

2.0. LITERATURÜBERSICHT

2.1. Zur Definition von Artikulatoren

Zahnärztliche Artikulatoren sind technische Geräte mit mechanischen Elementen (22, 54, 117, 122), die die Kiefer bzw. die Kiefergelenke repräsentieren (5, 22, 54, 196, 230).

Sie dienen zur Aufnahme von Modellen der Zähne und der Kiefer (22, 93, 196), zur Sicherung der statischen Lagebeziehungen beider Kiefer zueinander (53, 54, 93, 100, 103, 117, 136, 196) sowie zur Simulation der dynamischen Bewegungen der Kiefergelenke und des Unterkiefers (5, 22, 53, 54, 100, 103, 122, 136, 230).

Einsatzgebiete der Artikulatoren sind die instrumentelle Funktionsanalyse als zahnärztliche Aufgabe, die der Erstellung einer Diagnose dient (122, 136, 158, 196, 230) und die Herstellung von Zahnersatz außerhalb des Mundes, die eine vorwiegend zahntechnische Aufgabe darstellt (122, 136, 158, 230).

Eine gewisse Unsicherheit herrscht bei dem Gebrauch des Oberbegriffes. Während die meisten Autoren (5, 22, 53, 54, 94, 117, 136, 158, 196, 213, 230) von Artikulatoren als Oberbegriff sprechen, bilden nach Auffassung von E. KÖRBER (122) die Artikulatoren als kiefergelenkbezogene Simulatoren nur einen Teil der sogenannten Bewegungssimulatoren.

2.2. Die Einteilung von Artikulatoren

In der etwa 150 Jahre langen Geschichte der Artikulatorenentwicklung wurden eine Vielzahl von Geräten mit unterschiedlicher Bau- und Funktionsweise entwickelt. Die genaue Zahl aller Geräte ist nicht mehr zu bestimmen, noch weniger die der zahllosen Varianten. Ein gewisser Überblick kann u.a. aus den entsprechenden Arbeiten von BLOMBERG et al. (14), CROUSSILLAT (27), LANG (129), LEJOYEUX (136), MITCHELL und WILKIE (159, 160), MOLNÁR (162), MÜLLER (167), REHM (185) sowie ZEECK (261) gewonnen werden.

In der Literatur sind Einteilungen nach folgenden Kriterien zu finden:

1. Prinzip der dominierenden Führungsfläche (27, 54, 136, 159, 160, 167),
2. Existenz einer Gelenkführung (167),
3. Führung der Achse (95),
4. Anordnung der Führungsflächen (Bauweise) (11, 36, 37),
5. Orientierung nach unterschiedlichen Referenzebenen (62, 65, 115, 206, 207),
6. Justierbarkeit (Einstellbarkeit) (22, 54, 55, 95, 96, 122, 123, 186, 213, 230, 232, 253, 254).

1. Bezüglich des **Prinzips der dominierenden Führungsfläche** (Führungsprinzip) wurden

- gelenkbezogene Artikulatoren und
- kaubahn- (gleitbahn-) bezogene Artikulatoren (54, 122) voneinander unterschieden.

Gelenkbezogene- (auch "kiefergelenkbezogene"-) Artikulatoren besitzen den Kiefergelenken ähnliche künstliche Gelenke. Sie arbeiten mit ihrer posterioren Führung entsprechend dem Prinzip der Gelenkdominanz, d.h., daß im posterioren Bereich die Führungsfunktion der Kiefergelenke dominiert. Bei solchen Geräten spielt auch die Front-Eckzahnführung eine wichtige Rolle (27, 54, 136, 159, 160, 167). Zu den gelenkbezogenen Geräten gehören u.a. die Evans-, Bonwill-, Walker-, Grittmann-, Christensen-, Parfitt-, Gysi- "Simplex"-, Gysi- "Dreipunkt"-, Gysi- "Adaptable"-, Gysi- "Truebyte"-, Aspelund-, Andresen-, Hanau H-, Hanau- "Kinoscope"-, Wriendt-, McCollum- "Gnathoscope"-, Dentatus ARH-, Stuart-, Condylator-, Whip-Mix-, Denar D5A-, TMJ-, SAM 1-, SAM 2-, SAM 3-, Panadent-, Gnathomat-, Artex T-, Artex TS-, Artex N-, Artex AN-, Artex Reference-, Stratos 200-, Protar I-, Protar II- Artikulatoren.

Die künstlichen Gelenke bestehen aus einem führenden und einem geführten Gelenkteil. Beide können unterschiedliche Formen annehmen. So kann z.B. der führende Gelenkteil die Form eines Führungsstiftes (Bonwill, Christensen), einer Führungskante (Condylator, Bayer Contact) oder einer künstlichen Gelenkpfanne (Whip-Mix, SAM) annehmen. Der geführte Gelenkteil nimmt entsprechend die Form eines Führungsringes, eines Doppelkonus bzw. einer Kondylarkugel an.

Die Funktion der kaubahnbezogenen Artikulatoren basiert auf der Führungsfunktion der Kauflächen der Zähne. Solche Geräte beruhen auf dem Prinzip der

kaubahnbezogenen Zahndominanz, die Führungsfacetten der Zähne werden dabei als Führungselemente der Okklusion verwendet (54).

Zu den kaubahnbezogenen Artikulatoren gehören die historischen Kaubahnträger (z.B. Luce, Fehr, Eichentopf) und die Artikulatoren mit einer sogenannten "freischwingenden" Achse (u.a. die Schröder-Rumpel-, Schröder-Trebitsch-, Gnathomat-, Stratos- 200-Artikulatoren), die sowohl mit als auch ohne Gelenkführung betrieben werden können (69, 95, 98). Die Kalottenartikulatoren von Monson und Villain ("Stabiloccluseur"), die Bewegungen entlang einer Kalottenoberfläche erlauben, können auch dieser Gruppe zugeordnet werden (129, 253).

Die Kaubahnträger sind gelenklose Artikulatoren, die nach dem Prinzip der Graviermethode arbeiten (167). Die von den Kauflächen vorgegebenen Bewegungsmöglichkeiten werden bei solchen Geräten mittels Stiften in Näpfchen mit thermoplastischer Masse eingraviert, deren Oberfläche nach der Erstarrung als Führungsfläche für die Stifte dient.

Die Gelenke der Artikulatoren mit einer "freischwingenden" Achse entsprechen denen von Gelenkartikulatoren, sie sind jedoch "ausschaltbar" (95, 98). Solche Geräte können sowohl mit als auch ohne Gelenkführung arbeiten. Im letzteren Zustand arbeiten sie entsprechend dem Prinzip der Kauflächendominanz.

2. Nach der **Existenz einer Gelenkführung** können die Artikulatoren in
- Gelenkartikulatoren und
 - Gelenklose Artikulatoren eingeteilt werden (167).

Die Gelenkartikulatoren (z.B. Stuart, Whip-Mix, SAM, Dentatus, Artex, Denar, TMJ, Condylator, etc.) verfügen über zwei künstliche Gelenke, die die Führungsfunktion der Kiefergelenke imitieren.

Die Gelenkartikulatoren können weiterhin in

- Artikulatoren mit starrer Gelenkführung und
- Artikulatoren mit "freischwingender" Achse eingeteilt werden (95).

Die Artikulatoren mit starrer Gelenkführung (z.B. Dentatus) arbeiten ständig entsprechend der Theorie der Gelenkdominanz und Gelenkführung. Die Führungsfunktion der Gelenke kann nicht ausgeschaltet werden (95).

Die Artikulatoren mit "freischwingender" Achse (z.B. Gnathomat, Stratos 200) verfügen auch über künstliche Gelenkteile. Die führenden Flächen dieser Gelenke können aber außer Funktion gestellt werden. In diesem Zustand kommt die Führungsfunktion der Zähne zur Geltung (95). Dadurch können diese sowohl als "gelenkbezogene" als auch als "kaubahnbezogene" Artikulatoren benutzt werden (54, 95).

In die Gruppe der gelenklosen Artikulatoren gehören

- die Kaubahnträger (Luce, Fehr, Eichentopf) und
- die Roboterartikulatoren ("Gnathic Replicator", "ROSY").

Sie besitzen weder eine Gelenkführung noch einen Inzisalstift- Inzisalteller-Komplex. Bei den Kaubahnträgern wurde die Führungsfunktion durch die Okklusalfäche der Zahnreihen übernommen (54, 167). Der „Unterkieferteil“ der Roboterartikulatoren ist im Raum freischwebend aufgehängt und wird durch Schrittmotoren angetrieben, die ihrerseits von einem Computerprogramm angesteuert werden. Sie können elektronisch registrierte Unterkieferbewegungen reproduzieren (41, 43, 59, 60, 61).

3. Einteilung nach der **Anordnung der Führungsflächen**

BERGSTRÖM (11) unterteilte die Artikulatoren anhand der Anordnung der kondylären Führungsflächen in

- Arcon-Artikulatoren: Führungsfläche (künstliche Gelenkpfanne) fixiert zum Oberteil des Artikulators, Kondylarkugeln fixiert zum Unterteil (z.B. Evans-, Walker-, Grittmann-, Christensen-, Parfitt-, Gysi-Adaptable-, Aspelund-, McCollum-, Bergström-, Stuart-, Whip-Mix-, Denar D5A-, Panadent-, SAM 1-, 2- und 3-, Bayer Arcon Contact-, Dentatus ARA-, TMJ-, Artex AN-, Artex Reference-, KaVo Protar-, Ivoclar Stratos 200- Artikulator).
- Condylar (Non-Arcon) -Artikulatoren: Führungsfläche (drehbare Gelenktrommel mit Führungsschlitz oder Führungskante) fixiert zum Unterteil, Achse und Kondylarkugeln (bzw. Gelenkwalze) fixiert zum Oberteil des Artikulators (z.B. Bonwill-, Schwarze-, Hahn-, Gysi- „Simplex“-, Gysi-„Dreipunkt“-, Hanau H-, Hanau „Kinoscope“-, Schröder-Rumpel-, Schröder-Treibtsch-, Wriendt-, Dentatus ARH-, Dentatus ARL-, Condylator-, Bayer Contact B-, Artex N-, Artex TS-Artikulatoren).

Zur Darstellung des Gegensatzes zwischen Arcon und Condylar Artikulatoren werden letztere auch als „Non-Arcon“ – Artikulatoren bezeichnet.

DERKSEN und VAN HAERINGEN (37) betonten, daß die Anordnung der vorderen inzisalen Führungsfläche von ebenso großer Bedeutung ist wie die Anordnung der Gelenkteile. Sowohl in den künstlichen Gelenken als auch in der Inzisalführung von Gelenkartikulatoren kann jeweils der eine Teil zum Oberteil, der andere zum Unterteil des Artikulators montiert werden. Dadurch ergeben sich vier unterschiedliche Typen (37, 38) (*Abb. 1*) (Seite 10).

- Typ I-Artikulatoren: kondyläre und inzisale Führungsflächen sind zum Oberteil fixiert (z.B. SAM 2, SAM 3, Artex Reference);
- Typ II-Artikulatoren: kondyläre und inzisale Führungsflächen sind zum Unterteil fixiert (z.B. Hanau H, Dentatus ARH, Condylator);
- Typ III-Artikulatoren: kondyläre Führungsflächen sind zum Unterteil, die inzisale Führungsfläche ist zum Oberteil fixiert (Wriendt);
- Typ IV-Artikulatoren: kondyläre Führungsflächen sind zum Oberteil, die inzisale Führungsfläche ist zum Unterteil fixiert (u.a. Stuart, Whip-Mix, SAM 1, Panadent).

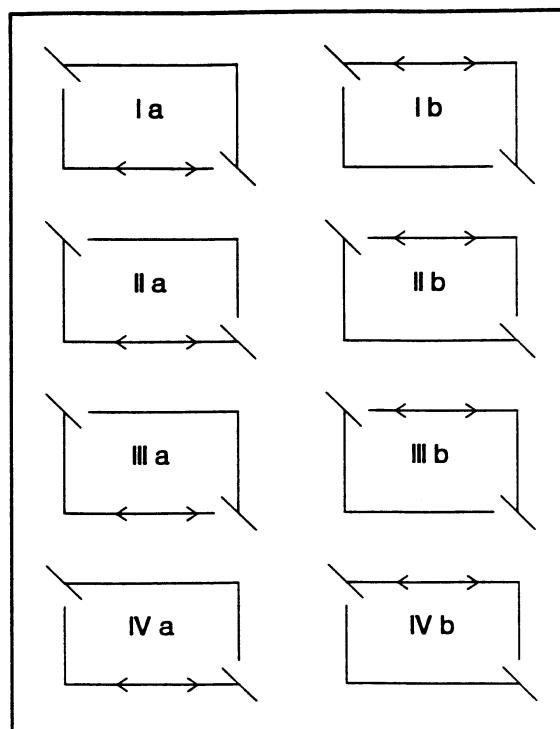


Abb. 1: Einteilung der Artikulatoren nach DERKSEN und VAN HAERINGEN (37) in 4 Typen anhand der Anordnung der kondylären und inzisalen Führungsflächen. Die Gruppen *a* und *b* sind identisch, sie unterscheiden sich nur darin, ob der Unterteil oder der Oberteil des Artikulators bewegt wird.

4. In einer Einteilung nach der **Orientierung zu unterschiedlichen Referenzebenen** können die Artikulatoren in folgende Gruppen eingeteilt werden:

- CAMPER'sche-Ebene-Artikulatoren (54, 115, 206, 207),
- Frankfurter-Horizontale-Artikulatoren (115, 206, 207),
- Achs-Orbital-Ebene-Artikulatoren (54),
- Patienten-Horizontale-Artikulatoren (62, 65).

Historisch wurde die CAMPER'sche Ebene als Referenzebene verwendet (z.B. beim Bonwill-Artikulator, bei den Gysi-Artikulatoren, beim Hanau-Artikulator und beim Condylator-Artikulator). Sie wird durch den Subnasale-Punkt und die beiden Porion-Punkte bestimmt (232), verläuft mehr oder weniger parallel zur Kauebene (115, 232) und erlaubt das Einstellen der Kauebene parallel zur Tischebene (115). Artikulatoren, bei denen die CAMPER'sche Ebene als Referenzebene benutzt wird, müssen eine ausreichend große Höhe (Oberweite) für den erhöhten Platzbedarf des Oberkiefermodells haben (115).

Beim Gebrauch von vielen teil- bzw. volljustierbaren Artikulatoren (z.B. Stuart, Whip-Mix, SAM, Dentatus) wird die Lage des Oberkiefers bzw. der oberen

Zahnreihe mittels eines Gesichtsbogens zur Frankfurter Horizontalebene bestimmt und in den Artikulator überführt (54). Diese anthropologische Ebene wird durch das linke Orbitale und die beiden Porion-Punkte bestimmt (232). Bei Benutzung dieser Referenzebene wird die Kauebene im Artikulator nach vorn abfallend verlaufen (115).

Die Achs-Orbital-Ebene weicht von der Frankfurter Horizontale nur geringfügig in den beiden dorsalen Referenzpunkten ab (122). Es werden anstelle der beiden Porion-Punkte die kinematisch oder arbiträr bestimmten Achsenpunkte verwendet (232).

Beim Artex-System werden die Gipsmodelle in Bezug auf die sogenannte Patienten-Horizontale einartikuliert. Diese entspricht einer Ebene, die durch die beiden Achsenpunkte und durch die Nasenspitze verläuft. Sie soll bei horizontaler Blickrichtung horizontal und parallel zur Okklusionsebene verlaufen (62, 65).

5. Einteilung anhand der **Justierbarkeit (Einstellbarkeit)** von Artikulatoren:

Die Justierbarkeit bezieht sich auf die Fähigkeit des Artikulators, das Einstellen unterschiedlicher Werte für einige oder alle individuellen Parameter (z.B. horizontale Kondylenbahnneigung, Bennett-Bewegung, Interkondylarabstand etc.) zu ermöglichen und dadurch die individuell charakteristischen Bewegungsmuster unterschiedlicher Personen nachahmen zu können (54, 232).

Anhand dieses Kriteriums werden die Artikulatoren eingeteilt in

- Festwertgeräte:
 - einfache (Gips-) Okkludatoren,
 - Scharnier- oder Metall-Okkludatoren,
 - Mittelwert- bzw. Festwertartikulatoren (keine Einstellmöglichkeit),
- individuell einstellbare Geräte:
 - teiljustierbar (mit einigen Einstellmöglichkeiten),
 - volljustierbar (alle Parameter sind individuell einstellbar) (123),

oder in

- einfache Scharnierartikulatoren (Okkludatoren),
- Mittelwertartikulatoren,
- einstellbare Artikulatoren:
 - kaubahnbezogene Artikulatoren,
 - schädelbezüglich teiljustierbare Geräte
 - einige Parameter lassen sich auf individuelle Werte einstellen (z.B. Whip-Mix, SAM 1, Dentatus ARH),
 - schädelbezüglich volljustierbare Geräte
 - praktisch alle Parameter sind einstellbar
 - z.B. Stuart, Denar D5A, TMJ (54, 95, 96, 186, 213, 230).

Bei diesen Autoren (54, 95, 96, 186, 213, 230) lautet der Oberbegriff "Artikulator", d.h., sie ordnen praktisch alle Geräte, auch die Okkludatoren, bei den Artikulatoren ein.

E. KÖRBER (122) verwendet als Oberbegriff die Bezeichnung "Bewegungssimulator". Bewegungssimulatoren können in folgende Kategorien eingeteilt werden:

- gleitbahnbezogene Simulatoren (wie Biocop und Gnathomat),
- kiefergelenkbezogene Simulatoren oder "Artikulatoren":
 - Okkludatoren
 - Mittelwertartikulatoren (z.B. HEILBORN, GYSI-"Simplex", Atomik). Sie sollen nach anatomischen und funktionellen Mittelwerten eingestellt sein.
 - Teiljustierbare Artikulatoren
Sie erlauben eine individuelle Angleichung einiger Werte.
 - Volljustierbare Artikulatoren
Sie sollen eine individuelle Nachahmung der Unterkieferbewegungen ermöglichen.

Nach E. KÖRBER gehören die Okkludatoren zu den Artikulatoren, nicht aber die gleitbahnbezogenen Geräte (122).

Volljustierbare Artikulatoren simulieren die natürlichen Unterkieferbewegungen genauer als teiljustierbare Geräte (23, 212).

Einige der neueren Artikulatoren (z.B. Panadent, SAM 2, SAM 3, Artex AN, Artex Reference, Protar II) lassen sich weder den teil- noch den volljustierbaren Artikulatoren eindeutig zuordnen. Bei diesen Geräten sind zwar nicht alle Parameter einstellbar gestaltet, sie verfügen aber über Einstellmöglichkeiten (z.B. Immediate Side Shift – ISS – Einsatzgarnituren beim Panadent, SAM und Artex oder die Möglichkeit der Einstellung einer Latero-Protrusion bzw. einer Latero-Retrusion - Protar II, Artex Reference), die diesen Artikulatoren bessere Justierbarkeit ermöglicht als konventionellen teiljustierbaren Geräten (108, 132, 133, 146, 147, 148, 151, 229).

Elektronische Artikulatoren

Eine völlig neue Gruppe bilden solche Artikulatoren, die elektronisch betätigt werden.

Der CPS-PC-Artikulator² ist ein mechanischer Artikulator, dessen Gelenkbewegungen durch elektronische Sensoren registriert und auf dem Bildschirm eines Lap-Top-PC-s dargestellt werden. Er eignet sich für die Einstellung und für den Vergleich verschiedener zahngeführter Gelenkpositionen, so kann er in der Diagnostik und Therapie von Kiefergelenkstörungen sowie in der Kieferorthopädie angewendet werden (184). Als normaler Arbeitsartikulator ist er nur für das Aufwachsen zentrischer Okklusionsfelder geeignet, die Berücksichtigung exzentrischer Bewegungen muß anschließend in einem volljustierbaren Artikulator erfolgen. (184). In diesem Sinne ist dies weder ein vollständiger mechanischer Artikulator noch ein echter elektronischer Artikulator.

² RB Dental Elektronik GmbH, Weiden, BRD

- Das **Cicero-CAD/CAM-System**³ von VAN DER ZEL simuliert mit Hilfe eines **Software-Artikulators** die individuellen Bewegungen des Patienten (244, 245, 246, 247). Nach Angaben des Verfassers läßt sich damit eine dynamische Kaufläche gestalten (244, 247). Das System befindet sich im experimentellen Stadium, ein genaues Funktionsprinzip ist nicht bekannt. Dementsprechend ist auch das Funktionsprinzip des dazugehörigen Software-Artikulators nicht bekannt.

Auch die **Roboterartikulatoren** (z.B. „Gnathic Replicator“ von GIBBS und „ROSY“ von EDINGER) gehören zu den elektronischen Artikulatoren. Sie sind imstande, die elektronisch registrierten Kaubewegungen des Patienten mechanisch, durch elektronisch gesteuerte Schritt- oder Gleitmotoren zu simulieren (41, 42, 45, 60, 61).

Die dargestellten Einteilungskriterien und -möglichkeiten vermitteln ein Bild von der Vielfalt gegenwärtiger und historischer Artikulatoren. Gemeinsames Ziel dieser Geräte ist jedoch immer die Reproduktion der Bewegungen des Unterkiefers. Vor der Entwicklung einer im Computer ablaufenden Bewegungssimulation erscheint es zweckmäßig, die zwei wesentlichen Kriterien der Bewegungssimulation

- Anordnung der Führungsflächen und
- Justierbarkeit (Einstellbarkeit) des Gerätes

hinsichtlich ihrer Relevanz zu untersuchen.

³ Elephant Industries, Hoorn, Holland

2.3. Der Einfluß der Anordnung der Führungsflächen auf die Bewegungen des Artikulators - die Arcon - Non-Arcon - Problematik

Es gibt zahlreiche Kriterien (z.B. Stabilität, Handlichkeit, Zerlegbarkeit), die den Zahnarzt veranlassen, sich für Arcon- oder Non-Arcon-Artikulatoren zu entscheiden (53, 95, 219). Nach SMITH werden an amerikanischen Universitäten bei der Herstellung von festsitzendem Zahnersatz bevorzugt Arcon-Artikulatoren und bei herausnehmbarem Zahnersatz eher Non-Arcon-Artikulatoren verwendet (219). Die Auswahl richtet sich meist nicht so sehr nach der Genauigkeit des Instrumentes, sondern nach seiner Handhabbarkeit, z.B. ob Oberteil und Unterteil des Gerätes leicht auseinandernehmbar sind oder nicht. Aufgabe der vorliegenden Untersuchung ist es jedoch, die Frage zu klären, ob Arcon- bzw. Non-Arcon-Geräte zu einer unterschiedlichen Simulation der Kieferbewegungen führen.

Die führende Funktion der Gelenkpfanne des menschlichen Kiefergelenkes (Fossa mandibularis und Tuberculum articulare) wird in einem Gelenkartikulator von einer mechanisch vorgeformten (z.B. beim Condylator-, SAM-, Panadent-, Stuart-Artikulator) oder mittels einer individuell modellierten (z.B. TMJ) künstlichen Gelenkpfanne nachgeahmt. Die Rolle des Gelenkkopfes (Caput mandibulae) wird von einer Kondylarkugel oder einem Doppelkonus übernommen, welche den geführten Gelenkteil darstellen.

Im anterioren Bereich besitzen die Gelenkartikulatoren einen Inzisaltstift-Inzisalteller (Inzisaltisch) -Komplex, der die Führungsfunktion verlorener oder beschädigter Frontzähne übernehmen soll. Der mechanisch verstellbare oder individuell ausgeformte Inzisalteller übernimmt die Funktion der Palatinalflächen oberer Frontzähne und führt die Bewegungen der Inzisaltstiftspitze, die in ihrer Funktion den geführten unteren Frontzähnen entspricht.

Sowohl bei den Gelenken als auch bei der Inzisalführung wird jeweils der eine Teil (entweder der führende oder der geführte Teil) zum Oberteil, der andere zum Unterteil des Artikulators montiert (36, 37). Dadurch ergeben sich vier mögliche Variationen, die den vier Typen (I bis IV) der Einteilung der Gelenkartikulatoren von DERKSEN und VAN HAERINGEN (37) entsprechen (*Abb. 1*) (Seite 10). (Siehe Kapitel 2.2.)

Die geführten kondylären bzw. inzisalen Komponenten sind entsprechend am jeweils gegenüberliegenden Artikulorteil fixiert.

Betrachtet man nur die Anordnung der Gelenkteile, so ergeben sich zwei Möglichkeiten. Der Artikulator ist entweder vom

- Arcon-Typ (*Abb. 2*) (Seite 14).oder vom
- Non-Arcon-Typ (*Abb. 3*) (Seite 14). (11).

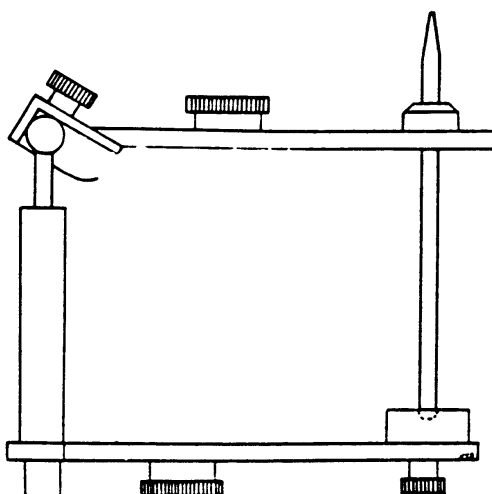


Abb. 2: Arcon-Artikulator: Die kondyläre Führungsfläche ist zum Oberteil des Artikulators fixiert, die Kondylarkugeln sind zum Unterteil fixiert.

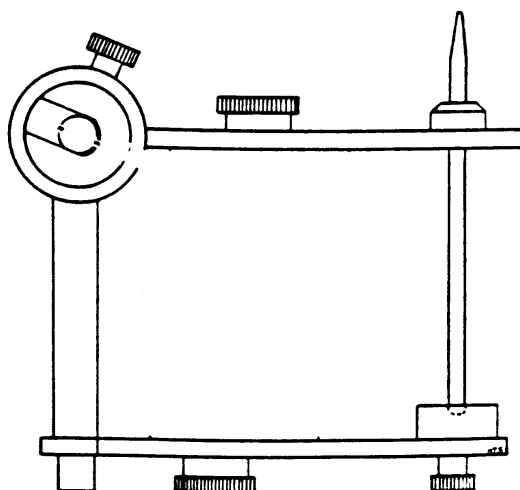


Abb. 3: Non-Arcon-Artikulator: Die kondyläre Führungsfläche ist am Unterteil, die Kondylarkugeln sind am Oberteil des Artikulators fixiert.

Bei den Arcon- Artikulatoren sind die kondylären Führungsflächen (Führungsstift, Kondylargehäuse, Kondylartrommel mit Führungsschlitz, Kondylenbahneinsätze) am Oberteil des Artikulators fixiert, die geführten Elemente (Ringe, Kugel, Walzen) sind am Unterteil des Gerätes befestigt. Arcon-Typ-Artikulatoren sind u.a. folgende: Evans-, Walker-, Grittmann-, Christensen-, Parfitt-, Gysi-Adaptable-, Aspelund-, McCollum-, Bergström-, Stuart-, Whip-Mix-, Denar D5A-, Panadent-, SAM 1-, 2- und 3-, Bayer Arcon Contact-, Dentatus ARA-, TMJ-, Artex AN-, Artex Reference-, KaVo Protar-, Ivoclar Stratos 200- Artikulator.

Bei den Non-Arcon-Artikulatoren sind die kondylären Führungsflächen am Unterteil des Gerätes angebracht, der geführte Teil ist am Oberteil befestigt. Folgende Geräte

sind den Non-Arcon-Artikulatoren zuzurechnen: Bonwill-, Schwarze-, Hahn-, Gysi-Simplex-, Gysi-Dreipunkt-, Hanau-H-, Hanau Kinoscope-, Schröder-Rumpel-, Schröder-Trebitsch-, Wriendt-, Dentatus ARH-, Dentatus ARL-, Condylator-, Bayer Contact B-, Artex N-, Artex TS-Artikulator u.a..

Im Laufe der 150-jährigen Entwicklung der Artikulatoren wurden sowohl Arcon- wie auch Non-Arcon-Artikulatoren gebaut. Es gibt Firmen (z.B. Hanau, Dentatus, Girrbach), die beide Varianten anbieten (30, 31, 32, 62, 64, 65, 160). Es gibt einen Artikulator (Denar-Track-2), der durch einen einfachen Umbau der Gelenkteile gemäß beider Prinzipien betätigt werden kann (114). In den letzten Jahre wurden vorwiegend Arcon-Artikulatoren entwickelt (Artex AN, Artex Reference, SAM 3, Protar, Stratos 200, Bayer Arcon Contact etc.).

Bei beiden Artikulatorentypen wurde der Inzisaltisch meistens am Unterteil des Artikulators befestigt, der Inzisstift entsprechend am Oberteil angebracht. WRIENDT's Lösung (29, 258) der Anbringung des Inzisaltellers am Artikulatoroberteil von 1934 fand lange Zeit keine Nachahmer. Erst bei einigen neuen Artikulatoren wird die Inzisalführung entweder umkehrbar gestaltet, d.h. Inzisalteller und Inzisstift lassen sich zwischen den beiden Artikulartteilen austauschen (z.B. SAM 2, SAM 3, Protar) oder die Inzisalführung wird nach WRIENDT's System mit dem Oberteil verbunden (Artex Reference).

Dem Einfluß der Anordnung der Führungsflächen auf die Bewegungen von Artikulatoren wird in der Literatur relativ wenig Beachtung geschenkt. Die Autoren, die sich mit dieser Problematik befassen (2, 6, 7, 11, 36, 37, 39, 53, 233, 234, 256), diskutieren diese Frage kontrovers.

Einige Autoren (2, 7, 256) vertreten die Meinung, daß die Anordnung der Führungsflächen keinen Einfluß auf die Bewegungen ausübt. Nach Meinung anderer (7, 10, 11, 36, 37, 39, 233, 234) beeinflußt die Anordnung der Führungsflächen die Artikulatorenbewegungen. Es wird auch die Meinung vertreten, daß diese Frage mit den herkömmlichen Untersuchungsmethoden nicht zu beantworten sei (6).

Während die Ansicht vertreten wird, daß eine natürliche Anordnung, d.h. mit der Führungsfläche im Oberteil, korrektere Bewegungen ermöglicht (7, 11, 36, 37, 39, 233, 234), war BENSON (10) der Meinung, daß eine umgekehrte (Non-Arcon-) Anordnung richtiger wäre. Auch wird argumentiert, daß bei rektilinearen kondylären und inzisalen Führungsflächen die Non-Arcon-Variante die klinischen Verhältnisse besser simuliert, während sich bei kurvilinearen Gelenkflächen die beiden Prinzipien nicht unterscheiden sollen (53).

Anstöße bei der Klärung dieser Frage stammen von BERGSTRÖM (11), der eine wissenschaftliche geometrische Erklärung zu dieser Problematik zu geben versuchte. Er bezeichnete eine dem natürlichen Vorbild entsprechende Anordnung als Arcon-Typ (aus den beiden Worten ARTikulator und CONDyle) und die dem natürlichen Vorbild konträre Anordnung (Führungsfläche im Unterteil, geführte Fläche im Oberteil) als Condylar (11) (heute Non-Arcon).

BERGSTRÖM betonte 1942, daß bei Arcon- und Non-Arcon-Artikulatoren verschiedene effektive laterale Winkel, d.h. Bennett-Winkel eingestellt werden müssen, um vergleichbare Bewegungen zu erhalten (11). Er vertrat die Ansicht, daß

bei Arcon-Artikulatoren der BENNETT-Winkel in der Ebene der Gelenkbahn eingestellt werde, bei Non-Arcon-Geräten diese Einstellung jedoch in der Horizontalebene erfolge. 1950 schrieb er, daß die beste Methode für die Untersuchung dieser typenspezifischen Bewegungsunterschiede ein mathematischer Vergleich der Bewegungen beider Artikulorentypen wäre. Er führte jedoch aus: "Eine solche Untersuchung ist durchaus möglich durch den Vergleich der Gleichungen der Protrusionsbewegung des Kiefers und der verschiedenen Artikulatoren. Diese Methode ist jedoch undurchführbar, weil die Gleichungen viel zu kompliziert sind für diesen Zweck" (11).

Durch geometrische Untersuchungen konnte er nachweisen, daß die Bewegungen der Condylar (d.h. Non-Arcon-) -Artikulatoren von denen des stomatognathen Systems sowie von den Bewegungen der Arcon-Artikulatoren abweichen. Als Grund nannte er die Tatsache, daß sich bei Condylar (Non-Arcon-) -Artikulatoren durch die Fixierung der kondylären Führungsflächen am Artikulatorunterteil die horizontale Kondylenbahnneigung (HKN) im Laufe der Protrusionsbewegung ständig ändert. Hingegen wird bei Arcon-Artikulatoren, bei denen die kondylären Führungsflächen fest mit dem Oberteil verbunden sind, die horizontale Kondylenbahnneigung von dieser Rotation des Unterkiefers nicht beeinflußt (11). Anhand dieser Überlegungen vertrat er die Meinung, daß nur Arcon-Artikulatoren fähig seien, "richtige" Bewegungen auszuführen. In diesem Sinne entwickelte er seinen teiljustierbaren Arcon-Artikulator (BERGSTRÖM- Artikulator) (11).

DERKSEN und VAN HAERINGEN (37) übertrugen BERGSTRÖM's Überlegungen auch auf die Inzisalführung, weil sie feststellten, daß die Anordnung der vorderen Führungsflächen für eine korrekte Artikulatorbewegung ebenso wichtig sei wie die der Gelenke. Sie stellten eine neue Einteilung von Artikulatoren anhand der Anordnung der kondylären wie auch der inzisalen Führungsflächen vor. Sie unterschieden dementsprechend theoretisch 8 verschiedene Artikulatorgruppen (*Abb. 1*), praktisch jedoch nur 4, weil es letztendlich gleichgültig sei, ob das Oberteil oder das Unterteil des Artikulators bewegt wird. Somit stellte ihre Einteilung nur einen theoretischen Rahmen dar, da zu jener Zeit nur in die II. und IV. Gruppe ihrer Einteilung gehörende Artikulatoren existierten (37).

Mit Hilfe eines Ellipsographen konstruierten DERKSEN und VAN HAERINGEN (37) sowie DERKSEN und KORENHOF (36) die Bewegungsbahnen ausgewählter Punkte (Inzisalpunkt und ein Molarenpunkt) und bestimmten den Charakter der so gewonnenen Bewegungskurven für alle 4 Gruppen, jedoch nur zweidimensional in der Medio-Sagittal-Ebene bei geraden Führungsflächen.

Bei den Artikulatoren der Gruppe I bewegten sich sowohl der Inzisalpunkt wie auch der Molarenpunkt entlang ellipsenförmiger⁴ Bahnen. Für die Gruppe II ermittelten sie eine kardioide⁵, für die Gruppen III und IV eine konchoide⁶ Bewegung, die

⁴ Ellipse = Der geometrische Ort aller Punkte einer Ebene, für die die Summe der Abstände von zwei festen Punkten konstant ist.
Ihre Gleichung ist: $(x^2 / a^2) + (y^2 / b^2) = 1$ (57).

⁵ Kardioide = Kurve 4. Ordnung, Sonderfall (spitze Variante) der sogenannten PASKAL'schen Schnecke, bei der ein Kreis auf einem anderen Kreis mit gleichem Radius abrollt.

jeweils von der natürlichen elliptischen Bahn der Gruppe I abwichen. Anhand dieser Untersuchungen vertraten beide Untersuchergruppen die Ansicht, daß es bei den vier Artikulorentypen zu unterschiedlichen Bewegungen kommt (36, 37). Den elliptischen Charakter einer natürlichen Protrusionsbewegung entlang gerader Führungsflächen wiesen auch andere Autoren nach (109, 235, 249, 250).

DERKSEN und KORENHOF (36) stellten 1966 fest, daß praktisch alle Artikulatoren aufgrund falscher Prinzipien gebaut wurden, weil kein Gerät der Gruppe I nach DERKSEN und VAN HAERINGEN (37) angehörte. Nur Artikulatoren des Typs I können nach Ansicht der genannten Autoren (36) die natürlichen Bewegungen korrekt wiedergeben. Sie berechneten auch die Bewegung eines Molarenpunktes in der Sagittalebene bei allen 4 Typen und stellten typenspezifische Differenzen fest. Sie fanden die größten Bewegungsunterschiede zwischen den Typen I und II: 0,6 mm in der vertikalen Richtung. Je größer die Neigung der horizontalen Kondylenbahn war, desto größere Differenzen wurden gefunden. Sie äußerten die Meinung, daß Ungenauigkeiten von 0,3 mm - 0,6 mm bei herausnehmbarem Zahnersatz von der Resilienz der Schleimhaut kompensiert werden könnten, bei feststehendem Zahnersatz aber nicht zu tolerieren seien.

Bedingt durch die Tatsache, daß zu einem Artikulorteil (Oberteil bzw. Unterteil) immer nur der eine Gelenkteil (entweder der führende oder der geführte) bzw. entweder der Inzisalteller oder der Inzisstift angebracht sind, sollen nach Ansicht von DERKSEN und KORENHOF (36) die relativen Bewegungen des Oberteils von Artikulatoren von denen des Unterteils abweichend sein.

WEINBERG (256) kam 1963 aufgrund seiner mathematisch-geometrischen Studien zu der Schlußfolgerung, daß Arcon- und Non-Arcon-Artikulatoren ähnliche Bewegungen durchführen und seine mathematische Beweisführung die Aussage unterstützt, wonach keines der beiden Prinzipien einen eindeutigen Vorteil gegenüber dem anderen aufweisen könne.

MORITA et al. (163) verglichen gemessene und mathematisch errechnete Bewegungen des Arcon- Artikulators Hanau 158 und des Non-Arcon- Artikulators Hanau H-2 in der Sagittalebene, entlang gerader Führungsflächen. Ihr direktes Ziel war nur die Überprüfung der Validität der mathematischen Formeln. Ihren Tabellen kann man entnehmen, daß bei den beiden Artikulorentypen zwischen Bewegungen gleicher Punkte bei gleichen Einstellungen Abweichungen bis zu 1,5 mm vorkommen.

FUHR und REIBER (53) haben mögliche Unterschiede der Bewegungswiedergabe von Arcon- und Non-Arcon- Artikulatoren einer eingehenden theoretischen Untersuchung unterzogen. Sie betrachteten das Oberteil des Artikulators als beweglich und untersuchten seine Verlagerungen in der Sagittalebene und in der Horizontalebene. Sie fanden unterschiedliche Abweichungen zwischen den

$$\text{Ihre Gleichung ist: } (x^2 + y^2 - r^2)^2 = 4r^2(x^2 + y^2) \quad (57).$$

⁶ Konchoide = Kurve 4. Ordnung. Sie entsteht dann, wenn eine Gerade a von einer Gerade b geschnitten wird, die sich um einen Punkt O dreht, und von der an beiden Seiten der Gerade a gleichlange Strecken abgetragen werden. Ihre Gleichung ist: $(x - a)^2 * (x^2 + y^2) = c^2 * x^2$ (57).

Bewegungen der beiden Artikulatorentypen Arcon und Non-Arcon und dem natürlichen Beispiel in Abhängigkeit vom Verhältnis der Neigung der Kondylenbahn zur Inzisalbahn (gleich, steiler, flacher), von der Geometrie der Führungsflächen (gerade oder gekrümmt), von der Methode der Bestimmung der Neigung der Kondylenbahn am Patienten (mittels eines Protrusionsregistrates oder mittels einer graphischen Aufzeichnung) und von der untersuchten Bewegungsart (Protrusion oder Laterotrusion). So soll z.B. bei rektilinearen Kondylar- und Inzisalführungen und einer steileren sagittalen Kondylenbahnneigung als die Inzisalbahnneigung, zwischen der terminalen Scharnierachsenposition und einer mittels eines protrusiven Positionsregistrates bestimmten protrusiven Position, das Non-Arcon-Gerät die klinischen Verhältnisse besser simulieren als das Arcon-Gerät (53). Bei ebenfalls geraden Führungsflächen und einer kleineren Kondylenbahnneigung als die Inzisalbahnneigung soll bei einer Registrierung mit einem Protrusionsregistrator das Arcon-Gerät, bei einer Einstellung nach einer graphischen Aufzeichnung das Non-Arcon-Gerät die klinischen Gegebenheiten realistischer simulieren. Bei analog gekrümmten Kondylarführungen sollen die Bewegungen der beiden Artikulatorentypen nicht voneinander abweichen (53).

DOS SANTOS und ASH (39) verglichen mit Hilfe eines elektronischen Registriersystems (Cyberhoby F3) die Bewegungen von vier Arcon- und zwei Non-Arcon-Artikulatoren untereinander und mit den Bewegungen von drei Probanden. Sie fanden zwischen den Bewegungen der Probanden und denen der Artikulatoren statistisch signifikante Unterschiede. Arcon-Geräte simulierten die Unterkieferbewegungen der Patienten besser als Non-Arcon-Artikulatoren.

Die meisten diesbezüglichen Untersuchungen haben nur die Anordnung der dorsalen Führungsflächen - die der Gelenke - untersucht. Nur wenige Autoren (36, 37, 233, 234) bezogen in ihre Untersuchungen auch die Rolle der vorderen Führungsfläche, die der Inzisalführung ein. Diese Untersucher waren der Ansicht, daß die Anordnung der beiden Teile der Inzisalführung einen nicht unbedeutenden Einfluß auf die Bewegungen von Artikulatoren hat.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß die Frage, ob Arcon- bzw. Non-Arcon-Artikulatoren unterschiedliche Bewegungen durchführen, noch nicht eindeutig geklärt ist. Die meisten Autoren, deren Arbeiten auf mathematisch-geometrischen Untersuchungen beruhen (11, 36, 37, 233, 234), vertreten die Ansicht, daß Arcon- und Non-Arcon-Artikulatoren unterschiedliche, voneinander teilweise deutlich abweichende Bewegungen durchführen. Es wird jedoch auch die meist klinisch legitimierte Meinung vertreten (2, 7, 256), daß der Einfluß der Anordnung der Führungsflächen unbedeutend sei.

Einschränkend ist festzustellen, daß die genannten Autoren dieses Problem nur zweidimensional in der Mediansagittalebene, d.h. für eine Protrusionsbewegung entlang gerader Führungsflächen untersucht haben. Es gibt bisher keine räumliche, dreidimensionale Untersuchung dieses Problems.

2.4. Die Einstellbarkeit der Artikulatoren und die individuellen Parameter der Bewegungen

Die Mittelwert- bzw. Festwertartikulatoren (z.B. Atomic, Balance, Dental Hoby, Protar I, Shofu Handy) sind nicht einstellbar. Ihre Abmessungen und Führungsflächen sind auf Durchschnittswerte fest eingestellt. Man nimmt an, daß ihre Bewegungen durchschnittlichen Werten entsprechen (54). Der Interkondylarabstand ist z.B. fest auf 110 Millimeter, die Kondylenbahnneigung auf etwa 30° bezogen auf die CAMPER'sche Ebene bzw. auf 40° bezogen auf die Frankfurter Horizontale eingestellt. Eine Einstellmöglichkeit der Bennett-Bewegung und der Neigung des Inzisaltellers ist nicht vorhanden. Das Einartikulieren der Modelle in solche Geräte erfolgt vorwiegend ohne Gebrauch eines Gesichtsbogens unter Verwendung der bekannten Maße des BONWILL'schen Dreiecks und des BALKWILL-Winkels (11, 15, 167).

Die einstellbaren Artikulatoren lassen sich in teiljustierbare und volljustierbare Artikulatoren einteilen (54).

Bei den teiljustierbaren Artikulatoren (z.B. Hanau-H, Balance de Luxe, Dentatus, Condylator, Whip-Mix, SAM 1, Denar Mark II, Bayer Contact, Bayer Arcon Contact, Artex N, Artex TS) sind einige der Parameter, meistens die Gelenkbahnneigung und der Bennettwinkel, individuell einstellbar. Beim Whip-Mix-Artikulator wurde zusätzlich der Interkondylarabstand in drei Größen veränderbar gestaltet (129, 160, 257). Das Einartikulieren der Gipsmodelle erfolgt mit Hilfe eines arbiträren (mittelwertigen) Gesichtsbogens, eingestellt auf ebenfalls arbiträre Scharnierachsenpunkte. Der dritte Referenzpunkt, und dadurch die angewandte Referenzebene, wird entweder durch eine Glabellastütze ermittelt (z.B. SAM, Artex, Stratos) oder mit Hilfe eines Orbitalanzeigers bestimmt (z.B. Dentatus). Bei beiden Systemen wird meist die Frankfurter Horizontale als Referenzebene benutzt (54, 115, 207, 206). Bei den Artex-Artikulatoren wird die sogenannte "Patientenhorizontale" als Referenzebene angewendet, die ebenfalls mittels einer Glabellastütze bestimmt wird (62). Bei den CAMPER'sche-Ebenen-Artikulatoren, wie der Condylator, wird die Kauebene parallel zur Standfläche des Artikulators und zur CAMPER'schen-Ebene ausgerichtet (115, 206, 207). Die individuellen Einstellparameter werden bei teiljustierbaren Artikulatoren entweder anhand von Positionsregistrator (Protrusionsregistrator für die Einstellung der HKN und Laterotrusionsregistrator für die Einstellung der Bennett-Winkel)(11, 13, 130, 131) mit Hilfe von Kondylenbahnaufzeichnungen und schreibenden Gesichtsbögen (Condylator)(56, 75) oder mittels Daten einer achsialen Pantographie eingestellt (SAM, Panadent, Artex)(54, 135, 146, 151, 215, 216, 217, 218, 232,). Elektronische Registriersysteme können die notwendigen Einstellwerte direkt auf ein Artikulatorensystem bezogen liefern (16, 33, 111, 112, 144, 145, 173).

Die mechanisch einstellbaren volljustierbaren Artikulatoren (z.B., Stuart, Denar D5A) lassen sich anhand der Information von pantographischen Aufzeichnungen individuell einstellen (54, 70, 71, 72, 73, 226, 173). Die Einstellungen lassen sich durch das Verstellen mechanischer Vorrichtungen (Denar, Stuart) oder durch das individuelle Einschleifen von Gelenkeinsätzen (Stuart) vornehmen. Bei den sogenannten stereographischen vollindividuellen Artikulatoren (z.B. TMJ) erfolgt nach einem intraoralen stereographischen Registrator ein individuelles Ausformen der

Gelenkboxen mit Autopolymerisat. Solche künstlichen Gelenkgruben enthalten sämtliche Informationen individueller Bewegungen und können nicht weiter eingestellt werden. Die Modelle werden "nach individueller kinematischer Scharnierachsbestimmung mittels Scharnierachsenlokalisatoren" (z.B. Almore, SAM) mit Hilfe von Übertragungsbögen (z.B. Almore) einartikuliert (130, 131, 151, 215, 218).

Bei der Konstruktion volljustierbarer Artikulatoren wurde die Anpaßbarkeit an die natürlichen Maße und Winkelwerte, d.h. größtmögliche Einstellbarkeit und Präzision der ausgeführten Bewegungen vorrangig beachtet, ohne Rücksicht auf Kompliziertheit, Preis, Zeit- oder Arbeitsaufwand, etc.

Beginnend mit den Untersuchungen von LEE und LUNDEEN (132, 133, 146, 147, 148) und gefolgt von anderen Untersuchungen (151, 215, 216, 217, 218) wurde ein neuer Trend der "quasi" fast volljustierbaren Artikulatoren (Panadent, SAM 2, SAM 3, Artex AN, Artex Reference, Protar II) eingeleitet. Auf der Grundlage dieser Untersuchungen wurden Kondylenbahnneigung und Immediate Side Shift als wichtigste Parameter individueller Bewegungen angesehen. Daher soll die individuelle Einstellung dieser Parameter bei annehmbarer Komplexität und akzeptablem Zeitaufwand eine große Präzision der Bewegungen gewähren (146). Die Gelenkbahn solcher Artikulatoren ist gewölbt, manche (z.B. SAM) haben austauschbaren Gelenkboxen mit unterschiedlichen Krümmungsradien.

Artikulator (mit Literaturstelle)	1	2	3	4	5	6	7	8
Dentatus ARH (30, 32)	NA		X		X		X	
Dentatus ARA (31)	A		X	X	X		X	
Whip-Mix (257)	A	X	X		X			
SAM2 " " (197, 198)	A		X	X	X	X	X	
Panadent (135, 146)	A		X	X		X		
Artex TS (62, 63, 64, 65)	NA		X	X	X			
Artex AN (62, 63, 64, 65)	A		X	X	X	X		
Artex Reference (62, 63, 64, 65)	A		X		X	X	X	X
Protar II " (108, 229)	A		X	X	X	X		X
Denar Mark II (29, 71, 72, 70, 73)	A		X		X	X		
Denar D5A (71, 72, 70, 73)	A	X	X	X	X	X	X	X
Stuart " " (227)	A	X	X	X	X	X		X

Tabelle 1: Charakteristika einiger einstellbarer Artikulatoren

1. Anordnung der Führungsflächen: A = Arcon; NA = Non- Arcon
2. Interkondylarabstand einstellbar
3. Horizontale Kondylenbahnneigung einstellbar
4. Gewölbte Kondylenbahn
5. Bennet-Winkel einstellbar
6. Immediat Side Shift einstellbar
7. Inzisalbahnneigung einstellbar
8. Führung des Laterotrusionskondylus möglich

Die *Tabelle 1* (Seite 21) enthält eine Zusammenstellung der Herstellerangaben⁷ der einstellbaren Parameter einiger justierbarer Artikulatoren. Dies sind

- der Interkondylarabstand (IKA),
- die Horizontale Kondylenbahnneigung (HKN),
- die Krümmung der Kondylenbahnen (KBR),
- die Transversale Bewegung des Mediotrusionskondylus (Bennett-Bewegung)
 - der Bennett-Winkel (BW),
 - der Immediate Side Shift (ISS),
- die Bewegungen des Laterotrusionskondylus
 - die Lateroprotrusion (LP), Lateroretrusion (LR),
 - Laterodetrusion (LD) und Laterosurtrusion (LS),
- die Inzisalbahnneigung (IBN).

Im folgenden werden für diese Parameter der statistische Mittelwert (\bar{X}), die Varianzbreite in der Population, die Methoden der Bestimmung am Patienten, Einstellbarkeit am Artikulator und Einfluß auf die Bewegungen des Artikulators bzw. auf die Formgestaltung der Kauflächen der Zähne anhand von Literaturangaben erörtert.

Die *Tabellen 2 bis 8* (Seiten 23, 25, 27, 28, 29, 31, 32) enthalten die Meßergebnisse von Untersuchungen (3, 12, 38, 46, 48, 50, 75, 76, 80, 82, 85, 97, 118, 119, 120, 130, 146, 147, 148, 154, 171, 176, 179, 216, 221, 225, 237, 241, 243, 260) bezüglich der Varianz der Parameter in der Bevölkerung. Die *Tabellen 1* (Seite 21) und *10* (Seite 45/b) enthalten eine Zusammenfassung der Einstellbarkeit (Grundeinstellung, Intervall der Veränderbarkeit, technische Lösung des Problems) einiger gängiger Artikulatoren. Die *Tabelle 9* (Seite 41) gibt die funktionellen Größen (Breite, Länge und Höhe) dieser Artikulatoren an. Es konnten nur wenige Literaturangaben zu einer bestimmten Rangfolge der Parameter nach ihrer Bedeutung bzw. nach der Größe ihres Einflusses auf die Artikulatorenbewegungen bzw. auf die Kauflächenmorphologie gefunden werden (183, 224).

Die Meinungen über die Wichtigkeit der individuellen Einstellung von Artikulatoren sind sehr unterschiedlich. Die meisten Aussagen zum Thema beruhen hauptsächlich auf praktischen Erfahrungen oder sind rein theoretische Spekulationen. So zog z.B.

⁷**Literaturhinweise:**

Artex:	62, 64, 65
Denar:	29, 70, 71, 72, 73,
Dentatus:	30, 31, 32
Panadent:	135, 146
Protar:	108, 229
SAM:	197, 198
Stuart:	226
Whip-Mix:	257

Reichenbach (189) 1961 eine Bilanz der klassischen Artikulationslehre und kam zu der Aussage, daß „individuelle Artikulatoren ihre Daseinsberechtigung verloren haben“. Er empfahl die Anwendung von einfachen Mittelwertartikulatoren. Vertreter der Gnathologischen Schule (5, 226, 227, 228, 239, 173) streben dagegen eine größtmöglich individuelle Einstellung des Artikulators an.

2.5.1. Interkondylarabstand (IKA)

Als erster bestimmte BONWILL (15) an mazerierten Unterkiefern einen durchschnittlichen Interkondylarabstand von 4 inch (Zoll) = 101,6 mm. Dies ist identisch mit einer Seite des nach ihm benannten gleichseitigen Dreieckes.

Die Bestimmung des Interkondylarabstandes anhand der Gesichtsbreite läßt nur eine grobe Schätzung des Interkondylarabstandes zu (238). Mit der Achsiographie kann ebenfalls nur die Gesichtsbreite und nicht der Interkondylarabstand gemessen werden (215, 218). Durch das Einstellen eines volljustierbaren Artikulators anhand der Pantographie (3, 154, 171, 238, 241) kann der Interkondylarabstand bzw. der Abstand der vertikalen Bewegungszentren bestimmt werden. Auch durch eine intraorale Aufzeichnung mit dem zentralen Stützstift läßt sich der Interkondylarabstand graphisch-geometrisch bestimmen (230). Anhand elektronischer Registrierdaten wurde der IKA mathematisch als Entfernung der vertikalen Rotationszentren der Lateralbewegung bestimmt (85, 143). Horizontale kernspintomographische Schnittbilder eignen sich ebenfalls für die Feststellung des realen Interkondylarabstandes (121).

Autor (mit Literaturstelle)	Jahr	Pat. -Zahl	X	Variationsbreite
Aull " " (3)	1965	50	112,1 mm	90 – 140 mm
Ott " " (171)	1982	226	110 mm	90 – 130
Hobo " " (85)	1984	50	110 mm	104 – 116
Taylor " " (238)	1985	8	117,5 mm	k.A.
Tradowsky (241)	1990	260	105 mm	90 – 130 mm
Mandilaris (154)	1992	45	113,2 mm	k.A.
Pröschel (183)	1995	60	102 mm	95 – 112 mm

Tabelle 2: Interkondylarabstand (Literaturangaben)

k.A. = keine Angaben; X = Mittelwert

Die *Tabelle 2* (Seite 23) gibt Mittelwerte und Variationsbreite des Interkondylarabstandes anhand klinisch-experimenteller Untersuchungen an. Es wurden Werte zwischen 90 mm und 140 mm angegeben (Mittelwert um 110 mm) (3, 85, 154, 171, 238, 241). Seine Größe soll bei Männern und Frauen unterschiedlich sein (241):

- Männer: 108 mm (90 mm - 130 mm),
- Frauen: 102 mm (90 mm - 122 mm)

Der Unterschied ist statistisch signifikant (241). KORDAß und MITARBEITER fanden dagegen, daß nur bei der Gesichtsbreite (Hauptpunkteabstand) ein "Unterschied zwischen den Meßwerten" von männlichen und weiblichen Probanden zu finden ist, bei dem Interkondylarabstand "dagegen nicht (121).

Der Interkondylarabstand ist lediglich bei den volljustierbaren Artikulatoren stufenlos einstellbar. Bei den meisten teiljustierbaren Artikulatoren ist er auf 110 mm festgelegt. Beim Whip-Mix-Artikulator läßt sich der IKA in drei Stufen einstellen:

- Position S (small) = 90 mm
- Position M (middle) = 110 mm
- Position L (large) = 130 mm (257).

Nach einigen Autoren (70, 72, 107) hat der IKA vorwiegend auf die antero-posteriore Richtung der Höckerbahnen in der Horizontalebene einen Einfluß .

Bedeutung und Notwendigkeit der Bestimmung und Einstellung des Interkondylarabstandes sind umstritten (9, 71, 72, 83, 146, 151). Einige Autoren fordern eine stufenlose Feineinstellung (9, 71, 72,), andere meinen, daß der Einfluß der IKA auf das Kauflächenrelief nur gering sei (83, 146). MACK (151) vertrat die Ansicht, daß Diskrepanzen zwischen dem patienteneigenen Interkondylarabstand und dem Abstand der Kondylarkugeln im Artikulator durch eine gezielte Veränderung des Bennettwinkels kompensiert werden könne.

2.5.2. Horizontale Kondylenbahnneigung (HKN)

Der Neigungswinkel der Kondylenbahn zur Horizontalebene kann

- intraoral durch sogenannte "Positionsregistrare" (Check-bite-Methode), (12, 13, 67, 130, 131, 177),
- extraoral durch graphische Aufzeichnung der Bewegungsbahnen (z. B. Pantographie oder am Unterkiefer befestigter Gesichtsbogen) (12, 24, 38, 46, 99, 215, 260),
- extraoral durch Turbinenfräsung in Plastikblöcke (132, 133, 148),
- mittels axialer Pantographie (135, 216, 218),
- mit elektronischen Registrierverfahren (17, 33, 47, 144, 156, 172, 173, 208),
- mittels geometrischer (38, 46) oder mathematischer Verfahren (46) bestimmt werden.

Bei einer graphischen Aufzeichnung der sagittalen Kondylenbahn kann ihre Neigung in Bezug auf die gewählte Gesichtshorizontale durch die Tangentenmethode (eine Tangentenlinie wird vom Ausgangspunkt zur Kondylenbahn angelegt) (223) oder durch die Sekantenmethode (eine Sekante wird zwischen dem Ausgangspunkt und einem Punkt entlang der Kondylenbahn in einem Abstand von 5 mm oder 10 mm vom Ausgangspunkt entfernt gezogen) (38) bestimmt werden. Beide Methoden ergeben deutlich unterschiedliche Ergebnisse (223), wobei die Winkelwerte der Tangentenmethode größer sind als die der Sekantenmethode (222, 223).

Autor (mit Literaturstelle)	Jahr	Pat.- Zahl	Ref.- Ebene	X	Variations- breite	Rechts	Links
Isaakson (97)	1959	36	F – H	35,64°	22 – 53 °	36,02°	35,11°
Kohno (119)	1971	10	O - P	39,7°	28 – 52°	k.A.	k.A.
Lundeen (148)	1973	50	F – H	40°	25 – 75°	k.A.	k.A.
Dieter (38)	1984	74	F – H	50,35°	28 – 69°	50,5°	50,2°
Kohno (120)	1987	35	O - P	38,2°	23,3 – 52,6°	k.A.	k.A.
Stern (225)	1988	10	F – H	38,05°	32 – 41°	37,9°	38,2°
El-Gheriani (46)	1989	10	CE	27,01°	11 – 47°	27,72°	26,43°
Pelletier (176)	1990	50	F – H	45,1°	k.A.	45,3°	44,9°
Zamacona (260)	1992	56	CE	36,18°	10 – 62°	35,75°	36,6°
Bernard (intraoral) (12)	1993	40	F – H	50,9°	34 – 70°	51,4°	50,4°
Bernard (extraoral) (12)	1993	40	F – H	49,4°	33 – 69°	49,7°	49,1°
Pröschel (183)	1995	60	S-O	53°	36 – 71°	k.A.	k.A.
Johnson (99)	1997	103	CE	31,75°	8 – 54°	31,5°	32°
Payne " " (173)	1997	55	?	42,70°	11,4 – 74,0°	42,8°	42,62°

Tabelle 3: Horizontale Kondylenbahnneigung (Literaturangaben)

Ref.-Ebene = Angewandte Referenzebene

F – H = Frankfurter Horizontale

O – P = Okklusale Ebene

CE = CAMPER'sche Ebene

S-O = Scharnierachs-Orbital- Ebene

X = Mittelwert

k.A. = keine Angaben

In der Literatur werden für die HKN Werte zwischen 10° und 75° angegeben (12, 38, 46, 97, 148) (Tabelle 3) (Seite 25). Die Winkelwerte werden zu den folgende Referenzebenen angegeben:

- Frankfurter Horizontale (FH) (12, 38, 97, 149, 176),
- CAMPER'sche Ebene (CE) (46, 260, 99),
- Achs-Orbital-Ebene (AO) (216),
- Okklusale Ebene (O - P) (119, 120).

Zwischen diesen Ebenen sind Unterschiede von bis zu 20° nachweisbar (206, 216). Die Meßwerte der Kondylenbahnneigung (zur FH-Ebene) streuten stark. Sogar die Mittelwerte unterschiedlicher Untersuchungen sind stark unterschiedlich (12, 97). Die Rechts-Links-Unterschiede können bei einem Probanden bis zu 22° betragen (97), der Durchschnitt der Meßwerte der rechten und linken Seite ist jedoch annähernd gleich (46, 97, 260). Zwischen den Daten von Männern und Frauen sowie von jungen und alten Probanden wurde kein nennenswerter Unterschied gefunden (97).

Die Neigung der Kondylenbahn zur Scharnierachse-Orbital-Ebene ist nach FREESMEYER in einer graphischen Registrierung steiler als bei einer

elektronischen Aufzeichnung. "Sie verläuft außerdem bei beiden Registriermethoden flacher als die Eminentia articularis." (52).

Nach einer Untersuchung von SCHWEIGREITER et al. (208) ist die Kondylenbahnneigung bei Totalprothesenträgern flacher als bei bezahnten Personen (48° bzw. 55° bei 4 mm Protrusion). Ihre Steilheit nimmt sogar mit der Zahl der Jahre, in denen eine Prothese getragen wurde, kontinuierlich ab.

Die HKN ist der einzige Parameter, den man bei allen untersuchten justierbaren Artikulatoren in weiten Bereichen stufenlos einstellen kann. Generell liegt die Einstellbarkeit zwischen 20° und 60° zur Horizontalen, bei einigen Artikulatoren (Artex, Protar) können aber auch negative Werte bis zu -20° bzw. -15° eingestellt werden. Die Grundeinstellungswerte einzelner Artikulatoren (der Wert, auf den die HKN vor ihrer individuellen Justierung eingestellt wird) weichen in Abhängigkeit von der angewandten Referenzebene voneinander ab.

Verschiedene Autoren vertreten die Ansicht, daß sich die Neigung der Kondylenbahn hauptsächlich auf Bewegungen der Mediotrusionsseite auswirkt (3, 9, 28). Eine steilere Gelenkbahn soll höhere Zahnhöcker und tiefere Fissuren ermöglichen bzw. erfordern (153, 181).

2.5.3. Die Krümmung der Kondylenbahnen (KBR)

Die Krümmung der Kondylenbahn kann u.a.

- anhand der notwendigen Einsätze eines volljustierbaren Artikulators nach pantographischer Aufzeichnung (3, 97, 171),
- mittels Turbinenfräsungen in Kunststoffblöcken (132, 133, 147, 148),
- mit Hilfe mechanischer (221) oder elektronischer Achsiographie (81, 82) bestimmt werden. Literaturangaben zu möglichen Kondylenbahnradien sind in *Tabelle 4* (Seite 27) zusammengefaßt.

Es werden Krümmungen mit Radien zwischen 4,8 mm und 20,3 mm (76, 81, 82) sowie Radienmittelwerte um 4 mm (76) angegeben. Nach LUNDEEN (146) konnten 80% der Aufzeichnungen einer Krümmung mit einem Radius von 3/4 inch⁸ (≈ 19 mm) zugeordnet werden.

Nach AULL (3) können Kondylenbahnen gelenkgesunder Probanden in erster Annäherung als Kreisbögen betrachtet werden (3). Im klinisch ungestörten stomatognathen System gelten nach MEYER und KUBEIN-MEESENBURG (157) gleichförmig und harmonisch verlaufende achsiographisch aufgezeichnete sagittale Gelenkbahnen als normal. Mittelwertige Krümmungsradien entsprechen häufig den von KUBEIN-MEESENBURG und NÄGERL berechneten Katenaten⁹ (126).

⁸ Einem Inch (abgekürzt "), deutsch Zoll, entsprechen 2,54 mm (94).

⁹ Katenate = mathematischer Begriff, bedeutet Kettenlinie (auch Katenoide). Ihre Gleichung lautet: $y = a * \cos(h) * x / a - a$ (124).

Autor (mit Literaturstelle)		Jahr	Pat.-Zahl	X	Variationsbreite
Isaakson	(97)	1959	36	7/8" = 19,3 mm	k.A.
Aull	(3)	1965	50	3/8" = 9,4 mm	k.A.
Lundeen	(146)	1979	163	3/4" = 19 mm	k.A.
Sperr	(221)	1981	105	16,8 mm	k.A.
Ott	(171)	1982	226	3/8" = 9,4 mm	k.A.
Helfgen	(82)	1991	34	8,2 mm	4,8 – 20,3 mm

Tabelle 4: Kondylenbahnradius (Literaturangaben)

Pat.- Zahl = Patientenzahl

k.A. = keine Angaben

X = Mittelwert

Die Krümmung der Kondylenbahn wird gewöhnlich durch den Radius des Kreises, der ihrer Wölbung entspricht oder der Krümmung der Bahn des Mittelpunktes der Kondylarkugel (152) in Millimeter oder Zoll (Inch) angegeben. Sie ist bei den mechanisch einstellbaren Artikulatoren nicht stufenlos einstellbar. Bei einigen Artikulatoren stehen verschiedene Einsätze mit unterschiedlichen Krümmungsradien zur Verfügung. Bei den meisten Mittelwertartikulatoren und bei einigen teiljustierbaren Artikulatoren gibt es nur eine gerade ungekrümmte Kondylenbahn.

Nach AULL (3), BELLANTI (9) sowie CURTIS und WACHTEL (28) hat die Wölbung der Kondylenbahn ähnlich wie die HKN hauptsächlich auf der Mediotrusionsseite einen Einfluß auf die Bewegungsbahn unterer Zahnhöcker. Es wird sowohl bei der Protrusion wie auch bei der Laterotrusion nur eine geringe Einflußgröße angegeben (0,2 bis 0,5 mm) (9, 28).

2.5.4. Bennett-Bewegung, Bennett-Winkel (BW) und Immediate Side Shift (ISS)

Die Bennettbewegung (nach N.G.BENNETT benannt) ist das seitliche, räumliche Versetzen des Unterkiefers während einer Lateralbewegung (52). Durch die Kombination der beiden Bewegungsarten (Lateralbewegung und Bennettbewegung) entsteht ein kompliziertes, räumlich-dreidimensionales Bewegungsmuster des Unterkiefers, welches sich in den Bewegungen beider Kiefergelenke manifestiert. Traditionsgemäß wird nur die Bewegung des Mediotrusionskondylus als Bennettbewegung beschrieben.

Sie kann entweder als ein Winkelwert (Bennett-Winkel) oder metrisch als sofortiger (initialer) Lateralversatz (ISS = Immediate Side Shift) auf der Mediotrusionsseite am Patienten gemessen bzw. am Artikulator eingestellt werden.

Der Bennett-Bewegung wird in der Literatur eine große Bedeutung beigemessen (3, 9, 181, 251). Sie hat vorwiegend einen Einfluß auf die Lage und Höhe der Höcker

und die Tiefe der Fissuren hauptsächlich auf der Mediotrusionsseite (9, 181). Eine große Bennett-Bewegung erfordert flache Molaren mit kurzen Höckern und seichten Fissuren (3, 9, 147, 251).

Literaturangaben über die Größe des Bennett-Winkels sind in *Tabelle 5* (Seite 28) zusammengestellt. Es werden Werte zwischen 0° und 45° genannt (48, 97, 130), mit Mittelwerten zwischen $12,5^\circ$ (243) und 23° (3, 130). Es wird nur über geringe Rechts-Links-Unterschiede berichtet (50, 243).

Autor (mit Literaturstelle)	Jahr	Pat.-Zahl	X	Variationsbreite
Gysi (75)	1929	18	15°	$5 - 25^\circ$
Isaakson (97)	1959	26	13°	$0 - 35^\circ$
Fischer (48)	1959	116	k.A.	$0 - 30^\circ$
Aull (3)	1965	50	23°	$5 - 35^\circ$
Lauritzen (130)	1974	50	23°	$0 - 45^\circ$
Freesmeyer (50)	1984	70	13°	k.A.
Utz (243)	1988	123	$12,5^\circ$	k.A.
Pröschel (183)	1995	60	7°	$-6 - 28^\circ$

Tabelle 5: Bennett-Winkel (Literaturangaben)

Pat.-Zahl = Patientenzahl

k.A. = keine Angaben

X = Mittelwert

Die genannten Winkelwerte wurden anhand extraoraler graphischer Aufzeichnungen (75), intraoraler Positionsregistrare ("Check-Bite" Methode) (1, 130, 131, 180), mit Hilfe der Pantographie (3, 50, 180) oder der Achsiographie (243) ermittelt. Die Genauigkeit der extraoralen Methode der graphischen Aufzeichnung soll der intraoralen "Check-Bite"-Methode überlegen sein (149).

Mit Ausnahme des Panadent-Artikulators (bei dem kein Bennett-Winkel, sondern nur eine ISS einstellbar ist) ist der Bennett-Winkel bei allen Gelenk-Artikulatoren stufenlos zwischen 0° und etwa 45° einstellbar. Als Grundeinstellung dienen entweder 15° oder 20° . Falscheinstellungen des Bennett-Winkels können einen maximalen Fehler von 0,5 mm, gemessen an der Kaufläche, verursachen (9).

In der *Tabelle 6* (Seite 29) sind Literaturangaben zur sofortigen Lateralverschiebung (ISS) zusammengestellt. Es werden Werte zwischen 0 mm und 3 mm (38, 118, 148, 179) mit Mittelwerten von 0,5 mm bis 1,08 mm angegeben (80, 148). Geringfügige Rechts-Links-Unterschiede sollen möglich sein (38). Lundeen et al. (147) ermittelten bei 80% der Probanden eine ISS von 1,5 mm oder weniger.

Autor (mit Literaturstelle)	Jahr	Pat.-Zahl	X	Variationsbreite	Rechts	Links
Preiskel (179)	1970	27	1,04 mm	0 – 2,4 mm	k.A.	k.A.
Lundeen (148)	1973	50	1,08 mm	0 – 3 mm	k.A.	k.A.
Koeck (118)	1976	56	0,9 mm	0 – 2,5 mm	k.A.	k.A.
Lundeen (147)	1978	163	0,75 mm	k.A.	k.A.	k.A.
Dieter (38)	1984	70	k.A.	0,2,5 mm	1,11 mm	1,25 mm
Heinrichs (80)	1988	15	0,5 mm	k.A.	k.A.	k.A.
Utz (243)	1988	123	k.A.	k.A.	0,9 mm	0,9 mm
Payne (173)	1997	55	0,44 mm	0 – 2,1 mm	0,43 mm	0,45 mm

Tabelle 6: Immediate Side Shift (Literaturangaben)

Pat. – Zahl = Patientenzahl

k.A. = keine Angaben

Die Größe des ISS ist von der Steilheit der Eckzahnführung abhängig. Je steiler die Führung, desto kleiner ist der ISS (66).

Es muß zwischen einem ungeführten und einem geführten ISS unterschieden werden. Für das letztere werden Werte angegeben, die etwa doppelt so groß sind wie die eines ungeführten ISS (243). ISS-Werte größer als 0,4 mm werden als pathologisch eingestuft (110).

Die Bestimmung des ISS kann mittels mechanisch-graphischer Methoden wie der Pantographie (73, 150), der mechanischen Achsiographie (50, 243) oder mit elektronischen Registrierverfahren (60, 111, 112, 144) erfolgen.

Der ISS ist am Artikulator entweder stufenlos geradlinig transversal einstellbar (Denar Mark II, Denar D5A), oder es sind Serien von austauschbaren, gewölbten Bennett- Einsätzen (SAM 2, Artex AN) bzw. komplett austauschbaren Analogboxen (Panadent) erhältlich. Die gewölbten ISS - Führungen der SAM- und Panadent-Artikulatoren erreichen ihre maximalen ISS bei etwa 3 mm sagittaler Kondylenbewegung (135, 197, 198,). Die Wiedergabe der Bennett-Bewegung in Form eines Immediate Side Shift ermöglicht eine genauere Simulation der Unterkieferbewegungen als die Einstellung eines Bennett-Winkels (78).

Ein ISS von 2 mm kann nach BELLANTI (9) einen Einfluß von bis zu 2,4 mm auf das Kauflächenrelief haben. Wird eine Unterkieferbewegung mit 2 mm ISS in einem Artikulatoren ohne ISS - Einstellmöglichkeit simuliert, sollen auf der Mediotrusionsseite Abweichungen bis zu 2,2 mm vorkommen können (251).

2.5.5. Bewegungen des Laterotrusionskondylus

Auf der Basis von pantographischen Aufzeichnungen wurden u.a. von AULL (3) und GUICHET (70, 71, 72, 73) Schlußfolgerungen über die möglichen räumlichen

Bewegungen des Laterotrusionskondylus erarbeitet. Folgende Bewegungen werden unterschieden:

- nach "außen" - vorne (Lateroprotrusion),
- nach "außen" - hinten (Lateroretrusion),
- nach außen - oben (Laterosurtrusion),
- nach außen - unten (Laterodetrusion).

Über das Ausmaß dieser Bewegungen (72) gibt es kaum klare Angaben. HOB0 (85, 92) und LePERA (137) vertreten die Ansicht, daß diese keine real existierenden Bewegungen sind, sondern diese nur einen Projektionsfehler des Registriersystems darstellen.

Die Einstellung dieser Bewegungen ist nur bei wenigen volljustierbaren Artikulatoren möglich. Durch einen Winkelwert wird meistens die Abweichung der Bahn des laterotrusionsseitigen Kondylenpunktes von der transversalen Richtung und von der Scharnierachse angegeben (70), entlang welcher der Kondylenpunkt bei seiner "nach außen gerichteten Bewegung auch nach vorn, hinten, oben oder nach unten geführt werden kann (Abb. 16) (Seite 49). Winkelwerte um 20° - 30° sind entweder in allen vier Richtungen (z.B. Denar D5A, Stuart) oder in einigen ausgewählten Richtungen (Protar II: Latero-protrusion und Lateroretrusion) einstellbar. Bei einigen Artikulatoren wurde eine automatische Führung des Laterotrusionskondylus in das Gelenkgehäuse eingefräst (z.B. Artex AN).

Nach SCHULTE et al. (204, 205) sollen die räumlichen Bewegungen des Laterotrusionskondylus vorwiegend einen Einfluß auf die Bewegungen der Laterotrusionsseite haben. Demnach hätten vertikale Bewegungen des Laterotrusionskondylus - Laterosurtrusion und Laterodetrusion - einen großen Einfluß auf die Bewegungen der Laterotrusionsseite und sollten deshalb bei der Artikulatoreinstellung berücksichtigt werden (204, 205).

2.5.6. Inzisalbahneigung (IBN)

Die Inzisalführung eines Artikulators kann mechanisch einstellbar oder aus Kaltpolymerisat individuell ausgeformt sein. Mit Hilfe eines individuell ausgeformten Inzisaltellers kann die Information einer vorhandenen Führungsfunktion der Frontzähne "gespeichert" und später reproduziert werden. Sind die Frontzähne schon verlorengegangen und fehlt deshalb die Information über die ursprüngliche Frontzahnführung, oder ist diese z.B. durch Abrasion ungünstig verändert, so kann ein mechanisch einstellbarer Inzisalteller bei dem Aufbau einer Front-Eckzahnführung Normwerte vorgeben.

Literaturangaben zur Größe der Inzisalbahneigung sind in der *Tabelle 7* (Seite 31) zusammengestellt. Es werden Werte zwischen $22,6^\circ$ (120) und 88° (216) genannt. Die angegebenen Mittelwerte schwanken zwischen $46,4^\circ$ (120) und 67° (38). Für die Neigung der Eckzahnführung werden Werte zwischen 43° (175, 176) und $48,7^\circ$ genannt (216).

Autor (mit Literaturstelle)	Jahr	Pat.-Zahl	X	Variationsbreite
Kohno (119)	1971	10	50,9°	24,5° - 60°
Dieter (38)	1984	74	67°	27° - 82°
Slavicek (216)	1984	285	57,5°	23° - 88°
Kohno (120)	1987	35	46,4°	22,6° - 67,7°
Pelletier (176)	1990	50	54°	k.A.

Tabelle 7: Inzisalbahneigung (Literaturangaben)

Pat.- Zahl = Patientenzahl
k.A. = keine Angaben

Viele Artikulatoren besitzen lediglich flache bzw. gerade Inzisalsteller, die kaum als Führungsfläche fungieren können. Sie dienen nur zur Abstützung des Inzisalstiftes und damit zur Sicherung der vertikalen Dimension. Manche Geräte haben einen leicht konischen Inzisalsteller oder haben Sätze von Inzisalstellern mit verschiedenen Neigungswinkeln, was eine gewisse Einstellbarkeit bedeuten kann und die Adaptation des Artikulators für verschiedene Aufgaben ermöglicht.

Einige Geräte haben einen um die transversale Achse verstellbaren Inzisalsteller (z.B. Dentatus), oder einstellbare Seitenflügel zur Führung der Lateralbewegung (Eckzahnführung) (z.B. SAM, Denar, Dentatus, Artex Reference). Mitunter sind auch die Führung der Protrusion und der Laterotrusion getrennt einstellbar (z.B. SAM, Artex-Reference).

Der Einfluß der Inzisalführung auf die Unterkiefer- und Artikulatorbewegungen ist zwar allgemein anerkannt, dennoch konnten keine Literaturangaben zur Größenordnung dieses Einflusses gefunden werden.

2.5.7. Kurvatur der Inzisalführung (IR)

Die palatinale Führungsfläche der natürlichen oberen Frontzähne ist in ihrem nichtabradierten Originalzustand konkav. In erster Annäherung kann die Kurvatur der Palatinalfläche oberer Frontzähne durch Kreise mit verschiedenen Radien angegeben werden (81, 82). Diese Wölbung wurde von HELFGEN et al. (82) mittels Kreisschablonen unterschiedlicher Radien und von LUCKENBACH und FREESMEYER mit elektronischen Registriersystemen gemessen (144). KUBEIN-MEESBURG vertritt die Meinung, daß die Wölbung der Palatinalfläche der Inzisivi der Wölbung von Katenaten entspricht und genetisch mit der sagittalen Wölbung des palatinalen Höckers oberer Prämolaren verknüpft sei (124, 125, 127). REIBER und WAGNER (188) konnten diese Hypothese nicht bestätigen.

Autor (mit Literaturstelle)	Jahr	Pat.-Zahl	X	Variationsbreite
Haage (76)	1982	95	4,13 mm	k.A.
Helfgen (82)	1991	34	5,8 mm	3 – 20,6 mm

Tabelle 8: Inzisalbahnradius (Literaturangaben)

Pat.- Zahl = Patientenzahl

k.A. = keine Angaben

Die *Tabelle 8* (Seite 32) faßt die in der Literatur angegebenen Daten der Krümmungsradien der Palatinalfläche oberer mittlerer Inzisivi zusammen. Es werden Radien zwischen 3 mm und 20,6 mm angegeben (76, 82). Als Mittelwerte werden 4,13 mm bzw. 5,8 mm genannt (76, 82). Für die Palatinalfläche oberer Eckzähne sind Krümmungsradien zwischen 1,9 mm und 27 mm mit einem Mittelwert von 10,3 mm angegeben worden (82).

Die meisten einstellbaren Inzisalteller (z.B. SAM, Panadent, Dentatus) sind flach, sie haben nicht die natürliche Wölbung der Palatinalfläche oberer Frontzähne. Die wenigen gewölbt dargestellten Inzisalteller (z.B. Artex) haben eine maximale Neigung von etwa 20° zur Horizontalen. Lediglich die aus Kaltpolymerisat individuell geformten Inzisalteller können die natürliche Form der Frontzahnführung in vollem Umfang wiedergeben. Als annehmbaren Kompromiß empfiehlt SCHÄFFER (199) zwei unterschiedliche Neigungs-Einstellungen des Inzisaltellers: eine steile für die inzisale Hälfte und eine flachere für die cervicale Hälfte der palatinalen Konkavität von Frontzähnen.

2.5. Mathematisch- geometrische Methoden zur Untersuchung, Analyse und Simulation der Unterkiefer- und Artikulatorenbewegungen und zur Untersuchung des Einflusses der individuellen Parameter auf diese Bewegungen

Die Bewegungen des Unterkiefers (75, 79, 87, 88, 90, 91, 92, 104, 105, 109, 145, 153, 216, 217, 220, 233, 235, 236, 237, 249) und daraus abgeleitet die Bewegungen der Artikulatoren (11, 36, 37, 49, 75, 161, 163, 171, 203, 204, 205, 234, 250, 253, 254, 255, 256, 259) oder ihrer Zusatzgeräte, wie z.B. die von Pantographen (106), wurden häufig mittels mathematisch- geometrischer Verfahren untersucht.

Die Darstellung komplizierter räumlicher Unterkiefer- bzw. Artikulatorbewegungen konnte zunächst nur durch Vereinfachungen der Fragestellung gelöst werden. So wurden einfache Grundbewegungen wie z.B. die Rotation um die Scharnierachse (105, 203, 220, 259), die Protrusion (11, 36, 37, 75, 92, 104, 106, 109, 145, 153, 163, 171, 216, 235, 249, 252, 253, 254, 255, 256), die Laterotrusion (11, 75, 106, 203, 204, 205, 217, 220, 236, 250, 252, 253, 254, 255, 256), Protrusion und Laterotrusion (11, 75, 83, 106, 161, 171, 197, 198, 249, 250, 252, 253, 254, 255, 256) oder die Retrusion (105) mathematisch formuliert.

Ferner wurden Bewegungen entlang ebener Führungsflächen in einer einfachen zweidimensionalen Darstellung in ausgewählten Raumebenen dargestellt (11, 36, 37, 75, 90, 91, 92, 104, 105, 109, 163, 235, 236, 249, 250, 256, 259). Eine zweidimensionale Darstellung entlang gewölbter Führungsflächen gab es für Unterkieferbewegungen (153, 216) sowie für die Bewegungen von Artikulatoren (171). Eine dreidimensionale Darstellung wurde nur für die geradlinigen Bewegungen durchgeführt (75, 83, 92, 106, 203, 217, 220). Die Darstellung von dreidimensionalen Unterkieferbewegungen entlang gewölbter Führungsflächen fehlt bislang völlig, denn eine realistische Darstellung dreidimensionaler Bewegungen in ihrer vollen Komplexität erfordert komplexe mathematische Verfahren wie z.B. dreidimensionale mathematische Derivationen (106) bzw. die Anwendung eines Computers (191, 192, 233, 234).

Eine ausführliche geometrische Darstellung der Bewegungskapazität von Artikulatoren findet sich bereits bei GYSI (75). Mit Hilfe zweidimensionaler geometrischer Konstruktionen bzw. dreidimensionaler Demonstrationsmodelle versuchte er alle Bewegungsarten des Unterkiefers darzustellen (75). Mittels sägeblattähnlicher, aus Blech ausgeschnittener "Haifischzähne" generierte er in einem Artikulator Urformen für die Kauflächen künstlicher Zähne (Anatoformzähne) und bewies damit die engen Zusammenhänge zwischen Unterkieferbewegungen und Kauflächenrelief (75). Er gilt als einer der Begründer des geometrisch-mathematischen Denkens in der Zahnheilkunde.

Die Methoden der darstellenden Geometrie, d.h. die Projektion räumlicher Objekte und Abläufe in eine Ebene, wurden später auch von anderen Autoren zur Untersuchung und Darstellung der Unterkiefer- bzw. Artikulatorenbewegungen angewandt (11, 37, 109, 235, 236, 253).

1950 führte BERGSTRÖM (11) Untersuchungen und Berechnungen zur Darstellung der Arcon- Condylar (Non-Arcon -) - Unterschiede mit Hilfe der analytischen Geometrie¹⁰ durch. Die damaligen mathematischen und technischen Möglichkeiten ließen die Lösung komplizierterer Gleichungssysteme noch nicht zu (11). Dennoch verdanken wir BERGSTRÖM eine einfache zweidimensionale geometrische Darstellung der Unterschiede zwischen den Bewegungen des Unterkiefers (bzw. eines Arcon-Artikulators) und eines Non-Arcon (Condylar)-Artikulators mit geraden Führungsflächen. Er erarbeitete eine Methode zur Darstellung der Größe des möglichen Fehlers in den Bewegungen eines Molarenpunktes in einem Condylar (Non-Arcon-) - Artikulator für eine Protrusionsbewegung entlang gerader Führungsflächen in der Sagittalebene. BERGSTRÖM berichtete auch über die Zusammenhänge zwischen der horizontalen Kondylenbahnneigung (HKN) und dem Bennett-Winkel (BW) (11). Er bemerkte, daß sich bei Condylar (Non-Arcon-) - Artikulatoren die effektive Größe des Bennett-Winkels in Abhängigkeit von der Kondylenbahnneigung ändert und gab auch die Gleichung der notwendigen Korrektur an.

Eine umfassende Darstellung der geometrischen Untersuchungen vor 1953 finden wir bei DERKSEN (34).

Mit Hilfe der analytischen Geometrie konstruierten 1958 DERKSEN und VAN HAERINGEN (35, 37) typische Rollkurven für die vier möglichen Artikulatorengruppen nach einer Einteilung anhand der Anordnung der Führungsflächen. Sie konnten damit beweisen, daß den unterschiedlichen Artikulorentypen unterschiedliche Bewegungen zuzuordnen sind. DERKSEN und KORENHOF (36) zeichneten die Rollkurven der Protrusionsbewegung der vier Artikulortypen mit Hilfe eines Ellipsographen auf. VILLA (249, 250) konstruierte, ebenfalls mit einem Ellipsographen die Rollkurven der protrusiven und der laterotrusiven Bewegungen des Unterkiefers bzw. eines Artikulators. BAKKER hatte schon 1936 den elliptischen Charakter der Protrusionsbewegung bei Arcon-Artikulatoren analytisch-geometrisch nachweisen können (4).

Der elliptische Charakter der Protrusionsbewegung des Unterkiefers wurde analytisch-geometrisch mittels mathematischer Gleichungen formuliert (109, 235). Dadurch konnten Rückschlüsse auf Gesetzmäßigkeiten zwischen den Führungsflächen und den Bewegungsbahnen der Zähne gezogen werden (235). Ellipsen verschiedener Höckerspitzen stellten sich in ihrer Wölbung, Länge und Neigung unterschiedlich dar. Diese Gleichungen galten nur für eine zweidimensionale Darstellung und für gerade Führungsflächen. Mit einer ähnlichen geometrischen Methode konnte bewiesen werden, daß die beiden vorderen Bögen in Gysis rhomboiden Zeichnungen der Lateralbewegungen in der Horizontalebene keine Kreisbögen, sondern Teile von Ellipsen sind (236).

1964 beschrieb HJORTSJÖ (84) mathematisch die Grundbewegungsarten des Unterkiefers . Er benannte drei Translationen (Verschiebungen) und drei Rotationen (Drehbewegungen) jeweils entlang der bzw. um die drei Hauptachsen des Körpers

¹⁰ Analytische Geometrie: Teilgebiet der Mathematik, in dem man sich mit der zahlenmäßigen Beschreibung von Eigenschaften geometrischer Figuren beschäftigt. Mit Hilfe eines Koordinatensystems ordnet man jedem Punkt ein Zahlenpaar (ebene analytische Geometrie) oder ein Zahlentripel (räumliche Analytische Geometrie) zu (200).

(vertikal, sagittal und transversal). Er wies auf die sechs möglichen Freiheitsgrade der räumlichen Bewegungen des Unterkiefers hin. Er war der erste, der die mathematische Fachsprache, die korrekten mathematischen Ausdrücke (Termini technici), die für die mathematische Beschreibung komplexer räumlicher Bewegungen notwendig sind, in die zahnmedizinische Literatur einführte. Dadurch ermöglichte er Zahnarzt und Mathematiker, sich miteinander zu verständigen.

MORITA et al. (163) überprüften geometrisch die Validität eines getrennt für Arcon- und Non-Arcon-Artikulatoren erstellten zweidimensionalen mathematischen Modells der Protrusionsbewegung. Sie konnten mit Hilfe von Bewegungsaufzeichnungen in je einem Arcon- und einem Non-Arcon-Artikulator seine Gültigkeit nachweisen. Mittels ähnlicher mathematischer Modelle wurden auch die Auswirkungen einer fehlerhaften Achsenlokalisation bzw. Achsenübertragung (203, 204, 205, 220) sowie der Einfluß der Bewegungen des Laterotrusions- und des Mediotrusionskondylus auf die Okklusalfäche der Zähne untersucht (128, 193, 194, 195, 203, 220).

HOBO und TAKAYAMA (90, 92, 237) untersuchten die Kinematik der Bewegungen des Unterkiefers mit Hilfe einer dreidimensionalen analytisch-geometrischen Methode, die auf dem EULER'schen Drehwinkel¹¹ basierte. Sie verwendeten ein dreidimensionales kartesisches Koordinatensystem mit unterschiedlichen Mittelpunkten für die Berechnung der Protrusion (Mittelpunkt der Scharnierachse) sowie der Laterotrusion (Kondylenmitte auf der Laterotrusionsseite) und formulierten die Gleichungen einer Protrusion und einer Laterotrusion bei geraden Führungsflächen. Die errechnete Genauigkeit des mathematischen Verfahrens lag in der Größenordnung von 0,033 mm bzw. 0,8° (237).

Mit ähnlichen Methoden der analytischen Geometrie erarbeitete KATONA (104) 1991 ein zweidimensionales mathematisches Modell der mandibulären Protrusion bei geraden Führungsflächen. Dieses ermöglichte die Berechnung der Größe der Drehbewegung (Winkel T), die der Unterkiefer bei unterschiedlicher Neigung der kondylären und inzisalen Führungsflächen erfährt. Er erstellte 1992 ein zweidimensionales mathematisches Modell für das okklusale Einschleifen in retraler Kontaktposition und 1993 ein dreidimensionales mathematisches Modell für den Stuart-Pantographen (105, 106). Bei letzterem Modell wurden die Bewegungen des Unterkiefers als Rotationen um die drei Koordinatenachsen und Translationen entlang der Koordinatenachsen definiert und durch Vektor-Transformationen dreidimensional errechnet. Auch KATONA ist die dreidimensionale mathematische Darstellung der komplizierten räumlichen Bewegungen nur durch Vereinfachungen in der Fragestellung gelungen. Er bemerkte, daß andere Bewegungen als eine einfache Rotation um die Scharnierachse oder eine einfache Protrusion, komplexe dreidimensionale mathematische Derivationen erfordern (106).

Ein anderes Vorgehen wählte SLAVICEK (216) für seine mathematischen Untersuchungen der natürlichen Unterkieferbewegungen. Er entnahm die Information der Gelenkbahnen aus axiographischen Aufzeichnungen und die Information der Inzisalführung aus Sagittalschnitten von Silikonabdrücken der Frontzähne. Er berechnete zweidimensional die Protrusionsbewegung eines Molarenpunktes sowie die Protrusionsbewegung der Inzisalstiftspitze, beide Punkte

¹¹ Der EULER'sche Drehwinkel beschreibt die Drehungen um die x-, y-, und z- Achsen, die notwendig sind, um zwei rechtwinklige Koordinatensysteme gleichen Ursprunges zur Deckung zu bringen (57).

geführt von den Kondylenpunkten und dem Schneidezahnpunkt, die ihrerseits entlang der vorgegebenen Führungsflächen bewegt wurden. Mit dieser Methode konnte er zwar nur zweidimensional, aber mit "gewölbten" Führungsflächen arbeiten.

Ab Mitte der siebziger Jahre wurden Computer zur Erstellung und Berechnung komplexer zwei- und dreidimensionaler mathematischer Modelle für die Simulation natürlicher (Unterkiefer-) sowie künstlicher (Artikulatoren-) Bewegungen (83, 87, 88, 92, 104, 105, 106, 163, 171, 183, 191, 192, 203, 204, 205, 216, 220, 237) eingesetzt. Dieses Hilfsmittel ermöglicht die schnelle Durchführung umfangreicher und komplexer Berechnungen. Durch ein computerunterstütztes mathematisches Verfahren konnte aus den Daten registrierter Kondylenbewegungen und der notwendigen Disklusion die erforderliche Inzisalführung errechnet werden (90, 92, 145). Mit Hilfe des Computers konnten bewegliche Bildsequenzen einer zweidimensionalen Protrusion entlang vorberechneter gerader und gewölbter Führungsflächen mathematisch simuliert und dargestellt werden (233), eine zweidimensionale Darstellung der Unterschiede der Protrusionsbewegung unterschiedlicher Artikulatoren-Typen gegeben (234) und typische Rollkurven der Protrusionsbewegung aufgezeichnet werden (234).

Die von elektronischen Registrierverfahren gelieferten Meßdaten werden u.a. auch zur Ansteuerung von Roboterartikulatoren und dadurch zur Untersuchung natürlicher Kaubewegungen verwendet (41, 43, 44). Damit künftig alle Wiedergabesysteme (z.B. Roboterartikulatoren) die Informationen aller Registriersysteme direkt verwerten können, stellten EDINGER und KLETT (44) einen Vorschlag zur Datennormierung bei der Anwendung verschiedener Registrier- und Wiedergabesysteme vor. Diese sollen auch den Rahmen aller zukünftigen Bewegungsuntersuchungen bilden:

- eine digitale Datenangabe,
- 1/100 mm als Einheit der Streckenmessungen,
- die Erfassung von mindestens drei verschiedenen Punkten des Unterkiefers (zwei Kondylenpunkte, ein Inzisalpunkt),
- ein einheitliches dreidimensionales Koordinatensystem für alle drei Hauptpunkte mit dem Mittelpunkt auf der Scharnierachse (im Mittelpunkt einer der Kondylarkugeln oder in der Mitte der Scharnierachse) und mit der positiven Richtung entsprechend der vorherrschenden Bewegungsrichtung:
 - X-Koordinate transversal, positiv nach medial,
 - Y-Koordinate sagittal, positiv nach ventral und
 - Z-Koordinate vertikal, positiv nach kaudal
- und Erfassen aller 6 Freiheitsgrade der Bewegungen des Unterkiefers.

Die Rolle der Einstellparameter bei der Bestimmung der Unterkiefer- bzw. Artikulatorbewegungen und dadurch des Kauflächenreliefs wurde u.a. mit Hilfe empirischer Beobachtungen (77, 107), mittels mechanischer Hilfsmittel wie z.B. der sogenannte "Höckerschreiber" (209, 210), durch Aufzeichnung der Bewegungen direkt im Artikulator (3, 9, 28, 147, 181, 251), mittels mathematischer Modelle (83, 153, 204, 205, 253) und mit Hilfe mathematischer Verfahren kombiniert mit einer Computersimulation (191, 192, 233) untersucht.

Der sogenannte "Höcker-Schreiber" (cusp-writer) ist ein zweidimensionales geometrisches Modell des stomatognathen Systems, mit welchem der Einfluß verschiedener Einstellungen der Gelenk- und Inzisalführung auf die Höckerbahnen untersucht und demonstriert werden konnte (209, 210). ROEDEMA et al. (191, 192) präsentierten 1978 eine elektronische Variante des "Höcker-Schreibers", ein Computerprogramm zur zweidimensionalen Darstellung des Effektes unterschiedlicher Parametereinstellungen auf die Bahn okklusaler Punkte in den drei Hauptebenen des Raumes.

Eine zwar nur zweidimensionale Darstellung, aber eine direkte räumliche Beobachtung des Effektes unterschiedlicher Parametereinstellungen auf die Kaufläche ermöglicht die Montage von Schreibflächen und Schreibspitzen direkt im Artikulator in der Gegend der Kaufläche. Mit dieser Methode wurde die Auswirkung von Parametereinstellungen in allen drei Raumebenen graphisch untersucht (3, 9, 28, 147, 181, 251). Die Aufzeichnungen wurden entweder in der Originalform (3) oder photographisch vergrößert (9, 28, 147, 181, 251) ausgewertet.

Die Ablesegenauigkeit der Methode der graphischen Aufzeichnung beträgt nach BELLANTI (9) maximal 0,1 mm, nach McCOY et al. (155) liegen sie zwischen 0,14 und 0,36 mm. Nach KLETT und LÜCKERATH (113), LePERA (137) sowie OHLROGGE (169) ist darauf zu achten, daß die ebene Projektion räumlicher Bewegungsabläufe stets mit nachteiligen Projektionsphänomenen verbunden ist, die die Genauigkeit der Methode stark herabsetzen. Demnach können die Bewegungsaufzeichnungen im Artikulator nur die grobe Richtung, aber nie das genaue Maß des Einflusses von Parametereinstellungen vermitteln.

Durch eine mathematische Berechnung der Bewegungen punktförmiger Objekte lassen sich diese nachteiligen Effekte der Projektionsfehler umgehen (83, 153, 204, 205). TAKAYAMA und HOBBO (237) konnten mittels eines mathematischen Verfahrens zur Untersuchung von Unterkieferbewegungen eine Genauigkeit von ca. 0,033 mm erreichen.