsysteme. Die Untersuchungen wurden an 16 Probanden nach Feststellung physiologischer Kiefergelenksfunktion durchgeführt, die Messergebnisse aufgezeichnet und einer statistischen Auswertung unterzogen.

3.2 Messgrößen

3.2.1 Sagittaler Kondylenbahnneigungswinkel

Beim Vorschub des Unterkiefers (Protrusion) beschreiben die Kondylen keine gerade, sondern eine bogen- bis s-förmige Bahn. Dies ist bedingt durch das Aufgleiten auf eine knöchernen Erhabenheit an der Schädelbasis, das sogenannte Tuberculum articulare. Zieht man eine Gerade zwischen dem Ausgangspunkt der Kondylen und ihrer Position nach 5mm Vorschub, so bildet diese einen Winkel zu einer Bezugsebene am Schädel. Als Referenzebenen dienen entweder die Camper-Ebene oder die Frankfurter Horizontale, wobei die Camper-Ebene als parallel zur Okklusionsebene angenommen wird. Die Camper-Ebene bildet zur Frankfurter Horizontalen einen Winkel von 15° , so dass der Kondylenbahnneigungswinkel mit der Frankfurter Horizontalen als Referenzbahn um 15° steiler gegenüber der Camper-Ebene gemessen wird. Dieser Winkel ist der sagittale Kondylenbahnneigungswinkel [9, 20, 39].

In Tabelle 1 sind einige Untersuchungsergebnisse aus der Literatur zur Größe des Winkels zusammengetragen [39].

Autor/Jahr	Probandenzahl	Methode	Ergebnisse	Bezugsebene
Gysi 1908	n=34	e.o.	33°	Okklusionsebene
Posselt 1960	n=10	e.o.	36°	Okklusionsebene
Lundeen et al. 1973	n=50	e.o.	40°	S-O-Ebene
Koeck 1973	n=10	i.o.	Rechts: 38° Links: 39°	S-O-Ebene
Koeck et al. 1976	n=30	e.o.	Deckbiß: 48° Eugnathe Verzahnung: 37°	S-O-Ebene mod.
Richter 1976	n=30	i.o.	Dentatus: 34° Whip-Mix: 48°	S-O-Ebene
Ecker et al. 1984	n=16	e.o.	Whip-Mix: 48°	S-O-Ebene
Utz et al. 1987	n=122	e.o.	Rechts: 51° Links: 51°	S-O-Ebene
Lückerath 1991	n=60	e.o.	Rechts: 62° Links 62,5°	S-O-Ebene (okkl. Nahbereich)
Bernhard et al. 1993	n=120 n=117	e.o. i.o.	Rechts: 49,7° Links: 49,1° Rechts: 51,4° Links: 50,4°	S-O-Ebene

Tabelle 1: Untersuchungsergebnisse zur Messung des sagittalen Kondylenbahnneigungswinkels. (e.o.: extraoral; i.o.: intraoral; S-O-Ebene: Scharnierachsen-Orbitalebene)

3.2.2 Bennettwinkel

Bei der Seitwärtsbewegung eines Kondylus zur Körpermitte hin, beschreibt dieser eine bogenförmige Bahn mit im Verlauf unterschiedlicher Krümmung in der Horizontalebene. Zieht man eine Gerade durch den Ausgangspunkt und eine beliebige Stelle auf der Bahn, in der Regel bei 5mm Wegstrecke, und setzt diese in Beziehung zur Protrusionsbewegung erhält man den Bennettwinkel [9, 20, 39, 76].

In Tabelle 2 sind einige Untersuchungsergebnisse aus der Literatur zu diesem Winkel zusammengetragen [39].

Autor/Jahr	Probandenzahl	Methode	Ergebnisse/Mittelwert
Gysi 1929	n=18	Gysi-Bogen	5-25° / 15°
Fischer 1959	n=116	Gysi-Bogen	0-30°
Lundeen et al. 1973	n=50	Lee-Recorder	8°
Lauritzen et al. 1974	n=50	Laterale Wachsregistratur	0-45° / 23°
Koeck et al. 1976	n=56	Denar-Pantograph	6-27° / 23°
Utz et al. 1987	n=123	Paraokklusale Achsographie	0-61° / 8° bei Zahnführung, 15° bei seitlichem Druck (bei 5mm)
Lückerath/ 1991	n=60	Cadiax-System (okklusaler Nahbereich)	Rechts: 16,2° Links: 13,5° Manuell 36,9° rechts Manuell 33,0° links

Tabelle 2: Untersuchungsergebnisse zur Messung des Bennettwinkels

3.2.3 Initiale Bennettbewegung (immediate side shift)

Die Lateralexkursion des Unterkiefers zu einer Seite läuft nicht als geometrisch exakte Bewegung mit einem stillstehenden und einem sich bewegenden Kondylus ab. Vielmehr kann der Kondylus der Arbeitsseite zu Beginn der Bewegung einen kleinen Transversalversatz nach medial beschreiben. Dieser hat wiederum einen Einfluss auf die Krümmung der Mediotrusionsbahn und verändert so die Grösse des Bennettwinkels. [9, 20,76].

Tabelle 3 zeigt einige Messwerte aus der Literatur zur initialen Bennettbewegung [92, 102, 191].

Autor / Jahr	Messergebnis (mm)	Bemerkung
Hickey et al. 1963	0,3 2,7 4,0	Kaubewegung Zahnführung Maximalwert
Preiskel 1972	1,04	Maximalwert unter Zahnführung
McMillen 1972	0,28	Mittelwert Stützstift
Lundeen et al. 1973	1,0	Mittelwert, Stützstift, Führung
Koeck 1974	50% bis 0,40 79 % bis 0,8	Stützstift
Koeck et al. 1976	43% bis 0,4 – 0,8 48% bis 0,4 – 0,8	Stützstift Deckbiss Stützstift
Tupac 1978	0,24 0,83	Mittelwert Führung
Simonet et al. 1981	1,45 2,36	Mittelwert Führung
Utz et al. 1988	0,5	Mittelwert

Tabelle 3: Untersuchungsergebnisse zur Messung der initialen Bennettbewegung

3.3 Probandengut

Die Probanden unterzogen sich den Messungen für die vorliegende Studie im Zeitraum von Dezember 2002 bis Mai 2003 an der Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik der Universität Würzburg. Auswahlkriterien waren eine physiologische Kiefergelenksfunktion, sowie zahnmedizinische Vorbildung, die Kenntnis der durchzuführenden Bewegungen beinhaltet. Als Ausschlusskriterien galt das Auftreten nicht regelgerechter Kiefergelenksfunktion innerhalb der letzten zwölf Monate, wie Schmerzen, Knacken, Bruxismus/Reiben, Deviation/Zwangsbiss, eine bereits durchgeführte Therapie zur Behandlung einer Kiefergelenksdysfunktion, sowie eine Einstufung in Angle-Klasse II oder III.

3.4 Erhebungsbogen

Proband:

Geschlecht:	<input type="checkbox"/> 0:weiblich	<input type="checkbox"/> 1:männlich	
Alter			
KG-Befund(mind. 1Jahr ØBefund mehr			
Schmerzen	<input type="checkbox"/> 0:ja	<input type="checkbox"/> 1: nein	
Knacken	<input type="checkbox"/> 0:ja	<input type="checkbox"/> 1: nein	
Bruxismus/Reiben	<input type="checkbox"/> 0:ja	<input type="checkbox"/> 1:nein	
Deviation/Zwangs- biss	<input type="checkbox"/> 0:ja	<input type="checkbox"/> 1:nein	
Therapie durchgeführt	<input type="checkbox"/> 0:ja	<input type="checkbox"/> 1:nein	
Angle-Klasse	<input type="checkbox"/> I	<input type="checkbox"/> II	<input type="checkbox"/> III
Sagittaler Kondylenbahn- neigungswinkel nach 5mm Messstrecke	Arcus Pro Rechts: __° Links: __°	Achsiograph Rechts: __° Links: __°	CondylComp Rechts: __° Links: __°
Bennettwinkel bei 5mm Messstrecke	Rechts: __° Links: __°	Rechts: __° Links: __°	Rechts: __° Links: __°
Initiale Bennettbewegung	Re: __mm Li: __mm	Re: __mm Li: __mm	Re: __mm Li: __mm

Tabelle 4: Erhebungsbogen

3.5 Untersuchungsablauf

Nach Erhebung der Daten zur Anamnese und Feststellung der Abwesenheit von Kiefergelenkssymptomen durch Befragung, Inspektion und Palpation, erfolgt die Befestigung einer Bissgabel mittels schnell härtenden Abdruckgipses (Dr. Kühns' Abdruckgips® der Firma Hinrichs Harzer Edelgips Goslar) auf der Unterkieferfront. Dies verursacht eine inzisale Sperrung von etwa 1cm. Anschließend wird der Unterkieferbogen des Achsiograph verwendet, um die individuelle Scharnierachse des rechten und linken Kiefergelenkes festzulegen und auf der Haut anzuzeichnen. Dieser Hautpunkt dient als Orientierungspunkt für die Lage der Achspunkte bei der Montage aller drei Systeme. Anschließend wird der Achsiograph vollständig montiert und die Bewegungsbahnen für die Protrusion, sowie der Transversalversatz für die Ermittlung des Bennettwinkels und der initialen Bennettbewegung für beide Gelenke registriert. Danach erfolgen die Messungen mit dem Arcus Pro-System und dem String-Recorder. In die Statistik fließt dabei der Mittelwert aus jeweils drei Aufzeichnungen pro Parameter ein. Im Folgenden werden die einzelnen Systeme und die Durchführung der Messungen detailliert beschrieben.

3.6 Messsysteme

3.6.1 Axiograph 2



Abb. 7: SAM Gesichts- und Registrierbogen am Probanden montiert

Der Axiograph 2 der Firma SAM[®] München besteht aus einem Flaggenbogen, der am Oberkiefer und einem Registrierbogen, der über einen Löffel an der UK-Front befestigt wird (Abb. 7).

Der exakt sagittal stehende Löffelstiel dient als Träger des Registrierbogens, dessen Achszeiger auf den Achspunkt eingestellt sein müssen. Zuerst wird der Registrierbogen auf den Löffelstiel geschoben, die Achszeiger der Querarme werden auf den markierten Hautpunkt ausgerichtet und die Fixierklemme angezogen. Nun folgt die Ausrichtung des Flaggenbogens auf die Achs-Orbital-Ebene (=Frankfurter Horizontale). Dazu wird die Nasenstütze der Glabella aufgelegt und die Hinterränder der Flaggen schließen mit den dorsalen Tragusenden ab, während die Flaggenarme knapp über dem Ohr verlaufen, Brillenbügeln ähnlich. Ein Hinterhauptgummiband stabilisiert den Bogen am Kopf. Der Orbitalzeiger soll so eingestellt sein, dass er auf Höhe der Orbitaunterrandes den Nasenflügel berührt und so den anterioren Bezugspunkt der Achs-Orbital-Ebene bildet. Danach folgt die Bestimmung des Plattenabstandes.

Mittels der Feinjustierschrauben am Registrierbogen wird die Scharnierachse kinematisch exakt eingestellt. Nun können die Achszeiger gegen die Messuhr mit Schreibstift getauscht, auf die gewünschte Vorspannung eingestellt und die Messungen durchgeführt werden. Zuerst erfolgen die Aufzeichnungen von drei Protrusionsbewegungen, und anschließend drei Mediotrusionsbewegungen zur Ermittlung des Bennettwinkels. Ein über der aufgezeichneten Protrusionspur befestigter, transparenter und mit Millimeterskalierung versehener Aufkleber ermöglicht einen schrittweisen Bewegungsablauf. Die Ablesung des Transversalversatzes geschieht über Messuhren jeweils schrittweise von ein bis fünf Millimeter und wird notiert. Dies ermöglicht später eine zweidimensionale Darstellung der Bewegungsbahn in der Horizontalebene und die Bestimmung der initialen Bennettbewegung.

Die Auswertung der aufgezeichneten Bahnen und die Bestimmung der Winkel wird über eine skalierte Messlupe und die zugehörige Umrechnungstabelle vorgenommen. Als Bezugsebene dient die Achs-Orbital-Ebene, die mittels eines an Nasenzeiger und Flaggen befestigten Lineals auf den Messaufklebern eingezeichnet wird.

3.6.2 Arcus Pro

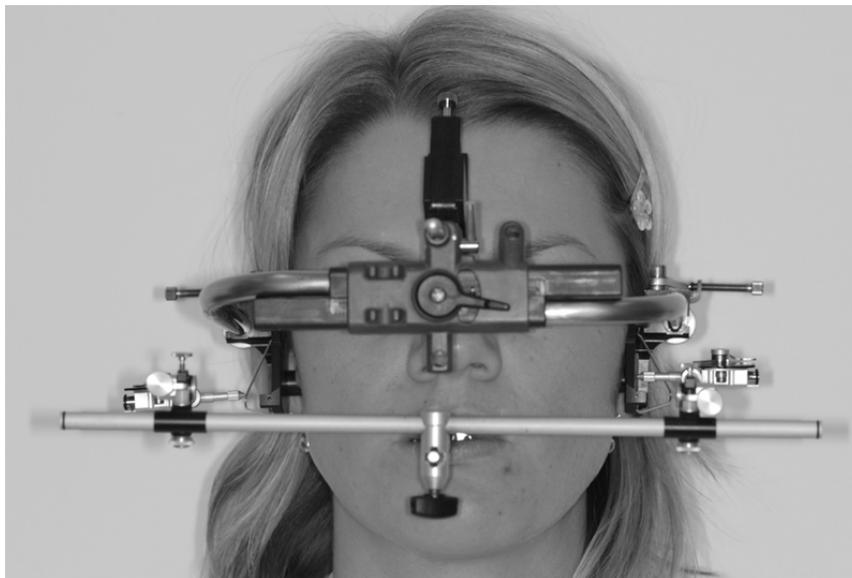


Abb. 8: KaVo Gesichts- und Registrierbogen am Probanden montiert

Das zu untersuchende System Arcus Pro der Firma KaVo EWL[®] D-Leutkirch besteht aus einem auf die Achs-Orbital-Ebene ausgerichteten Oberkiefergesichtsbogen und einem Unterkiefermessbogen, der an den Zähnen befestigt wird (Abb. 8). Die Befestigung des Gesichtsbogens erfolgt mittels Ohroliven und Hinterhauptfixierklemmen im Bereich des Achspunktes. Am Infraorbitalpunkt wird der Bogen über eine höhenverstellbare Nasenstütze und einen Infraorbitalzeiger justiert. Der Oberkieferbogen trägt die Schreibplattenhalterungen, deren Abstand voneinander an einer Skalierung abzulesen ist und notiert wird.

Der Unterkiefermessbogen wird über einen Befestigungslöffel inzisal auf der UK-Front befestigt und über ein Klemmstück mit dem Bogen verbunden. Die Seitenarme wiederum sind über zwei Einstellschrauben in vier Richtungen verstellbar am Querarm befestigt und tragen an ihren Enden eine Schreibspitze und eine Messuhr. Über Einstellschrauben können die Schreibspitzen zunächst auf einen arbiträren und dann genau auf den individuellen Achspunkt justiert werden. Nachdem die Schreibspitze mit dem Registrierpapier in Kontakt gebracht ist, führt der Proband drei Protrusionsbewegungen durch und der Stift zeichnet die Bewegungsbahn auf. Der Anpressdruck der Schreibspitze auf der

Registrierplatte ist so einzustellen, dass der Zeiger der Messuhr bei null zu stehen kommt. Zur Ermittlung des Bennetwinkels ermöglicht ein transparenter Aufkleber mit Millimeterskalierung, wie zuvor beim Axiograph, das schrittweise Abfahren der Mediotrusionsspur. Nun führt der Proband drei Mediotrusionsbewegungen durch, wobei die Verlagerung des Kondylus entlang der Transversalen bei jedem vollen Millimeter von eins bis fünf abgelesen wird. Zur Auswertung der aufgezeichneten Bahnen wird der OK-Bogen auf einen Protar-Artikulator der Firma KaVo EWL montiert und die Achs-Orbitalebene auf das Registrierpapier übertragen. Die Winkel- und Streckengrößen lassen sich durch die Messlupe ablesen und auf dem Registrierpapier notieren. Anhand von Tabellen können die den Werten entsprechenden Winkel abgelesen werden.

3.6.3 String-Condylcomp LR3

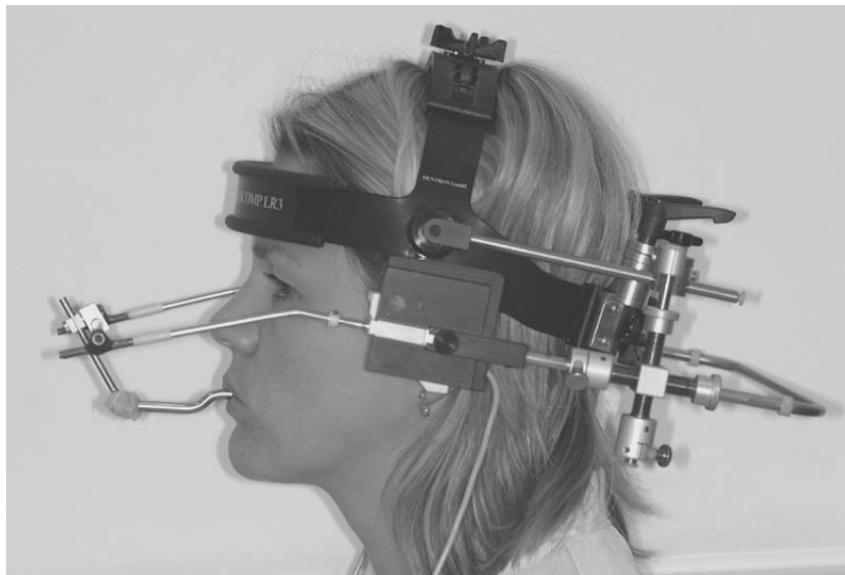


Abb. 9: String CondylComp LR3 Kopfhalterung und Messbogen am Probanden

Der String-Condylcomp LR3[®] der Firma Dentron in Höchberg besteht aus einem Referenzbogen mit integrierbarem Gesichtsbogen, der nach Justierung am Schädel gegen die Messboxen ausgetauscht wird und einem an der Unterkieferfront befestigten Registrierbogen, der die Gelenkbewegungen überträgt (Abb. 9). Vor Beginn der Messungen wurde gemäß der

Bedienungsanleitung eine Eichung des Geräts durchgeführt. Die Befestigung des Referenzbogens erfolgt über eine verstellbare Kopfhalterung. Die Montage beinhaltet eine Ausrichtung der Achszeiger auf den angezeichneten Achspunkt und des Gesichtsbogens auf die Bipupillarlinie, sowie den Orbitaunterrand. Nach Fixierung in dieser Position erfolgt der Austausch des Gesichtsbogens gegen die optoelektronischen Messboxen. Über Fixierklemmen ist der modifizierte Registrierbogen an den Messboxen befestigt. Als Modifizierung wurden die Längsarme des Bogens mittels Pattern Resin® der Firma GC Corporation, Tokyo, Japan, starr mit einem dickeren Querarm verbunden, um Verwindungen innerhalb des Bogens zu minimieren. Der Querarm wird durch Klemmschrauben an der Bissgabel fixiert und die Fixierklemmen an den Messboxen werden entfernt. Anschließend können die Messungen durchgeführt werden. Die Speicherung und Auswertung geschieht über einen angeschlossenen Laptop mit der String Software Jaws 3.0®. Dabei erfolgt zuerst die elektronische Festlegung des Achspunktes, danach die Durchführung und Speicherung der Messungen. Hat die Software den exakten Achspunkt anhand von Probebewegungen bestimmt, werden die Korrekturdaten auf dem Bildschirm angezeigt. Zur Auswertung gibt der Computer die sagittale Kondylenbahnneigung graphisch in drei Ebenen und als Winkelwert bei 5mm Bahnlänge wieder. Die Mediotrusionsbahnen lassen sich ebenfalls graphisch darstellen und die Winkelwerte an jedem beliebigen Punkt der Bahn, sowie der Immediate side shift bzw. die initiale Bennettbewegung wiedergeben.

3.7 Statistische Methoden

3.7.1 Überblick über die verwendeten Verfahren

Im Rahmen der vorliegenden Analysen wurden - je nach Fragestellung - die folgenden Kennwerte angegeben:

Das arithmetische Mittel, als Maß für Variabilität die Standardabweichung, das Minimum und Maximum, die Fallzahl, sowie die Perzentile.

Perzentile, zu denen auch der Median zählt, können als „Eckpunkte“ einer Werteverteilung bezeichnet werden. Beispielsweise charakterisiert der Median den Wert, der die Stichprobe in der Mitte teilt.

3.7.2 Überblick über die verwendeten Testverfahren zur Bestimmung der statistischen Signifikanz und kurze Erläuterung der Zielsetzung

Die Tabelle 5 gibt einen Überblick über die verwendeten statistischen Rechenverfahren. Ohne Ausnahme werden alle statistischen Tests rein explorativ eingesetzt. Insofern haben alle Befunde keinen „beweisenden“ oder „konfirmativen“ Charakter.

Statistisches Prüfverfahren	Zielsetzung
Korrelationskoeffizient nach Spearman	<p>Korrelation von Daten, ohne dass eine Annahme hinsichtlich der Verteilungsform gemacht werden muss (z.B. Normalverteilung).</p> <p>Statistisch signifikante Korrelationskoeffizienten (als r bezeichnet) können wie folgt bewertet werden:</p> <p>$r \geq 0.70$ hohe oder sehr gute Korrelation (ausreichend für Individualprädiktionen mit mäßigem Prädiktionsfehler)</p> <p>$r \geq 0.50$ gute Korrelation (ausreichend für Gruppenprädiktionen)</p> <p>$r < 0.50$ moderate oder niedrige Korrelation (nicht ausreichend für eine Prädiktion)</p> <p>Auch das Vorzeichen des Koeffizienten ist wichtig: positiver Koeffizient $r > 0$: gleichläufiger oder „größer-größer“ Zusammenhang negativer Koeffizient $r < 0$: gegenläufiger oder „kleiner-größer“ Zusammenhang</p> <p>Wertebereich des Korrelationskoeffizienten: -1 bis +1</p>
Pratt-Wilcoxon-Sign-Rank-Test auf Unterschied (Bortz, 1992)	Wie Wilcoxon-Sign-Rank-Test, gibt jedoch auch einen p -Wert an, wenn überwiegend stabile Werte vorhanden sind und ein Trend strenggenommen nicht überprüft werden kann (wenn $p \leq 0.05$).
Wilcoxon-Sign-Rank-Test auf Äquivalenz (Wellek, 1994)	Prüft, ob zwei Messwiederholungsreihen als statistisch äquivalent betrachtet werden können (wenn $p \leq 0.05$ und als Äquivalenzbereich $\pm 5\%$ angenommen werden).

Tabelle 5: Überblick über die explorativ verwendeten statistischen Verfahren

3.7.3 Hinweise zur statistischen Symbolik

Explorativ berechnete statistische Signifikanzen werden mittels sogenannter p-Werte gekennzeichnet. Das "p" steht für "probability". Der p-Wert bezieht sich auf eine Nullhypothese (z.B. „kein Zusammenhang“ oder „kein Unterschied“). Diese vermutet man vorerst als wahr. Geringe p-Werte führen zur Ablehnung der Nullhypothese und machen eine Alternative („signifikanter Zusammenhang“, „signifikanter Unterschied“) plausibel. Die folgende Tabelle 6 zeigt einen Bewertungsmaßstab für die p-Werte.

Symbol	Irrtumswahrscheinlichkeit	Bedeutung
n.s.	$p > 0.05$	nonsignifikanter Unterschied zwischen Gruppen
n.s.	p von 0.05 bis 0.10	nonsignifikanter Unterschied, die Signifikanzschwelle wurde nur geringfügig verfehlt (insgesamt liefert dies einen Hinweis auf einen möglichen Unterschied, siehe SACHS 1992) , der jedoch in Folgestudien zu verifizieren ist
*	$p \leq 0.05$	signifikanter Unterschied
**	$p \leq 0.01$	hochsignifikanter Unterschied
***	$p \leq 0.001$	hochsignifikanter Unterschied (gleiche Formulierung wie bei $p \leq 0.01$)

Tabelle 6: Bewertungsmaßstab für p-Werte

4. Ergebnisse

4.1 Probandengut

Das untersuchte Kollektiv setzt sich aus 16 Personen, 7 weiblichen und 9 männlichen zusammen. Das Durchschnittsalter betrug zum Zeitpunkt der Messungen 27,12 Jahre.

4.2 Überblick über die Basisdaten

Da die Fragestellung dieser Arbeit ein Vergleich von Methoden ist, werden die 16 Probanden statistisch jeweils als ganze Fälle behandelt, anstatt rechtes und linkes Kiefergelenk getrennt zu betrachten. Intraindividuell wird für die Werte aus rechtem und linkem Kiefergelenk der Mittelwert gebildet. Eine Signifikanz bei den durchgeführten Prüfungen auf Korrelation, Unterschied und Äquivalenz kann nur anhand von Fällen, nicht aber von Seiten berechnet werden, da die zu vergleichenden Datensätze voneinander unabhängig sein müssen.

Tabelle 7 gibt einen Überblick über die Basisdaten. Sie zeigt Durchschnittswerte (\pm Standardabweichung) und in Klammern das Minimum, das 25. Perzentil, den Median, das 75. Perzentil und schließlich das Datenmaximum.

Die Mittelwerte für die sagittale Kondylenbahnneigung betragen $52^\circ \pm 10^\circ$ Standardabweichung für Arcus Pro, $49^\circ \pm 9^\circ$ für Achsiograph und $40^\circ \pm 9^\circ$ für CondyloComp. Das gemessene Minimum betrug 18° , das Maximum 65° .

Bezüglich des Bennettwinkel betragen die Mittelwerte $7^\circ \pm 3^\circ$ für Arcus Pro, $6^\circ \pm 2^\circ$ für Achsiograph und $2^\circ \pm 5^\circ$ für Condylocomp. Das Minimum lag hier bei -6° , das Maximum bei 12° (das Auftreten negativer Werte wird im Kapitel Diskussion näher erläutert).

Beim immediate side shift (ISS) stellen sich die Werte folgendermaßen dar:

Der Mittelwert beträgt $0.12 \pm 0,09$ mm für Arcus Pro, $0,17 \pm 0,08$ mm für Achsiograph und $0,22 \pm 0,21$ mm für CondylComp. Das Minimum bildet $-0,20$ mm, das Maximum $0,65$ mm.

Sag. Kondylen- bahnneigung	Arcus Pro in Grad	52.06	+	8.96	(	30.00	45.00	54.50	59.25	62.50	)	16
	Achsiograph in Grad	50.09	+	8.91	(	29.00	44.50	52.00	56.75	65.00	)	16
	CondylComp in Grad	40.34	+	9.60	(	17.50	35.50	42.75	46.75	54.50	)	16
Bennettwinkel bei 5 mm	Arcus Pro in Grad	6.80	+	2.54	(	2.75	4.88	6.50	8.63	12.50	)	16
	Achsiograph in Grad	6.47	+	3.70	(	1.75	3.20	6.10	9.71	13.00	)	16
	CondylComp in Grad	2.32	+	4.54	(	-4.50	-1.75	2.00	6.25	9.50	)	16
ISS	Arcus Pro in mm	0.12	+	0.09	(	0.00	0.09	0.10	0.16	0.25	)	16
	Achsiograph in mm	0.17	+	0.08	(	0.05	0.10	0.18	0.21	0.30	)	16
	CondylComp in mm	0.22	+	0.21	(	-0.20	0.09	0.18	0.35	0.65	)	16

Tabelle 7: Deskriptive Statistiken
Werte gefolgt von Klammern sind Mittelwert \pm SD, mit Min., allen Quartilen und Max. in Klammern.
Werte nach der Klammer sind die Fallzahl valider Daten. Werte gerundet.

4.3 Korrelationsprüfungen

Eine Prüfung auf Systemübereinstimmungen mittels Spearman's Rangkorrelationskoeffizient (siehe Abbildung 9 bis Abbildung 11) resultierte in durchweg signifikanten Korrelationen zwischen den Systemen (in den Abbildungen mit r bezeichnet). Die Übereinstimmung liegt teils im sehr hohen Bereich von gerundet 0.9 (sagittaler Kondylenbahnneigungswinkel, Bennettwinkel). Sie fällt jedoch deutlich geringer aus, sobald CondylComp-Daten einbezogen werden.

Schlussfolgernd kann festgehalten werden, dass zwar alle korrelativen Übereinstimmungen statistisch signifikant sind, dass die Absoluthöhe der Koeffizienten (r) aber nur für die Übereinstimmung von Arcus Pro und Achsiograph bei sagittalem Kondylenbahnneigungswinkel und Bennettwinkel im optimalen Bereich liegt. Dies bedeutet, dass für die Korrelation von Arcus Pro mit Achsiograph Einzelfallvorhersagen zulässig sind, während für die Korrelation mit CondylComp nur Gruppenvorhersagen möglich sind.

Diese Befunde werden im nächsten Kapitel nochmals zusammenfassend erläutert. (Tabelle 8).

In den Abbildungen 9 –11 sind die Korrelationen der Referenzsysteme graphisch gegen Arcus pro aufgetragen. Zur besseren Lesbarkeit ist in schwarz die Ideallinie eingezeichnet.

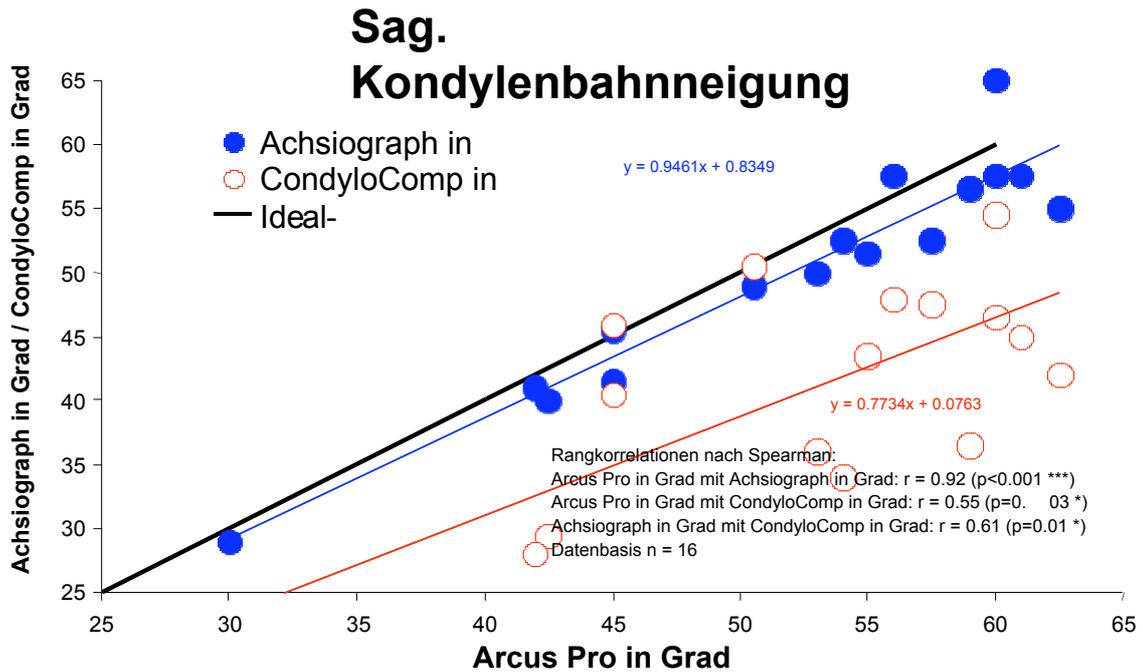


Abbildung 9 Korrelationsprüfung der Sag. Kondylenbahnneigungsdaten. Korrelationskoeffizient nach Spearman (als r bezeichnet, Bortz, 1992) und explorative Prüfung auf statistische Signifikanz.

Bennettwinkel bei 5 mm

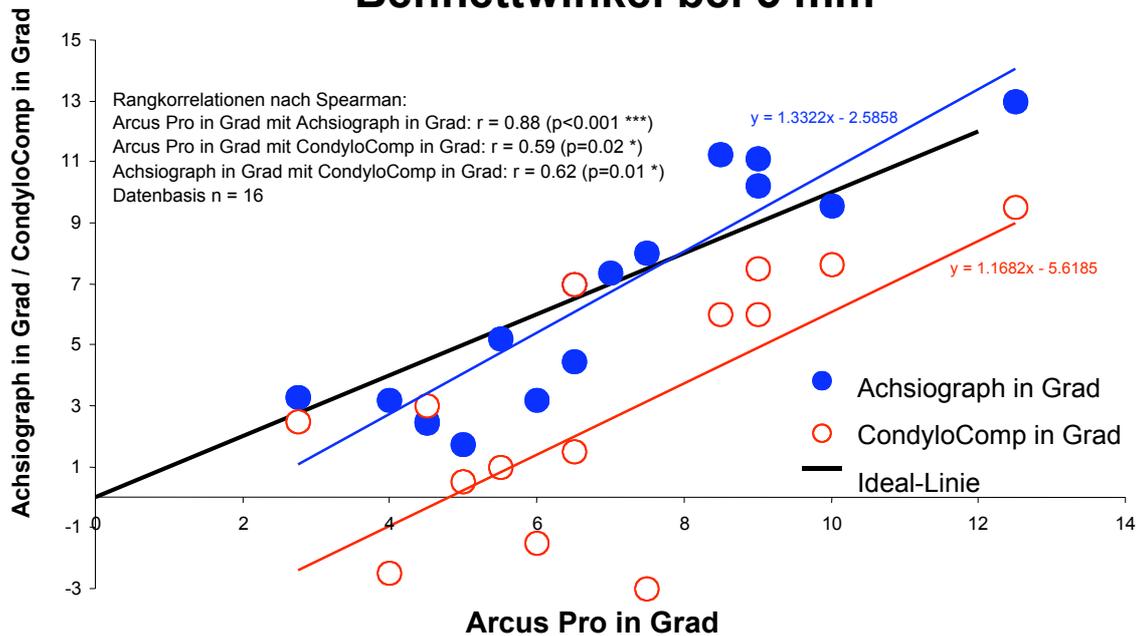


Abbildung 10: Korrelationsprüfung des Bennettwinkels. Korrelationskoeffizient nach Spearman (als r bezeichnet, Bortz, 1992) und explorative Prüfung auf statistische Signifikanz.

ISS

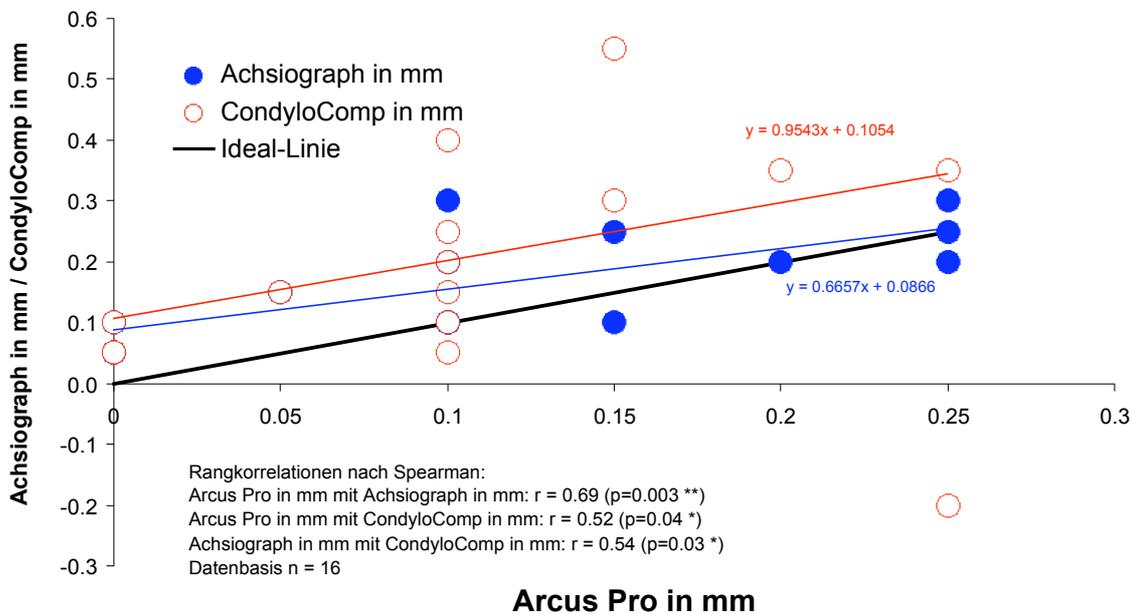


Abbildung 11: Korrelationsprüfung der ISS-Daten. Korrelationskoeffizient nach Spearman (als r bezeichnet, Bortz, 1992) und explorative Prüfung auf statistische Signifikanz

4.3.1 Zusammenfassung der Korrelationsbefunde

Eine Zusammenfassung der Prüfung auf Systemübereinstimmung zeigt neben durchweg statistisch signifikanten Korrelationen (explorative Prüfung, siehe Tabelle 8, rechte Spalte; der Bewertungsmaßstab für p-Werte findet sich am Ende des Kapitels) im wesentlichen die hohen Übereinstimmungen zwischen Arcus Pro und Achsiograph bezüglich sagittaler Kondylenbahnneigung und Bennettwinkel, sowie moderaten Korrelationen bezüglich CondylComp.

Spearman's Rangkorrelation					
	Korrelation	Koeffizient	p-Wert	Fälle	Wertung
Sag. Kondylenbahnneigung	Arcus Pro in Korr. mit Achsiograph	r = 0.92	p<0.001 ***	n = 16	hohe Korr.
	Arcus Pro in Korr. mit CondylComp	r = 0.55	p=0.03 *	n = 16	moderate Korr.
	Achsiograph in Korr. mit CondylComp	r = 0.61	p=0.01 *	n = 16	moderate Korr.
Bennettwinkel bei 5 mm	Arcus Pro in Korr. mit Achsiograph	r = 0.88	p<0.001 ***	n = 16	hohe Korr.
	Arcus Pro in Korr. mit CondylComp	r = 0.59	p=0.02 *	n = 16	moderate Korr.
	Achsiograph in Korr. mit CondylComp	r = 0.62	p=0.01 *	n = 16	moderate Korr.
ISS	Arcus Pro in Korr. mit Achsiograph	r = 0.69	p=0.003 **	n = 16	moderate Korr.
	Arcus Pro in Korr. mit CondylComp	r = 0.52	p=0.04 *	n = 16	moderate Korr.
	Achsiograph in Korr. mit CondylComp	r = 0.54	p=0.03 *	n = 16	moderate Korr.

Tabelle 8: Zusammenfassung der Korrelationsbefunde (als r bezeichnet, Prüfung auf statistische Signifikanz, siehe die p-Werte) und Wertung der Höhe des Korrelationskoeffizienten (rechte Spalte der Tabelle)

4.4 Prüfungen auf Unterschied

Ergänzend wurde explorativ geprüft, ob die in Tabelle 1 berichteten Unterschiede zwischen den Systemen auch statistisch bedeutsame Unterschiede widerspiegeln. Hierzu wurde ein klassischer Test auf Unterschied bei paarigen Daten eingesetzt, der Pratt-Wilcoxon-Sign-Rank-Test (Bortz 1990).

Die Tabelle 9 zeigt, dass die Unterschiede - wenn auch in geringen Bereichen – stets als explorativ signifikant bezeichnet werden können, mit zwei Ausnahmen, die in der Tabelle mit non-signifikant bezeichnet sind (Arcus Pro Unterschied zu Achsiograph und Achsiograph Unterschied zu CondylComp).

	Explorative Unterschiedsprüfung (Pratt -Wilcoxon-Sign-Rank-Test for difference, Bortz 1990)	p-Wert
Sag. Kondylenbahnneigung	Arcus Pro Unterschied zu Achsiograph	p=0.01 *
	Arcus Pro Unterschied zu CondylComp	p<0.001 ***
	Achsiograph Unterschied zu CondylComp	p<0.001 ***
Bennettwinkel bei 5 mm	Arcus Pro Unterschied zu Achsiograph	p=0.68 n.s.
	Arcus Pro Unterschied zu CondylComp	p<0.001 ***
	Achsiograph Unterschied zu CondylComp	p<0.001 ***
ISS	Arcus Pro Unterschied zu Achsiograph	p=0.02 *
	Arcus Pro Unterschied zu CondylComp	p=0.01 *
	Achsiograph Unterschied zu CondylComp	p=0.16 n.s.

Tabelle 9: Ergebnisse der explorativen Prüfung auf Unterschied mittels Pratt-Wilcoxon-Sign-Rank-Test (Bortz 1990)

Schlussfolgernd kann festgehalten werden, dass die Systeme zwar insgesamt miteinander korrelieren, d.h. die Daten in vergleichbare Richtungen zeigen, jedoch einige bedeutsame d.h. nicht zu vernachlässigende Unterschiede feststellbar sind, wie die vorhergehende Tabelle 9 zeigt.

4.5 Prüfungen auf Äquivalenz

Lässt man umgekehrt einen tolerablen Unterschied von $\pm 5\%$ zwischen den Systemen zu, d.h. werden Grenzen definiert, innerhalb derer eine Abweichung noch toleriert wird, so zeigt sich (mittels explorativer Äquivalenzprüfung, Wilcoxon-Sign-Rank-Test auf Äquivalenz, Wellek 1992), dass sämtliche Systemvergleiche innerhalb dieser Toleranz kein statistisch signifikant äquivalentes Ergebnis liefern (Tabelle 10), denn alle Befunde dieser Tabelle müssen bzgl. der Frage "Äquivalenz" als non-signifikant bezeichnet werden.

	Explorative Äquivalenzprüfung (Wilcoxon-Sign-Rank-Test for equivalence, Wellek 1992)	p-Wert
Sag. Kondylenbahnneigung	Arcus Pro Unterschied zu Achsiograph	p=0.20 n.s.
	Arcus Pro Unterschied zu CondylComp	p=1.00 n.s.
	Achsiograph Unterschied zu CondylComp	p=1.00 n.s.
Bennettwinkel bei 5 mm	Arcus Pro Unterschied zu Achsiograph	p=0.45 n.s.
	Arcus Pro Unterschied zu CondylComp	p=1.00 n.s.
	Achsiograph Unterschied zu CondylComp	p=1.00 n.s.
ISS	Arcus Pro Unterschied zu Achsiograph	p=0.96 n.s.
	Arcus Pro Unterschied zu CondylComp	p=0.99 n.s.
	Achsiograph Unterschied zu CondylComp	p=0.84 n.s.

Tabelle 10: Ergebnisse der explorativen Prüfung auf Äquivalenz mit maximal **5%-iger** Abweichung der Systeme.

Lässt man höhere Toleranzen zu, wie etwa 10% (siehe Tabelle 11) oder 20% (Tabelle 12) zu, so zeigen sich Arcus Pro und Achsiograph als signifikant äquivalent für den Parameter sagittale Kondylenbahnneigung ($p < 0.001$ *** , siehe Tabelle 11), bei 20% Toleranz ist auch der Bennettwinkel bei 5 mm zwischen Arcus Pro und Achsiograph als statistisch signifikant äquivalent zu bezeichnen ($p = 0.04$ * , siehe Tabelle 9). Noch höhere Toleranzschwellen im Sinne einer Umschlagspunktdetektion jenseits 20% Toleranz wurden nicht einbezogen.

	Explorative Äquivalenzprüfung (Wilcoxon-Sign-Rank-Test for equivalence, Wellek 1992)	p-Wert
Sag. Kondylenbahnneigung	Arcus Pro Unterschied zu Achsiograph	$p < 0.001$ ***
	Arcus Pro Unterschied zu CondylComp	p=1.00 n.s.
	Achsiograph Unterschied zu CondylComp	p=0.99 n.s.
Bennettwinkel bei 5 mm	Arcus Pro Unterschied zu Achsiograph	p=0.28 n.s.
	Arcus Pro Unterschied zu CondylComp	p=1.00 n.s.
	Achsiograph Unterschied zu CondylComp	p=1.00 n.s.
ISS	Arcus Pro Unterschied zu Achsiograph	p=0.96 n.s.
	Arcus Pro Unterschied zu CondylComp	p=0.99 n.s.
	Achsiograph Unterschied zu CondylComp	p=0.84 n.s.

Tabelle 11: Ergebnisse der explorativen Prüfung auf Äquivalenz mit maximal **10%-iger** Abweichung der Systeme.

	Explorative Äquivalenzprüfung (Wilcoxon-Sign-Rank-Test for equivalence, Wellek 1992)	p-Wert
Sag. Kondylenbahnneigung	Arcus Pro Unterschied zu Achsiograph	p<0.001 ***
	Arcus Pro Unterschied zu CondylComp	p=0.80 n.s.
	Achsiograph Unterschied zu CondylComp	p=0.53 n.s.
Bennettwinkel bei 5 mm	Arcus Pro Unterschied zu Achsiograph	p=0.04 *
	Arcus Pro Unterschied zu CondylComp	p=1.00 n.s.
	Achsiograph Unterschied zu CondylComp	p=1.00 n.s.
ISS	Arcus Pro Unterschied zu Achsiograph	p=0.86 n.s.
	Arcus Pro Unterschied zu CondylComp	p=0.99 n.s.
	Achsiograph Unterschied zu CondylComp	p=0.56 n.s.

Tabelle 12: Ergebnisse der explorativen Prüfung auf Äquivalenz mit maximal **20%-iger** Abweichung der Systeme.

Schlussfolgernd waren signifikante Systemkorrelationen, die für das System Arcus Pro und dem Achsiograph im optimalen Bereich liegen, feststellbar. Allerdings liefern alle Systeme Unterschiede, die bei einer explorativen Prüfung als statistisch bedeutsam gewertet werden müssen.

5. Diskussion

5.1 Allgemeines

Trotz der in der Literatur festgestellten hohen Genauigkeit der Referenzsysteme Achsiograph und CondylComp LR3 [2, 12, 32, 79, 128, 133, 153, 154, 184, 190, 191, 192, 204], unterscheiden sich deren Messwerte intraindividuell beträchtlich. Lediglich hinsichtlich des durchgeführten Vergleichs von Arcus Pro mit Achsiograph ergibt sich eine hohe Korrelation für den sagittalen Kondylenbahnneigungswinkel und den Bennettwinkel. Aus den vorliegenden Daten lässt sich keine eindeutige Beurteilung der Messgenauigkeit von Arcus Pro in-vivo ableiten.

5.2 Probanden

Bei den untersuchten Individuen handelt es sich durchgehend um Probanden, nicht um Patienten. Dies bedeutet, dass die Probanden subjektiv keine Beschwerden oder Veränderungen der Kiefergelenke verspüren. Anhand einer Befragung gemäss dem Erhebungsbogen (Tabelle 4) mit anschließender inspektorischer und palpatorischer Untersuchung konnten die Messergebnisse beeinflussende, unphysiologische Kiefergelenksfunktionen weitgehend ausgeschlossen werden. Hinweise auf Auswahlverfahren und Ausschlusskriterien für Probanden in vergleichbaren Studien waren in der Literatur nicht zu finden.

5.3 Untersuchungsmethoden

Für alle drei Systeme sind Fehler hinsichtlich Montage und Anwendung nicht auszuschließen. Die Hauptfehlerquellen werden von verschiedenen Autoren

beschrieben [9, 32, 93, 95, 124, 125, 150, 188, 194, 204]. Hier eine Zusammenfassung der Wichtigsten:

1. Montage- und Justierfehler, die zu einer Divergenz zwischen Registrierbogenachse und Gelenkachse führen, erzeugen direkte Fehler [32, 150]. Daher ist der Montageanleitung der einzelnen Systeme peinlichst genau zu entsprechen.
2. Die Distanz zwischen Bewegungsort und Messort kann aufgrund von Projektionen zu zentralperspektivischen Abbildungen bei den Aufzeichnungen führen. Dies tritt auf, wenn die Interkondylarachse fehllokalisiert ist, oder die Bewegungsbahnen der Kondylen bezüglich Geschwindigkeit, Länge und Krümmung unterschiedlich verlaufen, wodurch wiederum eine Veränderung der festgelegten Interkondylarachse resultiert. Ohlrogge [150] beschreibt, dass bei unterschiedlicher Neigung der rechten und linken Protrusionsbahn flache Bahnen flacher und steile Bahnen steiler aufgezeichnet werden (reziproker Effekt). Klett [93, 95] konnte zeigen, dass es bei der Messung der Mediotrusionsbewegung zur Ermittlung des Bennettwinkels zu Vergrößerungseffekten kommt. Einfluss auf die Größe des Fehlers haben dabei die initiale transversale Translationsbewegung (immediate side shift, ISS) und der Abstand Messstelle – Gelenk. Auf der Laterotrusionsseite führt diese Projektion zu einer scheinbaren Retrusion. Bei Axiograph und CondylComp ist dies bereits in den Auswertungstabellen bzw. der Auswertungssoftware von Klett [93, 94, 95] und Slavicek [180] berücksichtigt. Für den Arcus Pro liegen diesbezüglich keine Informationen vor.
3. Durch schnelle Bewegungen während des Messvorgangs kann es durch trägheitsbedingtes Nachschwingen der Apparatur zu scheinbaren Rückwärtsbewegungen des Kondylus kommen [32, 89].
4. Ein weiteres kontrovers diskutiertes Projektionsphänomen stellt der Fischerwinkel dar [74, 93, 116, 131], auf den hier nicht näher eingegangen werden soll, da die ihm zugrunde liegenden Ursachen bereits unter 1. behandelt wurden.

5. Infolge der Verwendung eines okklusalen Löffels zur Befestigung der Messbögen entsteht eine inzisale Bissperrung, die sich aus der Dicke des Löffels von circa 2mm und des individuellen Frontzahnüberbisses (overbite) zusammensetzt. Dies führt zu einer teilweisen Vorwegnahme der rein rotatorischen Komponente am Anfang einer Bewegung, da sich die Kondylen bereits aus ihrer Ausgangsposition herausbewegen. Die Angaben, bis zu welchem Schneidekantenabstand eine reine Rotationsbewegung stattfindet, schwanken in der Literatur zwischen 8 mm bei Körber und 19 mm bei Posselt [104, 133, 160, 161, 162]. Auch die Auswirkung der Sperrung wird unterschiedlich beurteilt [39, 190].
6. Die zur Registrierung durchgeführte Bewegung des Unterkiefers kann in ihrem Verlauf variieren. Um diesen Fehler zu verkleinern, sind die in der vorliegenden Statistik verwendeten Werte jeweils der Mittelwert aus drei Bewegungsbahnen. Dieses Verfahren war für alle drei Systeme gleich. Weiterhin waren die Probanden theoretisch und praktisch mit den Bewegungen bereits vor der Messung vertraut, um eine möglichst hohe Reproduzierbarkeit zu gewährleisten.

5.4 Sagittaler Kondylenbahnneigungswinkel

Die Mittelwerte für den sagittalen Kondylenbahnneigungswinkel von $52^\circ \pm 10^\circ$ Standardabweichung für Arcus Pro, $49^\circ \pm 9^\circ$ für Achsiograph und $40^\circ \pm 9^\circ$ für CondyloComp, sowie das gemessene Minimum von 18° , das Maximum von 65° entsprechen den in der Literatur beschriebenen Durchschnittswerten von Koeck, Richter, Ecker, Utz, Lückerath und Bernhard, wie sie in Tabelle 1, Kapitel Material und Methode, aufgeführt sind.

Die durchgeführten Prüfungen auf Korrelation, Unterschied und Äquivalenz ergeben für den Vergleich von Arcus Pro mit Achsiograph eine hohe Korrelation, einen nicht signifikanten Unterschied und eine signifikante Äquivalenz bei maximal 10 %iger Abweichung. Dies bedeutet statistisch, dass

nicht nur Gruppen-, sondern auch Einzelfallvorhersagen der Messergebnisse des einen Systems für das andere zulässig sind. Diesen Werten zufolge besteht eine verlässliche Reproduzierbarkeit der Messungen mit Arcus Pro.

Dem gegenüber zeigt der Vergleich des zu untersuchenden Systems mit Condylcomp nur eine moderate Korrelation, einen signifikanten Unterschied und keine signifikante Äquivalenz bei 20%iger Abweichung. Dies verwundert, da Messungen mit dem CondylComp-System in zahlreichen in-vitro, wie auch in-vivo Studien [2, 32, 79, 128, 133, 153, 154, 184, 204] als reproduzierbar eingestuft worden sind. Aufgrund dieser Werte besteht keine verlässliche Reproduzierbarkeit der Messungen mit Arcus Pro.

5.5 Bennettwinkel

Bezüglich des Bennettwinkel betragen die Mittelwerte $7^\circ \pm 3^\circ$ für Arcus Pro, $6^\circ \pm 2^\circ$ für Achsiograph und $2^\circ \pm 5^\circ$ für Condylcomp. Das Minimum lag hier bei -6° , das Maximum bei 12° . Im Vergleich mit anderen Studien, wie in Tabelle 2, Kapitel Material und Methode dargestellt, fallen die Werte überwiegend niedriger aus [7, 32, 39, 76]. Ursache dafür kann unter anderem die Bissperrung kombiniert mit der Aufhebung der habituellen Eckzahnführung sein. Holste [76] erklärt, dass die Größe des Bennettwinkels in hohem Maße von der Lateralexkursion und dem immediate side shift beeinflusst werden. Die in der Literatur angegebenen Werte variieren sehr stark. Sie liegen zwischen 5° und 23° [191].

Eine Besonderheit stellt das Auftreten negativer Bennettwinkel dar. Als Ursache hierfür kommen okklusale Faktoren, nicht korrekt montierte Systeme (Bezugspunkte zu weit dorsal), sowie ein transversaler Versatz des Kondylus nach lateral während der Bewegung in Frage. Utz et al. [191] und Paak et al. [154] weisen bei negativen Bennetwinkelwerten darauf hin, dass die Ursachen hierfür sowohl in der Messtechnik, als auch in der Gelenkanatomie, sowie –physiologie liegen können.

Auffällig ist, dass die negativen Werte lediglich mit CondylComp gemessen wurden.

Statistisch liegt im Vergleich der Systeme eine signifikant hohe Korrelation zwischen Arcus Pro und Achiograph vor, die Einzelfallvorhersagen des einen Systems für das andere zulässt.

Im Vergleich mit den Werten des CondylComp zeigen sich moderate Korrelationen und signifikante Unterschiede.

5.6 Initiale Bennettbewegung (immediate side shift)

Der Mittelwert beträgt $0.12 \pm 0,09$ mm für Arcus Pro $0,17 \pm 0,08$ mm für Achiograph und $0,22 \pm 0,21$ mm für CondylComp. Das Minimum bildet $-0,20$ mm, das Maximum $0,65$ mm. Hierbei ist anzumerken, dass die Messuhr des Arcus Pro eine Skalierung in Schritten von $0,2$ mm aufweist, im Gegensatz zu $0,01$ mm bei Achiograph und ebenfalls $0,01$ mm Genauigkeit beim CondylComp.

Die gemessenen Werte sind im Vergleich mit den in Tabelle 3, Kapitel Material und Methode, genannten vergleichsweise klein. Hierbei kann die Zusammensetzung des Probandenguts eine tragende Rolle spielen, da es sich dabei um relativ junge und ausschließlich kiefergelenksgesunde Probanden handelt. In der Literatur weisen das Probandengut ein höheres Durchschnittsalter und den Zusatz „meist vollbezahnt“ auf [92, 102]. Auch Koeck [102] konnte bei 40% der Probanden keinen ISS feststellen.

Statistisch gesehen ergibt sich beim ISS ein signifikanter Unterschied zwischen allen Systemen. Entsprechend ergeben sich moderate Korrelationen und nicht signifikante Äquivalenzen, auch bei 20 %iger Abweichungstoleranz.

6. Zusammenfassung

Die instrumentelle Funktionsanalyse dient heute der Programmierung justierbarer Artikulatoren vor umfangreichen prothetischen Restaurationen, sowie der Diagnostik von Kiefergelenkserkrankungen. Für diese Zwecke wurde das System Arcus Pro der Firma KaVO EWL, Leutkirch, Deutschland entwickelt.

Ziel der vorliegenden Untersuchung ist eine Äquivalenzprüfung mit bereits erprobten und zuverlässigen Systemen. Dies ist der Achsiograph 2 der SAM Präzisionstechnik, München, Deutschland und der CondylCom LR3 der Firma Dentron, Höchberg, Deutschland. Die Prüfung erfolgt anhand der Messung von 3 Standardparametern der Kiefergelenksdiagnostik: Des sagittalen Kondylenbahnneigungswinkels, des Bennettwinkels und der initialen Bennettbewegung (immediate side shift, ISS).

Die Mittelwerte für den sagittale Kondylenbahnneigungswinkel betragen $52^\circ \pm 10^\circ$ Standardabweichung für Arcus Pro, $49^\circ \pm 9^\circ$ für Achsiograph und $40^\circ \pm 9^\circ$ für CondylComp. Das gemessene Minimum betrug 18° , das Maximum 65° . Bezüglich des Bennettwinkel betragen die Mittelwerte $7^\circ \pm 3^\circ$ für Arcus Pro, $6^\circ \pm 2^\circ$ für Achsiograph und $2^\circ \pm 5^\circ$ für Condylcomp. Das Minimum lag hier bei -6° , das Maximum bei 12° .

Beim ISS stellen sich die Werte folgendermaßen dar:

Der Mittelwert betrug $0,12 \pm 0,09$ mm für Arcus Pro $0,17 \pm 0,08$ mm für Achsiograph und $0,22 \pm 0,21$ mm für CondylComp. Das Minimum bildete $-0,20$ mm, das Maximum $0,65$ mm.

Statistisch ergibt sich eine hohe Korrelation und signifikante Äquivalenz für Arcus Pro mit Achsiograph bezüglich sagittaler Kondylenbahnneigungswinkel und Bennettwinkel, die Einzelfallvorhersagen für das jeweils andere System zulassen.

Im Vergleich zum Condylcomp und bezüglich der initialen Bennettbewegung ergeben sich moderate Korrelationen und signifikante Unterschiede, so dass nur Gruppenvorhersagen des jeweils anderen Systems zulässig sind.

Auffällig ist die hohe Übereinstimmung der beiden mechanisch-graphischen Systeme Arcus Pro und Achsiograph im Gegensatz zu den abweichenden Ergebnissen des CondylComp.

Um die Messgenauigkeit des Arcus Pro evidenzbasiert zu belegen, sind weitere Studien nötig.

7. Literaturverzeichnis

1. Nomenklatur
Dtsch Zahnärztl. Z 47, 347, 1992
2. Aizawa H. Motoki T.; Miyamae S.; Tanaka Y.; Hiranuma K.:
Studies on accuracy of mandibular movement measuring system
„Condylocomp LR3“Abstract and Poster # 1394
J. Dent. Res. 77, 806, 1998
3. Alsawaf M.M.; Garlapo D.A.:
Influence of tooth contact on the path of condylar movements
J Prosth Dent 67, 394, 1983
4. Balkwill F.H.:
Best form and arrangement of artificial teeth for mastication
Trans Odontol Soc Great Britain 9, 278-282, 1866
5. Bauer B.:
Der Einfluss der Schneidezahnführung auf die sagittale Kondylenbahn
Med Diss Tübingen, 1991
6. Baur E.M.; Greschner M.; Schaaf L.:
Praktische Tips für die Medizinische Doktorarbeit
Springer Verlag, 1996
7. Beck F.:
Untersuchungen zur Reproduzierbarkeit der Axiographie
Med Diss Erlangen, 1989

8. Behneke N.:
Aufzeichnungen von Unterkieferbewegungen mit dem
Sirognathographen
Dtsch Zahnärztl Z, 40, 192-195, 1985

9. Benner K.U.; Fanghänel J.; Kowalewski R.; Kubein-Meesenburg, D.;
Randzio J. (Hrsg.):
Morphologie, Funktion und Klinik des Kiefergelenks.
Quintessenz, Berlin, 1993

10. Bennett N. G.:
A contribution to the study of the movements of the mandible
J Prost Dent, 1958

11. Bernard N.; Schmitt L.; Utz K.H.:
Intraorale und extraorale Bestimmung der sagittalen
Kondylenbahnneigung im simultanen Vergleich
Dtsch Zahnärztl. Z 48, 309, 1993

12. Bernard N.; Utz K.H.; Schmitt L.:
Zur Präzision der mechanischen Achsiographie
Dtsch Zahnärztl. Z 51, 469, 1996

13. Berry H.M.; Hofmann A.:
Cineradiographic observations of temporomandibular joint function
J Prosth Dent, 21-33, 1959

14. Bewersdorff H.J.:
Elektrognathographie – elektronische dreidimensionale Messung und
Registrierung von Kieferbewegungen
Dtsch Zahn Mund Kieferheilkd 48, 99, 1967

15. Bock O.; Ortlieb R.; Ott, K.:
Untersuchungen über die Brauchbarkeit des Mandibularkinesiographen
Dtsch Zahnärztl Z 33, 639-642, 1978

16. Bonwill W.G.A.:
Scientific articulation of human teeth as founded on geometrical,
mathematical and mechanical laws
Dent Items Interest 21, 617, 1899

17. Bortz J.:
Statistik
Springer Verlag Berlin - Heidelberg, 1992

18. Bortz J.; Lienert G.A.; Boehnke K.:
Verteilungsfreie Methoden in der Biostatistik
Springer Verlag Berlin – Heidelberg 1990

19. Brunette D.M.:
Critical thinking – understanding and evaluating dental research
Quintessence, Chicago, 1996

20. Bumann A.; Lotzmann U.:
Funktionsdiagnostik und Therapieprinzipien.
Farbatlant der Zahnmedizin Band 12, Thieme, Stuttgart, 2000

21. Burckhardt R.:
Das TMJ-Registriersystem
Dent Product Report Intern 9, 1986

22. Burckhardt R.:
Optoelektronische berührungslose Kiefergelenksbewegungsregistrierung mit linear Meßwerterfassung und digitaler Meßwertverarbeitung. Vortrag, 16. Jahrestagung der AGF, Bad Nauheim 1982 8zit. In Meyer, G. ,1986
23. Campion G.G.:
A method of recording graphically the movements of the mandibular condyles in the living subject
J Brit Dent Assoc, 1902
24. Campion G.G.:
Some graphic records of the movements of the mandible in the living subject (and their bearing on the mechanism on the joint and construction of articulators)
Dent Cosmos 47, 39-42, 1905
25. Carlsson S.:
Recording of mandibular movements by intraorally placed light emitting diodes
Acta Odontol Scand 35, 111 1977
26. Celar A.; Celar R.; Piehslinger E.; Slavicek R.:
Die Bestimmung und Analyse der Länge der Protrusionsbahn mit Hilfe der elektronischen Axiographie
Z Stomatol 89, 119 1992
27. Chance D.A.; Williams E.O.; Huff T.L.; Andrews, D.H.:
Determination of chronology of mandibular border movements by optical pantography
J Prosth Dent 51, 559 1984

28. Chissin C.:
Über die Öffnungsbewegung des Unterkiefers
Arch Anat Physiol, 1906
29. Christensen C.; Müller M. (Hrsg.):
Ein rationeller Artikulator.
Grundlagen und Aufbau des Artikulationsproblems
Klinkhardt Verlag, Leipzig, 1925
30. Clayton J.A.; Crispin B.J.; Shiedls J.M.; Myers G.E.:
Clayton J.A.; Crispin B.J.; Shiedls J.M.; Myers G.E.:
J Dent Res 161, 55 1976
31. Clayton J.A.; Schmideder J.; Motsch, A. (Hrsg):
Pantographische Aufzeichnung der Unterkieferbewegungen
Registrierung der Unterkieferbewegung Quintessenz, Berlin 1982, S. 27
32. Cousin J.:
Über die Reproduzierbarkeit axiographischer Messungen mit dem String-
Condylcomp LR2.
Med Diss Münster
33. Crispin B.J.; Myers G.E.; Clayton J.A.:
Effects of occlusal therapy on pantographic reproducibility of mandibular
border movements
J Prosth Dent 40, 29 1978
34. Cueni H.; Graber G.:
Grenzbewegungen des Unterkiefers unter Normalbedingungen und unter
experimentellem Stress
Schweiz Monatsschr Zahnmed 96, 861 1986

35. De Pietro A.J.:
Recording instrument
Zit. In Kornfeld, M. 1974 bzw Meyer, G. 1986

36. Dos Santos J.:
Gnathologie – Prinzipien und Konzepte
Deutscher Ärzte-Verlag, Köln 1988

37. Drum R.K; Mitchell L.:
Spectral analysis of temporomandibular joint sounds: Preliminary study.
World Symposium on occlusion and the temporomandibular joint
Quintessenz Verlag, London, 1985

38. Eichner K.:
Röntgenkinematographische Studien der Bewegungen des Kondylus
zahnloser Patienten
Dtsch Zahnärztl Z 22, 251-258, 1967

39. Engelskirchen C.:
Untersuchung zur elektronischen Vermessung der transversalen und
sagittalen Unterkieferbewegung
Med Diss Bonn 1998

40. Ernst S.:
Reproduzierbarkeit von Kiefergelenksregistraten, gewonnen mit dem
SAS.Condylocomp nach G. Meyer und R. Klett
Med Diss München, 1991

41. Ferrein M.:
Sur les mouvements de la machiore inferieure
Hist de l' Acad Royale des Sciences, Paris, 1744

42. Fischer W.; Baum E.:
Motographie
Vortrag bei der Jahrestagung der DGZMK Bad Nauheim, 1985
43. Fischer-Brandies H.; Burckhardt R.; Gumbrecht H.:
Reproduzierbarkeit handgeführter und neuromuskulär gesteuerter
Kiefergelenksbewegungen
Dtsch Zahnärztl Z 43, S47, 1988
44. Frank L.:
A report on normal movements of the condyle
Dent Dig 54, 540-542, 1948
45. Freesmeyer W.B.; Luckenbach A.; Müller T.; Hüls A.:
Vergleichende Untersuchung mechanisch und elektronisch registrierter
Unterkieferbewegung in Beziehung zur Gelenktopographie
Dtsch Zahnärztl Z 39, 870, 1984
46. Freesmeyer W.B.:
Zahnärztliche Funktionstherapie
Hanser, München, 1993
47. Frommholt W.; Hielscher W.:
Röntgenkinematographische Studien zur Form der Kondylenbahn des
Kiefergelenkes
Fortschr Röntgenstr 69, 103-108, 1962
48. Ganzer H.:
Über die Bewegungsbahn des Unterkiefers, insbesondere beim
Menschen und bei den Nagetieren
Sitzungsber Ges Natur Freunde, 1908

49. Gerber A.:
Artikulatoren und Registrierutensilien
Condylator Service, Zürich, 1978
50. Gernet W.; Puff A.; Steinkraus C.:
Röntgenkinematographischer Vergleich der Kiefergelenksbewegungen
am gleichen Patienten mit Totalprothese nach unterschiedlicher
Kieferrelationsbestimmung
Dtsch Zahnärztl Z32, 385-390, 1977
51. Gernet W.; Puff A.; Fleischhauer H.-P.:
Ein Vergleich der graphischen Aufzeichnungen von stützstiftgeführten
und zahngeführten sagittalen Kondylenbahnen mit interferenzfreien
röntgenkinematographisch registrierten Bewegungen
Dtsch Zahnärztl Z 33, 846-849, 1978
52. Gernet W.:
Untersuchungen zur Aussage der kinesiographischen Funktionsanalyse
Dtsch Zahnärztl Z 36, 304-309, 1981
53. Gernet W.:
Die kinesiographischen Aufzeichnungen der Unterkieferbewegung
Dtsch Zahnärztl Z 37, 327-331, 1982
54. Gernet W.:
Funktionsanalysen im stomatognathen System
Hanser, München, 1982
55. Gibbs C.H.; Reswick J.B.; Messerman T.:
The Case Gnathic Replicator for the investigation of mandibular
movements. Case Institute of Technology,
EDC report No. EDC-4-66-14, Cleveland, 1966

56. Gibbs C.H.; Reswick J.B.; Messerman T.:
Functional movement of the mandible. Case Western Reserve
University,
EDC report no. EDC-4-69-24, Cleveland, 1969
57. Gibbs C.H.; Reswick J.B.; Messerman T.; Derda H.J.:
Functional movements of the mandible
J Prosth Dent 26, 604-620, 1971
58. Gillings B.R.D.:
Photoelectrical mandibulography: A technique for studying jaw
movements
J Prosth Dent 17, 109,121; 1967
59. Goodson J.M.; Johansen E.:
Analysis of human mandibular movement
In: Myers, H.M. (Hrsg.), Monographs in oral science
Karger Verlag, Basel, 1975
60. Graf H.:
Die drei Dimensionen der Grenzbewegungsbahnen des Kiefergelenks
Vortrag bei der 18. Jahrestagung der DGZMK, Bad Nauheim, 1985
61. Gysi A.A.:
Beitrag zum Artikulationsproblem
Hirschberg, Berlin, 1908
62. Gysi A.A.:
The problem of articulation
Dent Cosmos, 52, 148-169, 1910

63. Gysi A.A.:
Neuere Gesichtspunkte im Artikulationsproblem
Schw Vjschr Zahnh 22, 118-151, 1912
64. Häring R.:
Messung und Darstellung von dreidimensionalen Bewegungsabläufen
des Kiefergelenks mittels eines Echtzeit-Ultraschall-Topometers.
Med Diss Bonn 1986
65. Hall R. E.:
An analysis of the work and ideas of investigators and authors of
relations and movements of the mandible
J Am Dent Assoc, 1642-1693, 1929
66. Helfgen E.H.; Lückcrath W.; Grüner M.:
Die Frontzahnführung im Vergleich mit Krümmungen sagittaler
Kiefergelenkbewegungen
Dtsch Zahnärztl Z 46, 201, 1991
67. Heners M.:
Ein elektronisches Verfahren zur Registrierung von sagittalen
Grenzbewegungen des Unterkiefers
Dtsch Zahnärztl Z 28, 532-540, 1973
68. Heners M.:
Elektronische Untersuchungen zur dreidimensionalen Bewegung des
Unterkiefers
Dtsch Zahnärztl Z 32, 104-107, 1977
69. Hesse F.:
Zur Mechanik der Kaubewegungen des menschlichen Kiefers
Dtsch Monatl Z 517-523, 1897

70. Hickey J.C.; Allison M.L.; Woelfel J.B.; Boucher C.O.; Stacy R.W.:
Mandibular movements in three dimensions
J Prosth Dent 13, 72-92, 1963
71. Higley L.B.:
New and scientific method of producing temporo-mandibular-radiograms
Int J Orthod 22, 983, 1936
72. Higley L.B.; Logan R.A.:
Roentgenographic interpretation of certain condyle and menton
movements
J Am Dent Assoc 28, 779-785, 1941
73. Hildebrand G.Y.:
Studies on the masticatory movements of the human lower jaw
Scand Arch Physiol, Suppl. 61, 1-1903, 1931
74. Hobo S.; Mochizuki S.:
A kinematic investigation of mandibular border movement by means of
an electronic measuring system. Part I. Development of the measuring
system.
J Prosth Dent 50, 368-373, 1983
75. Hobo S.:
A kinematic investigation of mandibular border movements by means of
an electronic measuring system. Part II. A study on the Bennett
movement
J. Prosth Dent 51, 642, 1984

76. Holste T.:
Untersuchungen über den Bennett-Winkel
Dtsch Zahnärztl Z 35, 315, 1980
77. Hugger A.:
Gelenknahe elektronische Erfassung der Unterkieferfunktion und ihre
Umsetzung in den Artikulator
Habilitationsschriften der Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde
Quintessenz Verlags-GmbH, Berlin, 2000
78. Hugger A.; Edinger D.; Stüttgen U.:
Eine diagnostische Erweiterungssoftware zum String-Registriersystem
Dtsch Zahnärztl Z 51, 424, 1996
79. Hugger A.; Kordaß B.; Edinger D.; Stüttgen U.:
Simultane Bewegungsaufzeichnung mit zwei berührungslos messenden
Registriersystemen
Dtsch Zahnärztl Z 52, 536, 1997
80. Isaacson D.:
A clinical study of the Bennett movement
J Prosthet Dent 8, 641, 1958
81. Isberg-Holm A.M.; Westesson P.-L.:
Movement of disc and condyle in temporomandibular joints with clicking.
An arthrographic and cineradiographic study on autopsy specimens
Acta Odontol Scand 40, 151-164, 1982

82. Isberg-Holm A.M.; Westesson P.-L.:
Movement of disc and condyle in temporomandibular joints with and without clicking. A high-speed cinematographic and dissection study on autopsy specimen
Acta Odontol Scand 40, 165-177, 1982
83. Iwata T.:
Der Pantograph Cyberhovy F3
Vortrag Universitäts-ZMK-Klinik Göttingen, 1983
84. Jähnig A.; Kubein D.; Krüger W.; Stachniss V.:
Okklusion und Kiefergelenkdysfunktion. Vergleichende pantographische Funktionsuntersuchungen am Patienten mit paraokklusalen Löffeln
Dtsch Zahnärztl Z 35, 635-638, 1980
85. Jankelson B.; Swain C.W.; Crane P.F.; Radke J.C.:
Kinesiometric instrumentation: A new technology
J Am Dent Assoc, 90, 834-840, 1975
86. Johnson A.; Winstanley R.B.:
Recording sagittal condylar angles using a mandibular facebow
J Oral Rehabil 24, 904, 1997
87. Jemt T.; Carlsson S.:
Mandibular movements of young adults recorded by intraorally placed light emitting diodes
J Prosth Dent 42, 669, 1979
88. Karathanasis A.:
Zur Reproduzierbarkeit und Aussagekraft elektronischer Registrierbefunde von Kiefergelenkbewegungen und –positionen
Med Diss Würzburg, 1992

89. Klamt B.; Nägerl H.; Kubein-Meesenburg D.:
Vergleichende Untersuchung von Messmethoden zur Aufzeichnung der
räumlichen Mandibulabewegungen
Dtsch Zahnärztl Z 45, S 33, 1990
90. Klatsky M.:
The physiology of mastication
Am J Orthod 26, 205-210, 1939
91. Klatsky M.:
A cinefluorographic study of the human masticatory apparatus in
function
Am J Orthod 26, 664-670, 1940
92. Klein B.; Siebert G.:
Klinisch-pantographische Untersuchung zum immediate side shift
Dtsch Zahnärztl Z 33, 446, 1978
93. Klett R.:
Projektionsfehler bei der Winkelmessung mit Scharnierachsenschreibern
Dtsch Zahnärztl Z 37, 482, 1982 a
94. Klett R.:
Elektronische Registrierverfahren für die Kiefergelenksdiagnostik
Dtsch Zahnärztl Z 37, 991, 1982b
95. Klett R.:
Projektionsbedingte Messfehler bei der axialen Pantographie
Dtsch Zahnärztl Z 38, 44, 1983

96. Klett R.:
Neuentwicklung eines leichten Registriersystems für den String-
Condylcomp zur Erfassung der Unterkieferdynamik. Vortrag zur 23.
Jahrestagung der AFG, Bad Nauheim, 1990
97. Klett R.:
String-Condylcomp LR-3 Handbuch
Fa. Dentron, Höchberg, 1996
98. Knap F.J.; Richardson B.L.; Bogstad J.:
Motions of the mandible related to modern gnathologic concepts
J Prosth Dent 24, 148-158, 1970a
99. Knap F.J.; Richardson B.L.; Bogstad J.:
Study of the mandible motion in six degrees of freedom
J Dent Res 49, 289-292, 1970b
100. Knap F.J.; Abler J.H.; Richardson B.L.:
Computerized analysis and duplication of mandibular motion
J Prosth Dent 33, 535-541, 1975
101. Koeck B.:
Artikulatoren und Registriersysteme
In: Haunfelder, D., Hupfaut, L., Ketterl, W., Schmuth, G. (Hrsg.)
Praxis der Zahnheilkunde Bd.3
Urban & Schwarzenberg, München, 1984
102. Koeck B.:
Die initiale Bennettbewegung – Eine Untersuchung mit dem
Denarartikulator
Dtsch Zahnärztl Z 29, 997-1001, 1974

103. Koeck B.:
Über die Reproduzierbarkeit der Bestimmung der sagittalen
Gelenkbahnneigung
Dtsch Zahnärztl Z 29, 997, 1973
104. Körber K.H.:
Elektronische Registrierung der Unterkieferbewegung im normalen und
okklusionsgestörten Gebiss
Dtsch Zahnärztl Z 26, 167-176, 1971
105. Körber E.; Luckenbach A.:
Dreidimensionale Darstellung der Bewegung einzelner Punkte eines
Kiefermodells im Artikulator
Dtsch Zahnärztl Z 36, 462-466, 1981
106. Körber E.; Luckenbach A.:
Beitrag zur Registrierung der räumlichen Bewegung des
Unterkieferinzisalpunktes und der Kondylen.
Quintessenz Verlag, Berlin, 10, 1-11, 1982
107. Kohno S.:
Analyse der Kondylenbewegung in der Sagittalebene
Dtsch Zahnärztl Z 27, 739, 1972
108. Kohno S.; Nakano M.:
Kinesiologische Beziehung der Schneidezahnführung und der
Kondylenbahn bei der Vorschubbewegung
Dtsch Zahnärztl Z 38, 643, 1983

109. Kordaß B.; Hugger A.; Assheuer J.; Mai J.K.; Stüttgen U.:
Bewegungsstudien der Kiefergelenksfunktion
Zahnärztl Welt 101, 10, 1992
110. Kordaß B.; Rückert B.; Stüttgen U.:
Zur Länge und Lage der Interkondylarachse
Dtsch Zahnärztl Z 52, 546, 1997
111. Krönke A.:
Das funktionsgestörte Kauorgan
Hanser, München, 1987
112. Kurth L.E.:
Mandibular movements in mastication
J Am Dent Assoc 29, 1769-1790, 1942
113. Langer K.:
Das Kiefergelenk des Menschen
Sitzber Akad Wiss, Wien, 1860
114. Lauritzen A. G.; Bodner G. H.:
Variations in Location of Arbitrary and true hinge axis points
J Prosth. Dent 11, 24, 1961
115. Lee R.L.:
Jaw movements engraved in solid plastic for articulator controls
Part I: recording apparatus
J Prosth Dent 22, 209-224, 1969
116. Le Pera F.:
Understanding graphic records of mandibular movements
J Prosth Dent 18, 417, 1967

117. Lemmer J.; Lewin A.; Van Rensburg L.B.:
The measurement of jaw movements. Part I
J Prosth Dent 36, 211-218, 1976
118. Lewin A.; Lemmer J.; Van Rensburg L.B.:
The measurement of jaw movements. Part II
J Prosth Dent 36, 31 -318, 1976
119. Lewin A.:
Vorrichtung zur Messung des Ortes, der Lage und/oder der Orts- bzw.
Lageänderung eines starren Körpers im Raum
Deutsches Patentamt P 2715106.0-52, 1977
120. Lewin A.:
Einrichtung zur Messung des Ortes, der Lage und/oder einer Orts- bzw.
Lageänderung des Unterkiefers eines Patienten
Europäisches Patentamt, 80106652.3, 1980
121. Lindblom G.:
Technique for roentgenographic registration of different condyle positions
in the temporomandibular joint
Dent Cosmos 78, 1227-1235, 1936
122. Lindblom G.:
A cineradiographic study of the temporo-mandibular joint
Acta Odontol Scand 15, 141-158, 1957
123. Lindholm L.-E.; Oeberg T.:
An opto-electronic instrument for remote online monitoring
Biotelemed 1, 94-95, 1974

124. Lotzmann U.:
Die Auswirkungen einer fehllokalisierten Scharnierachse auf die
achsiographische Erfassung der mandibulären Kinematik
Zahnärztl Welt 99, 445, 1990
125. Lotzmann U.; Kobes L.W.R.:
Zum Einfluss von Gewicht und Schwerpunktlage des Unterkiefer-
Registrierbogens auf den Verlauf axiographischer Spuren
Dtsch Zahnärztl Z 43, S67, 1988
126. Luce C.E.:
The movements of the lower jaw
Boston med surg J 121, 8-11, 1889
127. Lückerath W.:
Die Bennettbewegung
Dtsch Zahnärztl Z 46, 180-193, 1991
128. Lückerath W.:
Vergleich der mechanischen und der dreidimensionalen elektronischen
Achsiographie
Dtsch Zahnärztl Z 44, 754, 1989
129. Lückerath W.:
Das transversale und vertikale Bewegungsspiel des Unterkiefers im
Bereich der Kauflächen und der Kiefergelenke – eine klinisch –
experimentelle Untersuchung bei funktionsgesunden und
funktionsgestörten Probanden
Med Habil Schrift Bonn, 1991

130. Lundeen H.C.; Mendoza F.:
The comparison of two methods for measurement of immediate bennett
shift
J Prosthet Dent 51, 243, 1984
131. Lundeen H.C.; Wirth C.G.:
Condylar movement patterns engraved in plastic blocks
J Prosth Dent 30, 866-875, 1973
132. Lundeen H.C.; Shryock E.F.; Gibbs C.H.:
An evaluation of mandibular border movements: Their character und
significance
J Prosth Dent 40, 442-452, 1978
133. Männer E.:
Untersuchungen zur Reproduzierbarkeit von Registrierungen mit Hilfe
des Stringrecorders
Med Diss Erlangen, 1988
134. Marey M.:
Les muovements articulaires etudies par la photographie. Mouvements
du maxilaire inferieure
Compt Rend Acad Soc 118, 1019-1025, 1894
135. May H.C.; Rammelsberg P.; Böhm A.; Pho Duc J.M.; Pospiech P.;
Gernet W.:
Variabilität elektronischer Achsiographiebefunde im gesunden
Probandengut
Dtsch Zahnärztl Z 49, 538, 1994

136. McCollum B.B.:
The mandibular hinge axis and the method of locating it.
J Prosth Dent 10, 428, 1960
137. McMillen L.B.:
Border movements of the human mandible
J Prosth Dent 27, 524-532, 1967
138. Messermann T.:
A means for studying mandibular movements
J Prosth Dent 17, 36-41, 1967
139. Messerman T.; Reswick J.B.; Gibbs C.H.:
Investigation of functional mandibular movements
Dent Clin North Am 13, 3, 1969
140. Meyer G.; Dal Ri H.:
Offenlegungsschrift Deutsches Patentamt
3243954, 1982
141. Meyer G.:
Entwicklung und Anwendung eines elektronischen Verfahrens zur
dreidimensionalen scharnierachsenbezüglichen Registrierung von
Unterkieferbewegungen für die Funktionsdiagnostik des stomatognathen
Systems
Med Habil Schr Göttingen, 1986
142. Mongini F.:
Relationship between the temporomandibular joint and pantographic
tracings of mandibular movements
J Prosth Dent 44. 331, 1980

143. Mongini F.; Capurso U.:
Factors influencing the pantographic tracings of the mandibular border movements
J Prosth Dent 48, 585, 1982
144. Müller M.:
Grundlagen und Aufbau des Artikulationsproblems im natürlichen und künstlichen Gebiss
Klinkhardt Verlag, Bad Heilbrunn, 1925
145. Münzesheimer F.:
Über den Einfluss der Bisshöhe auf die Neigung der Kondylenbahn beim Seitwärtsbiss des Zahnlosen
Corr-Blatt Zahnärzte, 1922
146. Münzesheimer F.:
Photographische Registrierung der Kieferbewegungen und ihre Auswertung
Dtsch Monatl Z 31, 425-449, 1928
147. Nyffenegger J.W.; Schärer P.; Jahn E.:
Die Öffnungsbewegung des Unterkiefers
Schw. Monatsschr Zahnmed 81, 961, 1971
148. Ohlrogge H.H.:
Vorrichtung zur dreidimensionalen Erfassung und Aufzeichnung der Bewegungen des Unterkiefers, insbesondere der Kiefergelenke eines Patienten
Anmeldeschrift Deutsches Patentamt P 28252042-35, 1978

149. Ohlrogge H.H.:
Elektronische Registrierung der Kiefergelenksbewegung
Dtsch Zahnärztl Z 37, 263-264, 1982
150. Ohlrogge H.H.; Mack H.:
Verzeichnungen und Verzerrungen bei sagittalen Aufzeichnungen in der
instrumentellen Funktionsanalyse
Dtsch Zahnärztl Z 43, S39, 1988
151. Olavarria L.E.:
Untersuchungen über die Beeinflussung des Kondylenbahnwinkels in
Abhängigkeit variabler Achspunkte bei extraoraler Registrierung
Med Diss Erlangen, 1980
152. Ott K.H.R.:
Kiefergelenkfunktion. Geometrisch-klinische Analyse mit Hilfe der
Pantographie nach Steward
Hanser Verlag, München, 1982
153. Ott K.H.R.; Olavarria L.E.; Bose M.:
Untersuchungen über die Reproduzierbarkeit von Registrierungen mit
dem Condylcomp LR2
Dtsch Zahnärztl Z 46, 596, 1991
154. Paak S.; Hugger A.; Bollmann F.; Stütgen U.:
Die Abhängigkeit funktioneller Parameter von der Lage der
Scharnierachspunkte
Dtsch Zahnärztl Z 55, 570, 2000

155. Pameijer C.:
Method and apparatus for measuring and recording threedimensional condylar movements of the mandible
Anmeldeschrift 4014097. United States Patent Office, 1975
156. Parfitt J.B.:
A new anatomical articulator
Trans Odontol Soc Great Britain, 1903
157. Piehslinger E.; Celar A.; Futter K.; Ulm C.; Slavicek R.:
Die Quantifizierung und Analyse der Mediotrusionsbahn
Z Stomatol 92, 117, 1995
158. Piehslinger E.; Sengstbratl M.; Babka A.; Schmid-Schwap M.;
Fürhauser R.:
Horizontale Kondylenbahnneigung bei funktionellen Bewegungen und bei
Grenzbewegungen des Unterkiefers
Z Stomatol 92, 225, 1995
159. Pietro De A.J.:
Recording instrument
Anmeldeschrift 3256523. United states patent office
160. Posselt U.:
Studies on the mobility of the human mandible
Acta Odontol Scand 10, 19, 1952
161. Posselt U.:
Movement areas of the mandible
J Prosth Dent 7, 375-385, 1957a

162. Posselt U.:
Terminal hinge movement of the mandible
J Prosth Dent 7, 787, 797, 1957b
163. Pröschel P.:
Zur Problematik der Interpretation von funktionellen
Unterkieferbewegungen
Dtsch Zahnärztl Z 42, 696-700, 1987a
164. Pröschel P.:
An extensive classification of chewing patterns in the frontal plane
J Craniomand Pract 5, 55, 1987b
165. Pröschel P.; Feng H.; Ohkawa S.; Ott R.; Hofmann M.:
Untersuchung zur Interpretation des Bewegungsverhaltens kondylärer
Punkte
Dtsch Zahnärztl Z 48, 323, 1993
166. Puff A.; Krause G.:
Röntgenkinematographische Untersuchungen am Kiefergelenk unter
funktioneller Belastung
Dtsch Zahnärztl Z 20, 189-196, 1965
167. Roura N.; Clayton J.A.:
Pantographic records on TMJ dysfunction subjects treated with occlusal
splint. A progress report
J Prosth Dent 33, 442, 1975
168. Sachs L.:
Angewandte Statistik
Springer Verlag, Berlin - Heidelberg 1992

169. Salomon J.; Waysenson B.:
Computermonitored radionuclide tracking of three-dimensional
mandibular movements
J Prosth Dent 41, 340, 1979
170. Schilling H.T.:
Klinische Versuche zur Reproduzierbarkeit der
Scharnierachsenlokalisation
Dtsch Zahnärztl Z 38, 679-680, 1983
171. Schindler H.J.; Bläser W.; Schmidt M.:
Die funktionellen Unterkieferbewegungen im Vergleich zu den
zahngeführten Grenzbahnen
Dtsch Zahnärztl Z 40, 1020, 1985
172. Schmitthelm U.:
Röntgenkinematographische Studie über geführte
Unterkieferbewegungen zahnloser Patienten
Med Diss Berlin, 1966
173. Schweizer J.M.:
Masticatory function in man
J Prosth Dent 11, 625-647
174. Seiler F.; Hupfau L.:
Untersuchungen über die Reproduzierbarkeit der terminalen
Scharnierachse
Dtsch Zahnärztl. Z. 28, 775-780, 1973
175. Shanahan T.E.J.; Leff A.:
Mandibular and articulator movements
J Prosth Dent 9, 946-951, 1959

176. Sheppard I.M.:
The closing masticatory stroke
J Prosth Dent 9, 946-951, 1959
177. Sicher H.:
Zur Mechanik des Kiefergelenks
Z Stomatol 37, 27- 33, 1929
178. Simonet P.F.; Clayton J.A.:
Influence of TMJ dysfunction on Bennett movement as recorded by a
modified Pantograph. Part I
J Prosth Dent 46, 437, 1981a
179. Simonet P.F.; Clayton J.A.:
Influence of TMJ dysfunction on Bennett movement as recorded by a
modified Pantograph. Part II
J Prosth Dent 46, 6652, 1981b
180. Slavicek R.; Lugner P.:
Über die Möglichkeit der Bestimmung des Bennettwinkels bei sagittaler
Aufzeichnung
Öst Z Stomatol 78, 270-284, 1978
181. Slavicek R.; Mack H.:
Der Axiograph
Inf Orthod Kieferorthop 14, 53, 1982
182. Speidel T.D.; Maxon A.S.:
Reliability of method of orienting subjects for temporomandibular
roentgenograms
Am J Orthod 25, 250, 1939

183. Spranger H.:
Ergebnisse von Ultraschall-Echountersuchungen in der Zahn-, Mund-
und Kieferheilkunde
Dtsch Zahnärztl Z 32, 695, 1977
184. Stamm Th.; Wöstmann B.:
Zur Genauigkeit der computergestützten Scharnierachsenbestimmung
Dtsch Zahnärztl Z 51, 413, 1996
185. Stewart W.H.; Hoffman W.J.; Ghiselini F.H.:
Cinefluorography
Am J Roentgenology 38, 465-469, 1937
186. Stewart W.H.:
Cinefluorographic studies of lesions of the gastro-intestinal tract
Am J Digest Dis and Nutrition 4, 665, 1937
187. Stuart C.E.:
Use of the Stuart Artikulator in obtaining optimal occlusion
Dent Clin North Am 23,259, 1979
188. Theusner J.; Meyer G.:
Vergleich analoger und digitaler Auswertung bei elektronischen
Verfahren zur Registrierung der Unterkieferbewegung
Dtsch Zahnärztl Z 43, S63, 1988
189. Ulrich J.:
The human temporomandibular joint: Kinematics and actions of the
masticatory muscles.
Copenhagen 1896
Reprinted in: J Prosth dent 9, 399-406, 1959

190. Utz K.H.:
Paraokklusale Achsiographie: Zur Lage der individuellen Scharnierachse
Zahnärztl. Welt 96, 706, 1987
191. Utz K.H.:
Paraokklusale Achsiographie: Über den Bennettwinkel
Schweiz. Monatsschr. Zahnmed 98, 22, 1988
192. Utz K.H.; Duvenbeck H.:
Zur Problematik der Positionsdiagnostik mit Hilfe der Achsiographie
Dtsch Zahnärztl Z 44, S62, 1989
193. Utz K.H.; Lehner B.; Swoboda R.; Duvenbeck H.; Oettershagen K.:
Paraokklusale Axiographie über die Protrusionsbahn bei Vollbezahnten
Schweiz Monatszeitschrift Zahnmed 97, 438, 1987
194. Velfe H.D.; Burckhardt R.:
Bestimmung der Projektionsfehler und ihre Einflüsse auf die
Messgenauigkeit bei der Kondylenpositionsanalyse
Dtsch Zahnärztl Z 48, 319, 1993
195. Walker W.E.:
Prosthetic dentistry: The glenoid fossa, the movements of the mandible,
the cusps of the teeth
Dent Cosmos, 38, 34-43, 1896 a
196. Walker W.E.:
Movements of the mandibular condyles and dental articulation
Dent Cosmos 38, 573, 1896 b

197. Warnekros L.:
Die Fixierung der Bewegungen des Unterkiefers beim Kauakt
Med Diss Berlin, 1892
198. Waysenson B.; Salomon J.:
Three-dimensional recordings of envelopes of motion related to
mandibular movements
J Prosth Dent 38, 52, 1977
199. Weber R.; Stachniss V.:
Gebrauchsanweisung für den Masticator-Pantographen
Eigenverlag, Göttingen, 1982
200. Weber R.:
Dispositif comprenant un appareil de mesure par registrer les mouvements
de la mastication et un articulateur par aiguiser les surfaces
masticatoires de dents artificielles
Schweizer Patentamt 1447240, (PV 15718), 1965
201. Wellek S.:
Statistische Methoden zum Nachweis von Äquivalenz
G. Fischer Verlag, Stuttgart, 1994
202. Willingen Van J.:
The sagittal condylar movements of the clicking temporomandibular joint
J Oral Rehabil 6, 167, 1979
203. Wipf H.H.:
Pathway to occlusion: TMJ-Stereographic analog and mandibular
movement indicator
Dent Clin North Am 23, 271, 1979

204. Wöstmann B.; Wegener H.; Cousin J.; Belkenhol M.:
Zur Messgenauigkeit elektronischer Registriersysteme
Dtsch Zahnärztl Z 50, 544, 1995

Danksagung

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. med. dent. A. Renk für die freundliche Überlassung des Dissertationsthemas und seine jederzeit hilfsbereite und sehr schnelle Unterstützung bei der Durchführung dieser Arbeit.

Herrn Prof. Dr. med. Dr. med. dent. J. Reuther danke ich für die freundliche und unkomplizierte Übernahme des Korreferates.

Weiterer großer Dank gebührt meinen Probanden, die sich während ihrer Freizeit der nicht immer angenehmen Untersuchungsprozedur unterzogen haben.

Lebenslauf

Name: Bernhard Orth

Wohnort: Sanderring 20, 97070 Würzburg

Geboren: 1. Juni 1973 in Speyer

Familienstand: verheiratet mit Dr. Eva Orth, geb. Jung

Eltern: Roswitha Orth, Physiotherapeutin
Sanitätsrat Dr. Adalbert Orth, Facharzt für
Allgemeinmedizin

Geschwister: Annemarie Orth
Adelheid Orth
Adalbert Orth

Konfession: römisch-katholisch

Berufs- und
Schulbildung: 1980 – 1983 Grundschule Dudenhofen/Pfalz
1984 – 1993 Gymnasium am Kaiserdom Speyer
Abschluss: Allgemeine Hochschulreife

Zivildienst: 1993 – 1995 DRK Speyer, Abt. Rettungsdienst

Studium: Beginn des Studiums der Zahnmedizin im Mai
1995 an der Julius-Maximilians-Universität in
Würzburg bis zur Approbation als Zahnarzt 2000

Beruf: Von Dezember 2000 bis Oktober 2003 als
wissenschaftlicher Mitarbeiter der Poliklinik für
Zahnärztliche Prothetik an der Universität Würzburg
Seit Oktober 2003 Weiterbildungsassistent für
Kieferorthopädie in der Praxis Dres. Richter in
Würzburg

Würzburg, Januar 2004

Bernhard Orth