

6 Diskussion

6.1 Überprüfung der Reproduzierbarkeit der Systeme

Die Untersuchung hatte als Ziel, unter Konstantsetzung möglichst vieler Faktoren, die die Ergebnisse beeinflussen können, die gerätespezifische und systemabhängige Reproduktionsgenauigkeit in vivo herauszustellen, um gerätespezifische und systemabhängige Ungenauigkeiten bei den Untersuchungen der Hauptversuche auszuschließen.

Eine Methode, gerätespezifische und systemabhängige Ungenauigkeiten zu untersuchen, erschließt sich über Artikulatoren- bzw. Messtischversuche:

MIURA, LUCKENBACH und FREESMEYER stellten in einem Artikulatorversuch mit dem Compugnath max. Abweichungen dreier Messungen von 3,4 Grad bzw. 3,1 Grad (Mittelwert) für den Bennettwinkel bzw. für den sagittalen Kondylenbahnwinkel von den Sollwerten fest. [83] BAULIG und REIBER ermittelten am String®-Condylcomp LR3 aus 100 Messungen im Artikulatorversuch Mittelwerte für die Abweichung von max. 2,2 Grad bzw. 7,7 Grad für die SKN bzw. TKN. Im gleichen Versuch ergaben sich Werte von 0,8 Grad bzw. 0,4 Grad für die SKN bzw. TKN für den mechanisch-graphischen Axiographen® [4] HUGGER u.a. montierten den JMA auf einen Protar®7-Artikulator und gaben Sollwerte für den sagittalen Kondylenbahnwinkel, den Bennettwinkel und die Neigung des Frontzahntellers vor, den der JMA als Istwert messen sollte. Die Istwerte wichen für den sagittalen Kondylenbahnwinkel um $1,2 \pm 0,2$ Grad, für den Bennettwinkel $+ 0,6 \pm 0,5$ Grad und für den Neigungswinkel am Frontzahnteller um $-0,1 \pm 0,5$ Grad ab. [48] HUGGER u.a. maßen in einem Mikrometer-Meßtisch vorgegebene Strecken entlang der x-, y- und z-Achse mit dem JMA nach und erhielten 104 ± 14 Mikrometer, 129 ± 9 Mikrometer bzw. 166 ± 13 Mikrometer mittlere Längenmessabweichung. [49] Der Hersteller Zebris gibt für den JMA 0,1 mm mittleren lokalen Messfehler des Messensors und maximale Messauflösung von 0,01 mm an. [12] HUGGER u.a. erhielten in einem

Artikulatorversuch mit dem String-Conylocomp-LR3 Abweichungen von max 2 Grad bzw. 3 Grad für den sagittalen Kondylenbahnwinkel bzw. Bennettwinkel. [56] HUGGER stellte für die SKN $2,1 \pm 0,3$ Grad (re) und $1,9 \pm 0,3$ Grad (li) bzw. $2,0 \pm 0,6$ Grad (re) und $1,8 \pm 0,5$ Grad (li) für die TKN Abweichung von den Sollwerten im Artikulatorversuch . [47] PIEHSLINGER u.a. gaben für das Cadiax III-System im SAM®-Artikulatorversuch als Meßgenauigkeit die Mittelwerte der Abweichung mit 0,01mm(Standardabweichung 0,08mm) (li) und 0,02mm (Standardabweichung 0,08mm) (re) zur linken Seite hin bei der Transversalbewegung an.[97]

Vergleicht man diese in vitro – Angaben mit den in der vorliegenden Untersuchung gefundenen in – vivo – Angaben, so kann man die gefundenen Reliabilitäten als gut einstufen. Die Reliabilitätswerte für das Cadiax III-System und den JMA der vorliegenden Untersuchung erreichen jedoch nicht die sehr guten Werte der Artikulator- und Messtischversuche für das Cadiax III-System bzw. den JMA.

6.1.1 Methodenkritik und Fehlerursachen

Andere Untersucher haben die Reliabilität der Parameter SKN und Bennettwinkel durch Wiederholungsversuche an verschiedenen Tagen, mit verschiedenen Behandlern und z.T. nach Therapieverlauf für ein spezifisches System ermittelt:

ZIMMER u.a. führten mit dem **SAS-System** im Zeitabstand von mind. 2 Tagen und höchstens 4 Wochen 2 Achsiographien mit 3 Wiederholungsmessungen je Bewegung an Patienten durch. Dabei wurden die Länge einer Bewegung , das Krümmungsverhalten und die Neigung der Bahn beurteilt. Es ergaben sich Differenzen zwischen zwei Achsiographien von max. 6mm in den Längen, 14 Grad bzw. 10 Grad bei Neigungen in der Öffnungsbahn bzw. Protrusionsbahn und waren zu höchstens einem Drittel im Bahnverlauf nicht deckend. [136] UTZ und DUVENBECK gaben $2^\circ \pm 2^\circ$ Abweichung eines nach JÄHNIG modifizierten Axiographen, die sie aufgrund von max. 4 Messungen von

Protrusionsbahnen nach 5mm am gleichen Patienten ermittelten.[125] STAINER u.a. achsiographierten 48 Patienten dreimal im Zeitraum von durchschnittlich 3,3 Jahren mit dem Axiographen und stellten Kurvenabweichungsdifferenzen von durchschnittlich 7,5 % fest. [119] BERNARD u.a. ließen 42 Patienten von 2 Zahnärzten an zwei Terminen mit dem Axiographen achsiographieren. Sie stellten $1,6 \pm 1,5$ mm Abweichung für den zentrischen Scharnierachspunkt bzw. $3,4 \text{ Grad} \pm 3,0 \text{ Grad}$ für den sagittale Kondylenbahnwinkel nach 5mm Protrusion fest.[6] BERNARD u.a. maßen mit dem Axiographen an 40 Patienten eine mittelwertige Abweichung von 1,6 Grad (re) bzw. 1,4 Grad (li) für die sagittalen Kondylenbahnwinkel. [7] BÖHM gab Schwankungen von 0,02 mm bis 0,84 mm für die in 5 Messungen mit dem SAS-System ermittelten RKP-IKP-Differenzen bezogen auf die einzelnen Koordinaten der Messung an. [9] PIEHSLINGER u.a. untersuchten mit dem CADIAX-System Probanden vor und nach Therapie sowie eine unbehandelte Kontrollgruppe achsiographisch. Autorenangaben zufolge „zeigten die Patienten in der Kontrollgruppe keine nennenswerten Veränderungen der Bahnkurven“. [96] PFROMMER untersuchte mit dem SAS-System an drei Tagen jeweils dreimal Protrusions-, Laterotrusions- und Öffnungsbahnen; die mittlere maximale Streuung pro Tag lag bei $2,0^{\circ} \pm 1,3^{\circ}$, für alle drei Tage war sie signifikant höher.[98]

Vergleicht man diese in vivo – Angaben mit den in der vorliegenden Untersuchung gefundenen in – vivo – Angaben, so kann man die gefundenen Reliabilitäten als gut einstufen. Es zeigt sich, dass bei in – vivo –Versuchen der zitierten Untersucher z.T. deutlich höhere Streuungen der Werte gefunden wurden als in den vorliegenden gefundenen Werten dieser Untersuchung, was je nach Autor auf verschiedene Einflüsse zurückzuführen ist:

PFROMMER machte die unterschiedliche Montage des Registriersystems, die Festlegung der Bezugsebene und auch neuromuskuläre Konstitutionsunterschiede verantwortlich für die Streuungen der Messungen an drei Tagen.[98] BECK sah die Reproduzierbarkeit des Bennettwinkels als problematisch an, weil die Festlegung der Referenzebene, der Muskeltonus des Patienten sowie auch die manipulative Einflußnahme des Behandlers die

Werte der Messungen zu stark beeinflussen und tendierte zu einer Messung anstatt mehrerer. [5] ZIMMER u.a. zitierten OHLROGGE und MACK, die Justierungsfehler als Ursache schwacher Reliabilitäten angaben und versuchten diesem Problem beizukommen, indem sie durch Justierungshilfen den Einfluß der Justierung konstant hielten. Trotzdem stellten sie z.T. schlechte Reliabilitäten fest.[136] OTT u.a. stellten eine Reliabilität von $\pm 2^\circ$ fest, wenn die Montagevorschriften eingehalten wurden. [93] STAINER u.a. forderten eine Festlegung der Referenzpunkte und Übertragung der Referenzpunkte mit Referenzebenenlineal, um eine gute Reliabilität zu erzielen. BÖHM schätzte die Einflüsse des Behandlers (Handgriff, Kraftaufwand) und den Muskeltonus des Patienten als schwer standardisierbar ein. [119]

Die gefundenen Werte der vorliegenden Untersuchung zur Reproduzierbarkeit sind mit anderen Studien vergleichbar, oft besser. Das Durchführen der Versuche an nur einer Person und unter der Konstantsetzung von Apparaturmontage, Tagesschwankungen der Muskulatur, des Behandlers und der allgemeinen Verfassung des Patienten sowie der Referenzpunkte erlauben es, die gefundenen Abweichungen der Messungen dem jeweiligen System anzulasten.

6.2 Überprüfung der Korrelation der drei Systeme

6.2.1 Ergebnisse der Messungen der einzelnen Systeme an 32 Patienten

Im Rahmen der Hauptfragestellung dieser Arbeit wurden die Mittelwerte, Maxima und Minima für die SKN links und rechts sowie den Bennettwinkel links und rechts für die einzelnen Registriersysteme ermittelt. HUGGER trug Untersuchungsergebnisse verschiedener Behandler zusammen. Ausgehend

von der gleichen Bezugsebene (Scharnierachsen-Infraorbitalebene), einer Disklusion bei der Aufzeichnung und unmanipulierter Bewegung lagen die Mittelwerte für die sagittalen Kondylenbahnwinkel zwischen $26,1^\circ$ und $62,5^\circ$, gehäuft jedoch zwischen 40° und 60° . Die Standardabweichungen lagen zwischen $\pm 6^\circ$ und $\pm 14,9^\circ$. Die absoluten Werte lagen zwischen 10° und 80° . Bei den Aufzeichnungen zu den Bennettwinkeln lagen die Mittelwerte zwischen $2,5^\circ$ und $36,9^\circ$, die Standardabweichungen zwischen $\pm 3,4^\circ$ und $\pm 36,1^\circ$. Die absoluten Werte lagen zwischen 0° und 53° . Legt man die Ablesung nach 5mm Bahnlänge für die Parameter zugrunde, so fügen sich die gefundenen Werte der vorliegenden Untersuchungen gut in die Ergebnisse anderer Behandler ein. [47]

6.2.2 Ergebnisse der Messungen des Systemvergleichs

Da ein Goldener Standard oder eindeutige Referenzmessung der SKN und des Bennettwinkels am Patienten nicht erzeugt werden kann, bleibt eine Einschätzung der Messergebnisse der einzelnen Systeme nur über die Korrelation der Systeme möglich. Dazu wurde ein Intraklassenkorrelationskoeffizient gebildet, der das Verhältnis einer Regressionsgeraden durch die Messwertewolke zweier Systeme zu Winkelhalbierenden beschreibt. Idealerweise liegen alle Messwertpaare auf der Winkelhalbierenden, so dass von völliger Übereinstimmung ausgegangen werden könnte. In diesem Fall könnte man die gefundenen Werte mit den realen Messwerten im Kiefergelenk gleichsetzen, sofern nicht beide Systeme gleich falsch gemessen haben sollten. Aus der Korrelation kann man Rückschlüsse auf das Abweichungsverhalten zweier oder sogar dreier Meßsysteme ziehen, die die gefundenen Werte kritisch relativieren. Um diese kritische Einschätzung vornehmen zu können, ist auch der Mittelwert der Abweichungen der Messungen voneinander interessant.

Es liegen in der Literatur wenige vergleichende Untersuchungen vor, die sich des Intraklassenkorrelationskoeffizienten als Beurteilungskriterium bedienen.

TRUMP[123] fand bei dem Vergleich einer arbiträren intraoralen Registrierung mit dem String-Condylcomp LR3 und der SAM-Axiographie gute Korrelationen für die SKN und Bennettwinkel zwischen String-Condylcomp LR3 und der SAM-Axiographie, während beide schlechte Korrelationen zu der arbiträren intraoralen Registrierung zeigten. Die Werte für die SKN sind dabei in der Regel besser für alle Vergleiche in der Korrelation als die für den Bennettwinkel. Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung sind für alle drei Systemvergleiche für die SKN besser und für die Bennettwinkel z.T. schlechter, wenn man nur die Korrelation zwischen dem String-Condylcomp LR3 und der SAM-Axiographie heranzieht. Ein weiteres wichtiges Kriterium zur Beurteilung der Korrelation ist der Mittelwert der Abweichungen der Messungen voneinander, weil er eine Maßzahl angibt, die man in Relation zu den Auswirkungen von Gradabweichungen der SKN und des Bennettwinkels auf okklusale Interferenzen setzen kann.

Es liegen zum Mittelwert der Abweichungen der Messungen voneinander einige Artikulatorenversuche vor und nur wenige in-vivo-Versuche:

HUGGER, KORDASS u.a. verglichen den **String®-Condylcomp LR3** und das **MT 1602-System** an einem Meßartikulator mit vorgegebenen Sollwerten für den sagittalen Kondylenbahnwinkel, Bennettwinkel und für den Neigungswinkel am Frontzahnteller. Der **String-Condylcomp LR 3** wich um 0,9Grad , 0,8Grad bzw. 2,1Grad und der **MT 1602** um 0,9Grad , 1,0Grad bzw. 0,9Grad von den jeweiligen Sollwerten ab.[50] In einer weiteren Studie fanden HUGGER u.a .in einem simultanen Artikulatorversuch an Gipsmodellen maximale Abweichungen der Messwerte eines **String®-Condylcomp LR3** und eines **MT 1602-Systems** untereinander von max. 2 Grad , im Mittelwert von 1,1 Grad im Kondylarbereich, Frontstiftbereich und auf den Okklusalfächen von Molaren von den Sollwerten des Artikulators. [57] BAULIG und REIBER erhielten eine max. Abweichung von 1,9 Grad bei vergleichenden Messungen des **String®-Condylcomp LR3** und **Axiographen®** in einem Artikulatoremeßversuch. [4] WÖSTMANN u.a. verglichen das **Cadiax (Version 2)-System** mit dem **String-Condylcomp LR 3** in einer Messtischapparatur. Gemessen wurden Längen verschiedener Sollpunkte zum Ausgangspunkti.

Das Cadiax vergrößerte durchschnittlich um 4% die Strecken, während der Condylcomp fast keine Abweichung für die vertikalen Strecke und eine Rotationsstrecke zeigte, jedoch in der Sagittalen Verkleinerungen von 4 %. Der Condylcomp zeigte eine schlechtere Reproduzierbarkeit der Werte und wich mit zunehmender Messwertzahl zunehmend ab, weswegen eine Neueichung nach gewisser Meßanzahl empfohlen wird. [135] FREESMEYER u.a. verglichen das **ECR-System** mit einem simultan angebrachten **graphisch-mechanischem**. Die graphischen Bahnen waren im Durchschnitt 1,3 mm kürzer und die sagittalen Kondylenbahnwinkel um 4,5 Grad größer als die elektronisch ausgewerteten. [29] BERNARD u.a. kombinierten einen Stützstift intraoral und den **Axiographen®** extraoral in einer simultanen Messung der SKN. Die **intraorale Messung** erfolgte dabei mit einer Messung nach 5mm. Die Differenzen betragen rechts 4,8 Grad und links 4,4 Grad im Mittelwert. [7] Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung werden durch die Patientenversuche bestätigt, während die Artikulatorversuche deutlich bessere, also kleinere Abweichungen zeigen. Auffällig sind die Abweichungen des Cadiax III-Systems bzw. auch des Condylgraphen zum Jaw Motion Analysis-System für die linken Bennettwinkel, die deutlich größer sind als die des rechten Bennettwinkels. Da zwei Systeme sich deutlich vom Jaw Motion Analysis-System unterschieden, während die beiden ersteren zueinander mittel korrelierten, muß diskutiert werden, dass die Systemvergleichsabweichungen auf eine Meßungenauigkeit des Jaw Motion Analysis zurückgehen könnten.

6.2.3 Methodenkritik und Fehlerursachen

Die Werte für die SKN korrelieren zwischen allen drei Systemen gut, während die Werte für den Bennettwinkel schwach oder gar nicht korrelierten. Als mögliche Fehlerursachen kommen in Betracht:

1. Unterschiedliche Ausgangslagen bzw. Scharnierachslokalisierung

Die vorliegende Untersuchung versuchte, von gleichen Ausgangsstartpunkten und somit Referenzpunkten auszugehen. Dazu wurde der vom Cadiax III-System ermittelte Referenzpunkt für das Condylographsystem (Tausch der Aufzeichnungsflaggen, Apparatur blieb ansonsten unverändert) und den JMA (Übertragung der Referenzpunkte auf die Haut) übernommen. Aufgrund von Projektionsverzerrungen war eine Nachkorrektur der Scharnierachslokalisierung vonnöten. Diese war nur dann nicht erforderlich, wenn die wirkliche Scharnierachse genau senkrecht auf die Flaggen des Cadiax III-Systems traf. In allen anderen Fällen, in denen die Übertragung nicht entlang der Scharnierachse geschieht, kommt es automatisch zur Abweichung der Übertragung durch den unterschiedlichen Flaggen- bzw. Hautpunkt Abstand.[126]

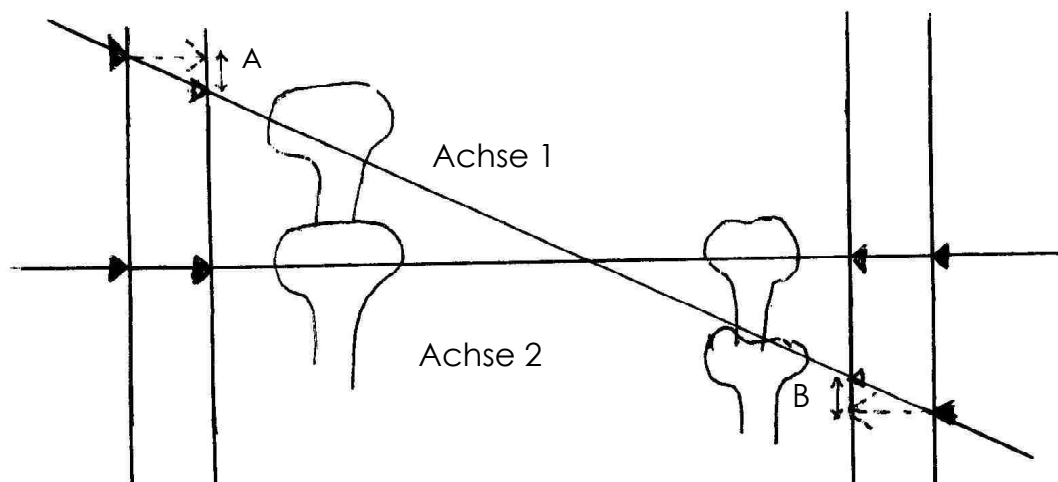


Abbildung 15:

Auswirkungen unterschiedlicher Meßapparaturenausrichtungen zu der Scharnierachse: Nur bei Verschiebungen des Scharnierachszenzeigers entlang der Scharnierachse (Achse 1) kommt es zu keiner Verlagerung des Scharnierachspunktes auf einer gelenknäheren Messebene; im Falle einer Verschiebung des Scharnierachszenzeigers nicht entlang der Scharnierachse (Achse 2) aufgrund nicht rechtwinklig zur Achse ausgerichteter Flaggen kommt es zu einer Verlagerung des Scharnierachspunktes auf einer gelenknäheren Messebene (Distanz A bzw. B).

Insofern ist eine unterschiedliche Ausgangslage zwischen den Apparaturen zu diskutieren, besonders bei der unsichereren Übertragung auf die Haut. Während die Schreibflaggen des Condylographen eine sehr feine und fixierte Lokalisation des Referenzpunktes erlauben, ist der Hautpunkt im Durchmesser (schwarzer, wasserfester Schreibstift) größer und beweglich durch die Hautverschiebbarkeit. Die Fehlermöglichkeit wurde bei dem JMA-System noch erweitert durch die Notwendigkeit einer erneuten Bissnahme über die Stentsimpressionen des speziellen JMA-Löffels, weil das JMA-System nicht an den Reference –Löffel des Cadiax III- bzw. Condylograph-Systems montierbar war. Es war nicht zu klären, ob die übertragenen Hautscharnierachspunkte mit der wahren Scharnierachse nach der erneuten Bissnahme übereinstimmten. Die Lokalisierbarkeit verschiedener Achspositionen werden in der Literatur unterschiedlich, jedoch eindeutig in Hinblick auf ihre Auswirkungen diskutiert:

Die **Lokalisierbarkeit der zentrischen Scharnierachse** wird von verschiedenen Untersuchern unterschiedlich beurteilt. Einen Goldenen Standard für die Auffindung der Scharnierachse gibt es nicht, wenngleich KORDASS und HUGGER versuchten, die zentrische Kondylenposition mit der Kernspintomographie per bildgebendes Verfahren zu verifizieren. [60] Unstrittig ist die Aussage, dass unterschiedliche Achslokalisationen durch unterschiedliche Grifftechniken verursacht werden können und es zu Abweichungen in der Achsiographie zwischen unterschiedlichen Scharnierachspunkten kommt:

UTZ u.a. stellten Mittelwerte von 0,22 bis 0,42mm +/- 0,22 mm – 0,28 mm fest je nach Registriertechnik [124] HOLTKAMP und HUGGER stellten bei der Ermittlung der Reproduzierbarkeit von Scharnierachsen in Abhängigkeit verschiedener Registrierverfahren Abweichungen von 3 – 10 mm in x-Richtung und 3 – 7 mm in y-Richtung fest. [45] AHLERS wies mittels dem USR-System von Edinger die unterschiedliche Scharnierachsenposition von Zentrikbißnahmen in Abhängigkeit vom Bißnahmeverfahren nach. [2] UTZ und DUVENBECK kamen in einer weiteren Untersuchung der Reproduzierbarkeit der terminalen Scharnierachsenposition zu geringeren

Abweichungen je nach Registriergriff von 0,2 mm +/- 0,14 mm. [127] BERNARD, UTZ u.a. stellten mit nur einem Registriersystem in Abhängigkeit der Zeit Abweichungen der Scharnierachse von ca. 1,6mm +/- 1,5 mm fest.[6] Paak ermittelt die Auswirkungen auf die SKN und den Bennettwinkel in Abhängigkeit von den posterioren Bezugspunkten: die SKN war resistenter gegen Verlagerungen der posterioren Bezugspunkte (im Mittel - 2,0° -bis +2,8°) als die Bennettwinkel (im Mittel -8,9° bis +5,5°). LOTZMANN zeigte, dass rein translatorische Protrusionsbahnen unempfindlicher gegen Fehllokalisationen der Scharnierachse sind als rotatorisch-translatorische Bewegungen, die zu deutlichen Fehlschreibungen führen. [76] Utz u.a. gaben als Auswirkung unterschiedlicher Achslokalisationen okklusale Fehler von 70 µm bis 350 µm an. [126] MÜLLER gab Differenzen von 83 µm bis 1237 µm für die okklusale Abweichung der Molarenhöckerpositionen in der Horizontalebene bei superior-inferiorer Verlagerungen der Scharnierachse und in Abhängigkeit verschiedener Bißregistrathöhen an sowie 1 µm bis 70 µm für anteriore-posteriore Verlagerungen. Anterior-posteriore Verlagerungen hatten weniger okklusale Auswirkungen als kranial-kaudale. [86] KÖRBER berechnete für eine Achsabweichung von 1,5 cm okklusale Auswirkungen von 120 µm. [58] ZWIJNENBURG u.a. stellten signifikante Abweichungen für den Bennettwinkel fest in Abhängigkeit des Referenzgangpunktes und unterstreichen die Bedeutung eines gleichen Referenzpunktes für eine Vergleichbarkeit von Messungen. [137] MORNEBURG und PRÖSCHEL fanden heraus, dass protrusive Bahnen unempfindlicher gegen unterschiedliche Achslokalisationen sind als der Bennettwinkel, der bei 1mm Abweichung des Referenzpunktes Abweichungen von 0,8° zeigte. [84] BUMANN schilderte Verzerrungen der Öffnungsspuren und Abweichungen des Bennettwinkels je nach Fehlverschiebung der Scharnierachslokalisation. [13] Ein falsch bestimmter Bennettwinkel wirkt sich auf die Artikulationsbahnen im Okklusalfeld aus. REUSCH zeichnete deutlich unterschiedliche Ausflughbahnen der Oberkieferhöckerspitzen im Okklusalfeld von Unterkiefermolaren in Abhängigkeit des Bennettwinkels und der Krümmung der Mediotrusionsbahn, die zu starken Interferenzen führen müssen. [104]

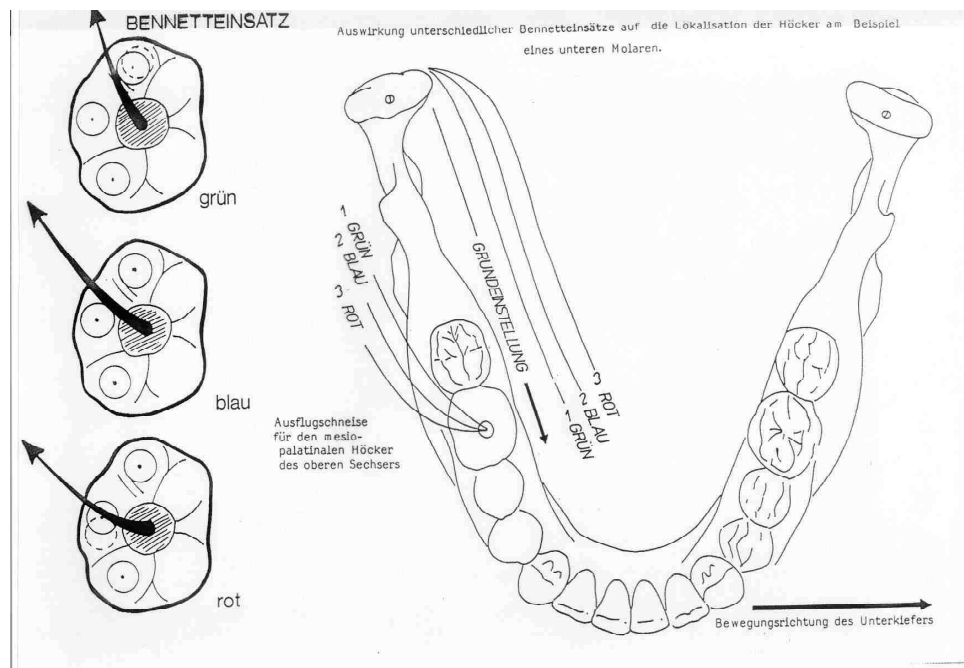


Abbildung 16 Auswirkungen unterschiedlicher Bennetteinsätze im Artikulator nach REUSCH [104]

SLAVICEK und LUGNER zeigten, dass fehlerhaft bestimmte Bennettwinkel zu Abweichungen von 1 mm für antagonistische Stops zwischen Artikulator- und Mundsituation führen können. [113] HUGGER u.a. untersuchten Auswirkungen unterschiedlicher Bennett- und Protrusionseinsätze auf bestimmte Molaren- und Incisivipunkte bei 4mm Vorschub in einem virtuellen Artikulator. Ausgehend von einem 30° Protrusionseinsatz und 0° Bennetteinsatz sowie Fronttellerneigung von 0°, stellten sie Abweichungen von -413 µm bis +733 µm in der x-, y- und z- Ebene für 15°, 45° und 60° -Protrusionseinsätze und -268 µm bis +292 µm für 0° und 30° Bennetteinsätze fest. UTZ u.a. stellten bei einer Abweichung von 10° des Bennettwinkels okklusale Interferenzen von etwa 60 µm fest und bei 10° der SKN eine Interferenz bis zu 280 µm . [129] [130] Die vorliegende Untersuchung bestätigt, dass die SKN sich unempfindlicher gegen mögliche Fehler darstellte (bessere Übereinstimmung zwischen den Systemen), während die Bennettwinkel eine deutlich geringere

Übereinstimmung zeigten, was auf den Einfluß diverser möglicher Fehlerquellen zurückzuführen ist.

2. Unterschiedliche Bezugsebenen

Die **Bezugsebene** beeinflusst die Winkelablesung erheblich. Der sagittale Kondylenbahnwinkel weicht bei Zugrundelegung der *Camperschen Ebene* von einem Winkel, dem die *Frankfurter Horizontale* zugrunde gelegt ist, ab. [72] Die Achsorbitalebene ist abhängig von der genauen Bestimmung der zentralen Scharnierachse und dem Infraorbitalpunkt. Der Infraorbitalpunkt wird durch Ertasten bestimmt. Eine Abweichung in der Vertikalen hat Auswirkungen auf die Scharnierachsorbitalebene und somit auf die SKN und den Bennettwinkel. In der vorliegenden Untersuchung wurde die Scharnierachsorbitalebene zur Bezugsebene gewählt; die weiter oben genannten Übertragungsproblematiken und -ungenauigkeiten können auch zu unterschiedlichen Bezugsebenen und damit zu unterschiedlichen Messwerten geführt haben.

3. Unterschiedlicher Bahnvorschub, der der Ablesung der Winkelwerte als Basis dient

Die ersten 5 mm der Kondylenbahn sind für funktionsrelevante Latero- und Protrusionsbewegungen als relevant zu betrachten. [30,102]. Die Werte für 1mm Bahnvorschub differieren stark von denen bei 5mm oder 10mm. Angaben in der Literatur sind daher immer kritisch auf diese Angaben zu betrachten. In der vorliegenden Untersuchung wurden die Ablesungswerte bei 5 mm Bahnvorschub vorgenommen. Allerdings wurde dazu eine graphische Erweiterung der Meßskala der Analyselupe des Condyllographen

nötig und das Ablesen der Werte für den JMA über die Artikulatorprogrammierungsoftware des WinJaw – Programms (KaVo-Protar). Inwieweit diese Maßnahmen Einfluß auf die Berechnung und Ermittlung der Werte hatte, konnte mit dieser Studie nicht geklärt werden.

Die Ablesung punktgenau nach 5mm sowohl für die SKN als auch für den Bennett gibt lediglich einen Winkelwert für die gesamte Bewegung wieder. Die Exkursionsbahnen jeder Bewegung differieren intraindividuell, so dass auch zwangsläufig die Winkelwerte differieren müssen. Um diesen Fehler auszuschließen, wäre eine Einbeziehung des gesamten Kurvenverlaufs für die Beurteilung der Korrelation der Systemmessungen sinnvoll und nötig.

4. Unterschiedliche Sperrung der Zahnreihen während der Aufzeichnung

Zwischen dem Cadiax III-System und dem Condylographen gab es keine Sperrungsunterschiede, weil der gleiche okklusale Löffel verwandt wurde. Der okklusale Löffel des JMA (vom Autor individualisiert) war von der Materialstärke und Form identisch mit dem Referencesystem – Löffel. Bei der Befestigung im Mund wurde auf ein enges Anliegen an den Kauflächen des Unterkiefers bei beiden Löffeln geachtet. Auf beiden Löffeln war thermoplastische Stentsmasse aufgebracht zur Ermittlung der Referenzposition. Dabei wurde auf gleiche Bisshöhe geachtet. In der Literatur werden minimale Sperrungsunterschiede als nicht relevant angesehen, ALSAWAF und GARLAPO sahen keinen Unterschied zwischen paraokklusaler und okklusaler Aufzeichnung [3] und UTZ u.a. stellte bis 10 mm Bissperrung nur geringe Beeinflussung der SKN durch unterschiedliche Vertikaldimensionen fest. [130] Auswirkungen auf die korrekte Achslokalisierung hat jedoch der Anteil der Translation bei der Ermittlungsbewegung. Die klassische Auffassung geht von einer reinen rotatorischen Öffnungsbewegung zwischen 20° und 25° aus [46, 128], neuere Studien gehen von einer Kombination von Rotation und Translation schon bei minimalen Öffnungen aus. [100, 118] Beide Feststellungen stellen ein Fehlerreservoir für die vorliegende Untersuchung dar. Zum einen war nicht auszuschließen, dass der vermeintlich rein rotatorische

Öffnungsteil nicht bereits individuell überschritten wurde, allein durch die Löffelspernung, die bei Patienten mit tiefer Bisslage eine weit größerer Sperrung ergab als bei eugnather Bisslage. Zum anderen ist es in der Praxis nicht festzustellen, ob nicht auch bei kleinen Öffnungsbewegungen translatorische Komponenten vorliegen. STAMM und WÖSTMANN [118] konnten in einem Artikulatorversuch zeigen, dass sowohl das Cadiax III-System wie auch der String-Condylcomp LR3 nur bei rein rotatorischen Öffnungsbewegungen des Artikulators eine sehr hohe Lokalisierungsgenauigkeit aufwiesen. Tritt jedoch eine translatorische Komponente hinzu, so rutschten die Achspunkte nach dorsokranial ab, was weitreichende Folgen für die okklusalen Interferenzen hat. In der vorliegenden Untersuchung könnte eine auf diese Art fehllokalisierte Achse zusätzliche Fehler verursacht haben, weil die Auswirkungen einer für alle Systeme gleichermaßen fehllokalisierten Achse für die einzelnen Systeme unterschiedliche Auswirkungen haben könnte.

5. Projektionsfehler und Montagefehler

In der vorliegenden Untersuchung wurde die am Kopf befestigte Messapparatur nur einmal gewechselt; dadurch wurden Übertragungsfehler minimiert. Nicht auszuschließen ist jedoch die falsche Montierung der Apparaturen. Obwohl die Apparatur für das Cadiax III-System und den Condylgraphen gleich waren, sind die Auswirkungen für die einzelnen Systeme in dieser Studie nicht zu ermitteln gewesen. Das JMA-System brachte seine eigenen Fehlerquellen hinsichtlich der Apparaturfixierung ein, die jedoch nicht zu ermitteln waren. Der Hersteller schließt Montageprojektionsfehler weitgehend aus, lediglich ein gewisser Abstand zwischen den Sensoren ist einzuhalten. Es bleibt jedoch zu diskutieren, inwieweit die sich bei jeder Apparaturmontage individuell langen Messstrecken des JMA sich auf die Berechnung von Bewegungen auswirken bzw. ob die Software wirklich in der Lage ist, von jeder beliebigen Apparaturfixierung am Kopf reproduzierbare Werte zu berechnen. Das JMA ist

zudem ein gelenkfern aufzeichnendes System und ist angewiesen auf die Umrechnung der gelenkfern gewonnenen Werte auf die Bewegung der Kondylen. Im Artikulatorversuch wurden gute Ergebnisse für die Umrechnung erzielt, inwieweit jedoch die Software in der Lage ist, kompliziertere und zusammengesetzte Bewegungen der Kondylen korrekt zu berechnen, bleibt zu diskutieren. Auffällig war die beobachtete Streuung der Angaben bei der Achslokalisierung durch das JMA-System, das z.T. Scharnierachsen weit dorsal des Ohre lokalisierte und Hinweis für Berechnungsprobleme eines gelenkfern aufzeichnenden Systems sein könnten. Der Condylograph zeichnet die Mediotrusion auf horizontalen Schreibflaggen; durch Einschwenken dieser Flaggen auf die Protrusionsbahnzeichnung der Sagittalflaggen sollen Projektionsfehler in der Horizontalen minimiert werden. Eine gut beschriebene Projektionsabweichung ist der Fischerwinkel, den UTZ u.a. als Projektionsphänomen erklärten: der Unterschied zwischen sagittal geschriebener Protrusions- und sagittal geschriebener Mediotrusionsbahn ist auf den größer werdenden Abstand zwischen Aufzeichnungsflagge und Bewegungszentrum zurückzuführen. [130] Inwieweit die horizontal auf die Gelenkbahn eingeschwenkte Flaggenfixierung eine Distanzveränderung des Aufzeichnungsortes zum Bewegungszentrum exakt ausgleichen kann, bleibt offen. Anatomische Gegebenheiten können auch bei korrekt ausgerichteter Apparatur zu Projektionsfehlern führen. Anatomische Gegebenheiten sind asymmetrische Austrittspunkte der Scharnierachse und unterschiedliche Kondylenbahnen zwischen den Aufzeichnungen. BUMANN [13] zeigte Projektionsphänomene, die durch unterschiedliche anatomische Gegebenheiten wie eine unterschiedlich steile Gelenkbahn und der Distanz des Aufzeichnungsortes vom Bewegungsort sich ergaben. Diese geschilderten Projektionsphänomene durch anatomische Gegebenheiten können gerade bei dem JMA-System zu anderen Werten führen als bei dem Cadiax III-System und dem Condylographen. Letztere haben eine kleine Differenz des Abstandes der Flaggen zu den Kondylen, beide zeichnen also ähnlich entfernt auf und unterliegen einem ähnlichen Projektionsfehler; das JMA hingegen liegt deutlich näher an den Kondylen, es misst auf der Haut und

somit gelenknäher und erfährt einen anderen Projektionsfehler. Je weiter die Aufzeichnungsebene von dem Ort der Bewegung entfernt ist, desto größer sind die Projektionsfehler. [130] Das Cadiax III-System hat eine Projektionsfehlerkorrektur, während der Condylograph ungefiltert Projektionsphänomene aufzeichnet. In der Literatur finden sich weitreichende Belege für Projektionsfehlereinflüsse:

UTZ u.a. [129] und OHLROGGE u.a. [89] machten die falsche **Ausrichtung der Messapparatur** für deutliche Aufzeichnungsfehler des Bennettwinkels durch Fehlprojektion verantwortlich. Nur eine exakte Parallelität der Flaggen zur Medianebene und ein senkrechter Winkel zur Scharnierachse gewährleistete eine verzerrungsfreie Aufzeichnung. LOTZMANN gab für falsch montierte Flaggen Fehler bis zu 8° für den Bennettwinkel an. [75] VELFE und BURCKHARDT ermittelten einen deutlichen **Projektionsfehler** bei **asymmetrischen anatomischen Protrusionsbahnen** und fehlender Sideshift für den Bennettwinkel. In Extremfällen kippte die Scharnierachse bei geringer Auslenkung des Arbeitskondylus stark kaudal und erzeugte einen Bennettwinkel von 60° , obwohl der wahre Bennettwinkel nur 4° betrug. Sie entwickelten ein Projektionsfehlerkorrektur-Verfahren, mit dem Projektionsfehler auf unter 0,04 mm minimiert wurden. [131] Alle drei vorliegenden Systeme arbeiten mit Projektionsfehlerkorrekturen; inwieweit diese tatsächlich Projektionsfehler auszuschließen vermögen, war mit dieser Untersuchung nicht zu bestimmen und bleibt als mögliche Fehlerursache zur Diskussion. BUMANN [13] machte **anatomische Abweichungen** für Schreibfehler projektionsbedingt verantwortlich. OHLROGGE [89] beschrieb einen Schräglaufwinkel als Folge anatomisch nicht symmetrisch austretender Scharnierachspunkte im starr ausgerichteten Messapparaturbogensystem auf 10mm mit ca. 5° , der den Bennettwinkel verfälscht. Grundsätzlich werden die Fehler ohne Fehlerkorrektur einer Software umso größer, je weiter entfernt die Flaggen von den Kondylen sind und umso kleiner der Interkondylarabstand. [131,56] Alle Systeme der vorliegenden Untersuchung rechnen auf einen **Interkondylarabstand** von 110 mm um; nur dadurch sind die Werte untereinander vergleichbar und in den Artikulator übertragbar. Allerdings muß

dazu der Flaggenabstand abgelesen werden und vom System auf 110 mm umgerechnet werden. Die tatsächliche Distanz zwischen den Kondylen ist nicht die Referenz für die Bewegungen der Kondylen bei der Achsiographie, und wird von den drei Systemen nicht erfasst. KORDASS gab eine Umrechnung für die Berechnung der tatsächlichen Distanz der Kondylen ausgehend von Hautpunkten an, um sie für die Interpretation von Achsiographien zu nutzen. [61]

6. Systembedingte Aufzeichnungsfehlerquellen

Cadiax III-System: Das Cadiax III-System ist ein mechanisch-elektrisches System. Die induktiven Schreibspitzen sitzen mit einer Federmechanik in den Styli und stellen eine prinzipielle Fehlerquelle dar, wenn Reibungen auftreten. Es ist kein berührungsloses System, sondern berührungshaftes mit gewissen mechanischen Widerständen, die bei unterschiedlicher Apparaturausrichtung unterschiedliche Widerstände produzieren kann. Aus den Überlegungen zu den Projektionsfehlern geht hervor, dass nur eine korrekte Ausrichtung, also die möglichst senkrechte Ausrichtung der Styli auf die Medianebene, genaue Wiedergabe der Kondylenbewegungen ermöglicht. Die Widerstandsfolien mussten während der vorliegenden Untersuchung mehrmals minimal gewartet werden durch Säuberung und dünnes Auftragen von Vaseline. Auch hier liegt eine Fehlerquelle. Das System hat ein weit höheres Eigengewicht als das JMA-System; LOTZMANN zeigte für mehr als 100 Gramm schwere Unterkieferbögen deutliche Auswirkungen auf die Bahnschreibungen, weil zum einen der Kondylus mehr nach kranioventral angedrückt wird, zum anderen die Kaumuskulatur belastet wird. [77]

Condylograph: FREESMEYER machte für die mechanische Aufzeichnung als Fehlerquellen unterschiedlichen Anpressdruck der Schreibspitzen und unterschiedliche Strichschreibstärken verantwortlich [28]. Sämtliche mechanischen Teile des Systems sind potentielle Fehlerquellen. Auffällig sind die kleinen Werte für den Bennettwinkel gewesen, die auf einen

mechanischen Widerstand folgern lassen und eine mechanisch verzögerte Aufzeichnungssensibilität. Das System zeichnet eher gradlinige Bahnen und reagiert auf Bahnausschläge träge. Der Condylograph hat keine sechs Freiheitsgrade wie die anderen Systeme. Ein gleichzeitiges dreidimensionales Aufzeichnen der Bewegungen beider Scharnierachspunkte ist sowohl bei der Protrusion wie der Mediotrusion nicht möglich, weil entweder nur eine sagittale Erfassung (4 Freiheitsgrade) oder einseitige Erfassung des Bennettwinkels möglich ist (3 Freiheitsgrade). Projektionsfehler oder kontralaterale Konsequenzen eines ipsilateralen Aufzeichnungsfehlers sind daher nicht zeitgleich erfassbar. Zudem zeichnet der Condylograph den Bennettwinkel in einem noch größeren Abstand zu den Kondylen auf als die Schreibung der Protrusion auf den sagittalen Flaggen erfolgt, was weitere Projektionsfehler bedingen kann.

JMA: Das JMA-System ist ein berührungsloses System und ein sehr leichtes System. Beide Punkte könnten zu anderen Aufzeichnungswerten geführt haben als die berührungshaften beiden anderen Systeme. Die Referenzpunkte werden mit einem Tastzeiger eingegeben: auf der weichen Haut ist diese Tastspitze nicht so exakt zu positionieren wie etwa eine Schreibspitze auf einer metallischen Flagge. Eine exakte Übertragung ist schwierig. Die Schädelapparatur ist zwar leicht, aber auch nicht lagestabil, es können sich Lageänderungen während der Aufzeichnung ergeben, die Meßabweichungen zur Folge haben. Es bleibt zu diskutieren, inwieweit die Ultraschallstrahlen immun gegen Umweltstrahlungen sind.

7. Patientenbezogene Abweichungen

Das Patientengut wurde einem Screeningtest unterzogen, der zum Ziel hatte symptombehafte Patienten herauszufiltern. Kiefergelenkssymptome wie Gelenkknacken können Aufzeichnungen stark verfälschen [57], alleine dadurch dass das Symptom nicht immer auftritt. Der Screeningtest erfüllte nicht die Kriterien einer kompletten klinischen Funktionsanalyse, so dass versteckte oder milde Symptome übersehen worden sein könnten und zu

Abweichungen zwischen den einzelnen Aufzeichnungen geführt haben könnten. Die Bewegungen wurden mit den Patienten ebenso wie die Bissnahme bei abgelegten Apparaturen geübt; bei angelegter Apparatur zeigten einige Patienten Koordinationsschwierigkeiten. Ein zu protrusiv genommene Kieferrelationsbestimmung wirkt sich deutlich auf die SKN und den Bennett aus, ebenso eine Kieferrelationsbestimmung bei asymmetrisch protrudierten, also lateral ausgelenkten Kondylen. Die Belastung der Muskulatur und die Kopfdruckbelastung nahmen während der Versuchszeit zu, so dass ein Einfluß auf die Bewegungen nicht auszuschließen ist. Ein simultaner Versuchsaufbau, wie ihn einige Untersucher [29,62] durchführten, umgeht das Problem der Ermüdung, weil beide Systeme gleichzeitig messen. Zu diskutieren bleibt bei einer simultanen Anordnung jedoch die exakte Anlegung der Apparaturen und präzise Durchführbarkeit beider Aufzeichnungen. [62]

6.3 Statistische Überlegungen

Der Mittelwert der Abweichungen der Messungen voneinander ist ein brauchbares Maß zur Einschätzung, ob die Messabweichungen Einfluß auf die Einstellung von Artikulatoren haben könnten. Jedoch ist die isolierte Betrachtung verfälschend, da sogenannte „Ausreißer“ in den Messwerten den Mittelwert bei kleiner Versuchsanzahl stark beeinflussen können. Eine unempfindlichere Betrachtung bietet die Betrachtung der Percentile – Verteilung: Ausreißer, die unterhalb des Percentile 25 – Wertes liegen und Ausreißer, die über dem Percentile 75 – Wert liegen, fließen nicht in den Wert ein. Der Meridianwert gibt den Wert, ober- und unterhalb dessen 50% aller Werte liegen. Legt man diese Percentile einem Vergleich mit anderen Untersuchungen zugrunde, etwa den Artikulatorversuchen in 6.2.2., so nähern sich die Werte der vorliegenden Untersuchung den sehr genauen Werten dieser Artikulatorversuche an und verändern auch die Relevanz der

Abweichungen für die Praxis zum Positiveren: Kleinere Abweichungen lassen den Kliniker mehr Vertrauen in die Messwerte der Systeme entwickeln.

Die Werte für die Reliabilität sind gut für alle Systeme. Daher ist ein systematischer Fehler für die Abweichungen der Korrelation auszuschließen, zumal ein solcher Fehler lediglich Auswirkungen auf die Steigung der Regressionsgeraden, nicht aber auf die Stärke der Korrelation hätte.

Der Intraklassenkorrelationskoeffizient ist als Maßzahl zwar aussagekräftig, sollte aber bei praxisrelevanten Aussagen der Abweichungen mit den Percentilewerten der mittelwertigen Gradabweichungen kombiniert werden, um die Auswirkungen auch quantitativ erfassen zu können.

Kritisch ist die Versuchszahl von 32 Patienten zu sehen; Extremwerte beeinflussen jede Statistik stärker, je kleiner die Probe ist.

6.4 Klinische Hinweise

Die SKN und der Bennettwinkel werden als wichtiges Kriterium für die Programmierung von Artikulatoren benutzt. Andererseits ist eine möglichst gleiche räumliche Zuordnung der Gipsmodelle im Artikulator zu der Artikulatorachse wie der Oberkiefer am Patienten zur Scharnierachse notwendig, um scharnierachsbezügliche Aufzeichnungen projektionsfehlerfrei übertragen zu können. Wird auf eine scharnierachsenbezügliche Übertragung der Modelle in den Artikulator verzichtet, so sind scharnierachsenbezogene SKN- und Bennettwerte unbrauchbar, da eine zu große Verzerrung stattfindet. Andererseits darf man schlussfolgern, dass Projektionsfehler, die die Aufzeichnungen beeinflussen, sich auf die Herstellung und das orale antagonistische Interferenzverhalten von Zahnersatz weit weniger auswirken, solange es gelingt, die mit dem Aufzeichnungsgerät gewonnenen Projektionen räumlich exakt in den Artikulator zu übertragen, sprich von den gleichen Referenzen aus zu arbeiten. Kritisch wird es erst dann, wenn Vertikaländerungen im Artikulator vorgenommen werden. Deutlichere Auswirkungen haben Projektionsfehler, Montagefehler und

Achsfehllokalisationen für die instrumentelle Funktionsdiagnostik; verzerrte Bahnen lassen eine Kondylenpositionsanalyse oder andere funktionsanalytische Bewertungen ungenau und unbrauchbar werden. Zwei der drei Systeme (Cadiax III-System und Condylgraph) erlauben das Auffinden der Scharnierachse und auch die scharnierachsengerechte Montage der Modelle im Artikulator. Das JMA-System hat keine reliable Scharnierachslokalisierung gezeigt, zudem können Modelle mit diesem System nicht scharnierachsengerecht übertragen werden, sondern lediglich arbiträr. Cadiax III-System und Condylgraph erlauben eine Reproduktion der Scharnierachslokalisierung vom Prinzip her, während das JMA-System ohne die Nutzung der wenig reliablen Scharnierachslokalisationsfunktion auf manuell gesetzte arbiträre Scharnierachspunkte zurückgreift, die nicht exakt in einen Artikulator übertragen werden können. Insofern bleibt für die Bewertung der Auswirkungen der festgestellten Messabweichungen eigentlich nur das Cadiax III-System und der Condylgraph von Interesse, wenn es um die Artikulatorprogrammierung geht. Diese beiden Systeme lieferten für die SKN gut korrelierende Werte und auch die Mittelwerte der Abweichungen der Messungen voneinander lassen nur geringe, klinisch akzeptable Interferenzen im Okklusalbereich erwarten. Hingegen sind von den schwächeren Korrelationen und höheren Mittelwerten der Abweichungen der Messungen voneinander für die Bennettwinkel klinisch relevante Interferenzen zu erwarten. Aufgrund der eingeschränkten und mit mehr Fehlerquellen behafteten graphisch-mechanischen Aufzeichnung des Bennettwinkels durch den Condylgraphen, ist eine Aufzeichnung mit dem Cadiax III-System tauglicher, wenn auch diese mit Fehlerquellen behaftet sein kann. Eine kritische Beurteilung während der Aufzeichnungsphase und die Minimierung der Fehlerquellen sowie okklusale Hinweise (Eckzahnführungsspuren am Antagonisten, Schliffacetten, Krümmungsverhalten der Bewegungskurven) können helfen, die Aufzeichnungen einzuschätzen und zur Not zu wiederholen. Das JMA-System überzeugt durch seine einfache Montage und sein Gewicht; wenn es gelingt, die Scharnierachse reliabel zu lokalisieren und wenn eine scharnierachsenbezügliche Übertragung gewährleistet ist, sind die

Fehlerquellen der Hautübertragungsungenauigkeiten dieser vorliegenden Untersuchung auszuschließen und die guten Korrelationen in der SKN zum Cadiax III-System eventuell auch auf die Korrelationen der Bennettwinkel übertragbar, die deutlich schwach korrelierten. Einen Ausweg böte die Implementierung eines fixen arbiträren Aufzeichnungspunktes in das Kopfgestell des JMA-Systems. Dem Ansatz des Cadiax Compact - Systems folgend könnten so arbiträre SKN-Werte und Bennettwinkel ermittelt werden, die einen Artikulator ohne Übertragungsprojektionsfehler (die durch das direkte Einartikulieren der Modelle mit Hilfe des fixen arbiträren Kopfgestells vermieden werden) individuell programmieren helfen.

Da die SKN und der Bennettwinkel nur eine punktuelle Winkelbestimmung einer komplexen, dreidimensionalen Kondylenbahn darstellen, sollte zumindestens die Krümmung der Kondylenbahn bis zu dem Vorschubspunkt, der der Winkelbestimmung als Basis dient, mit herangezogen werden. Alle drei Systeme bieten eine Berücksichtigung des Krümmungsverhalten für die Auswahl von Kondyleneinsätzen des Artikulators.