2 Literaturübersicht

2.1 Anatomie

2.1.1 Orofaziales System

Das gesunde orofaziale System ist von vielen Autoren beschrieben worden. [20,15,28] Es besteht aus den Zähnen mit dem dazugehörigem Zahnhalteapparat, Ober – und Unterkiefer, Kiefergelenken, mandibulärer Muskulatur, Lippen-, Wangen- und Zungenmuskulatur, Mundhöhle mit Mundschleimhaut und umgebenden Weichgeweben, Speicheldrüsen sowie versorgenden Blut- und Lymphgefäßen und Nerven. [121] Diese Strukturen reagieren in der Orthofunktion nichtpathologisch auf die ausgeführte Funktion, während in der Pathofunktion morphofunktionelle Disharmonie zu pathologischen Reaktionen führen kann. [66]

2.1.2 Das Kiefergelenk

Das Kiefergelenk ist funktionell eine Einheit, das aus dem rechten und linken Kiefergelenk besteht. [28] Durch die Verbindung des Unterkiefers hat die Bewegung in einem Kiefergelenk immer Auswirkung auf das andere Kiefergelenk. [47] Das einzelne Kiefergelenk besteht aus einem unteren, disko-mandibulären und einem oberen disko-temporären Gelenkteil, die durch eine faserknorpelige Gelenkpfanne, dem Discus articularis, in zwei Kammern getrennt werden.[134] Der Discus articularis hat einen posterioren und anterioren Anteil, die durch eine Verdünnung in der Mitte des Discus articularis zustande kommen. Dadurch sitzt der Discus articularis dem Kondylarköpfchen wie eine Kappe auf [74,41] In maximaler Interkuspidation wird das Gelenk nicht druckbelastet, da die Kaukraft vom Unterkiefer über die Zahnbögen auf die Strebepfeiler des Schädels zum Schädeldach abgeleitet werden. [122] Das Kiefergelenk ist ein Dreh-/Gleitgelenk, wobei die

Drehbewegung (Rotation) einer Scharnierbewegung gleichkommt und die Gleitbewegung (Translation) einer Schiebebewegung. Die Rotation findet im disko-mandibulären Teil, die Translation im diskotemporären Teil des Gelenkes statt [28,
134, 74] Aus der maximalen Interkuspidation heraus kommt es bei einer Mundöffnung zunächst zu einer überwiegenden Rotation, obgleich auch Translation festzustellen ist. Im weiteren Verlauf der Öffnung nimmt die Translation zu, wobei auch immer eine Rotationskomponente festzustellen ist. [13]

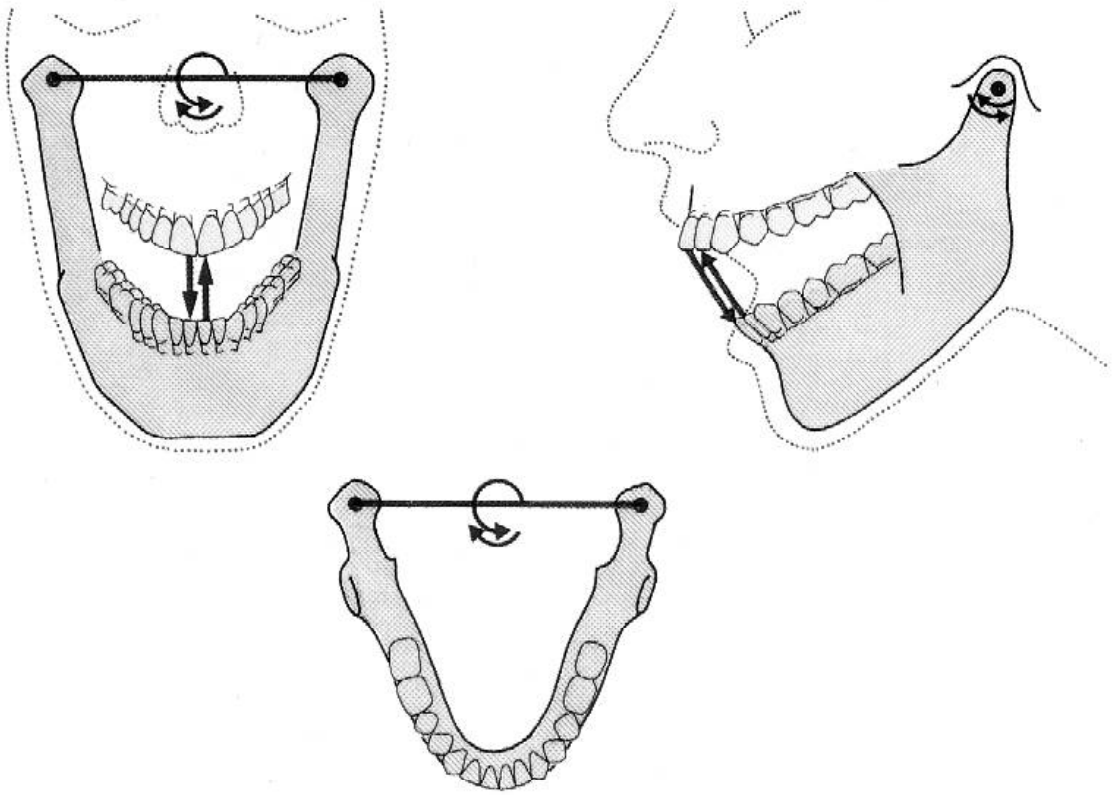

Abbildung 1
Rotation während der initialen Öffnungsphase nach REUSCH [105]

Der Diskus-Konylus-Komplex bleibt dabei stabil und gewährleistet die Artikulation in den beiden Gelenkkammern. Das Kiefergelenk kann in allen 3 Ebenen Bewegungen ausführen, begrenzt wird es dabei von den Grenzbewegungen, die widerum von den Strukturen des stomatognathen Systems vorgegeben sind.

POSSELT [99] beschrieb diese dreidimensionalen Grenzbewegungen des Unterkiefers erstmals in dem nach ihm benannten Diagramm.

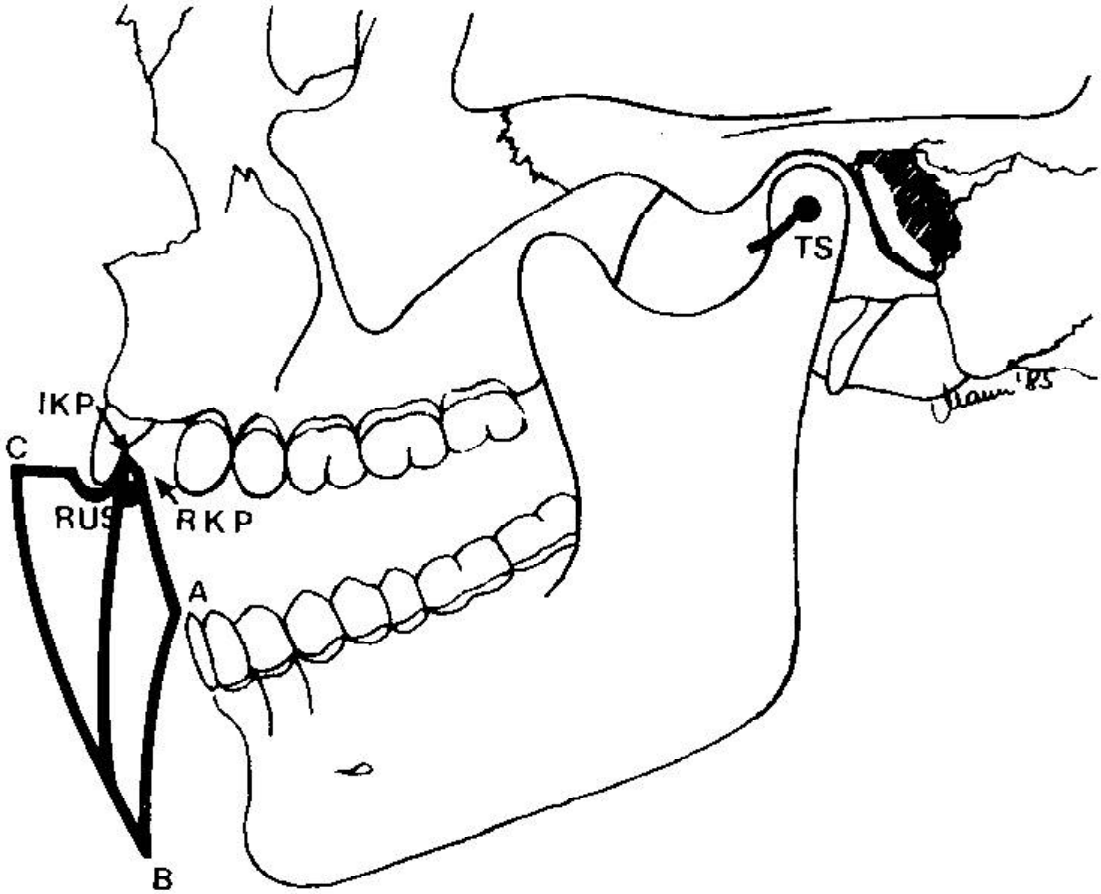

Abbildung 2

Das Posselt Diagramm: Grenzbewegungen in der Sagittalen modifiziert nach LOTZMANN[74]

2.2 Funktion

2.2.1 Zentrische Kondylenposition

Die zentrische Kondylenposition ist die kranio-ventrale, nicht seitenverschobene Position beider Kondylen bei physiologischer Kondylus-Diskus-Relation und physiologischer Belastung der beteiligten Gewebe. [18] Bei der Auffindung der zentrischen Konylenposition ist man von früheren Dorsalmanipulationen, wobei die Kondylen mit Druck in eine retrokraniale Grenzposition gezwungen werden, abgegangen. [13]

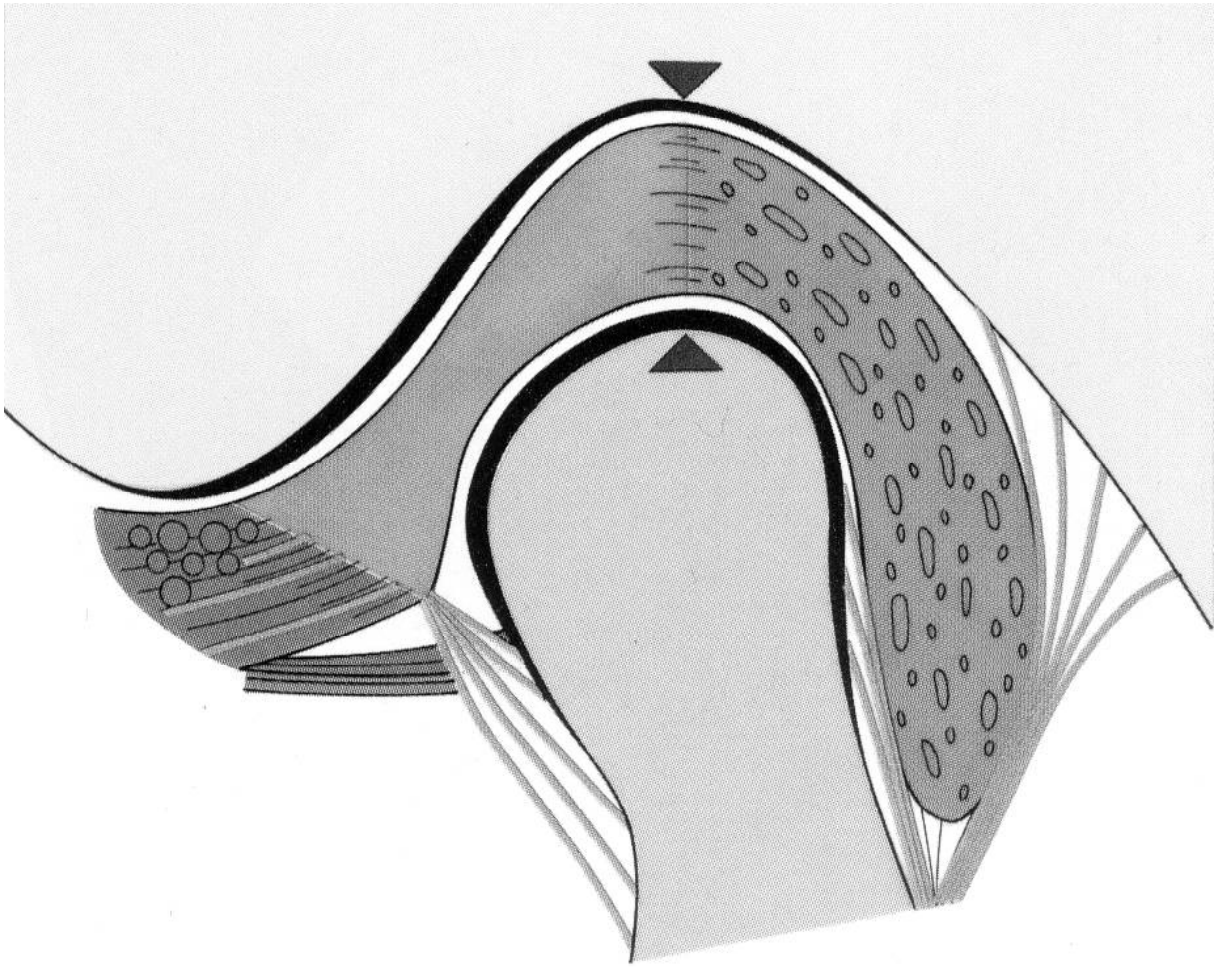

Abbildung 3
Die zentrische Kondylenposition in der Sagittalen nach REUSCH [105]

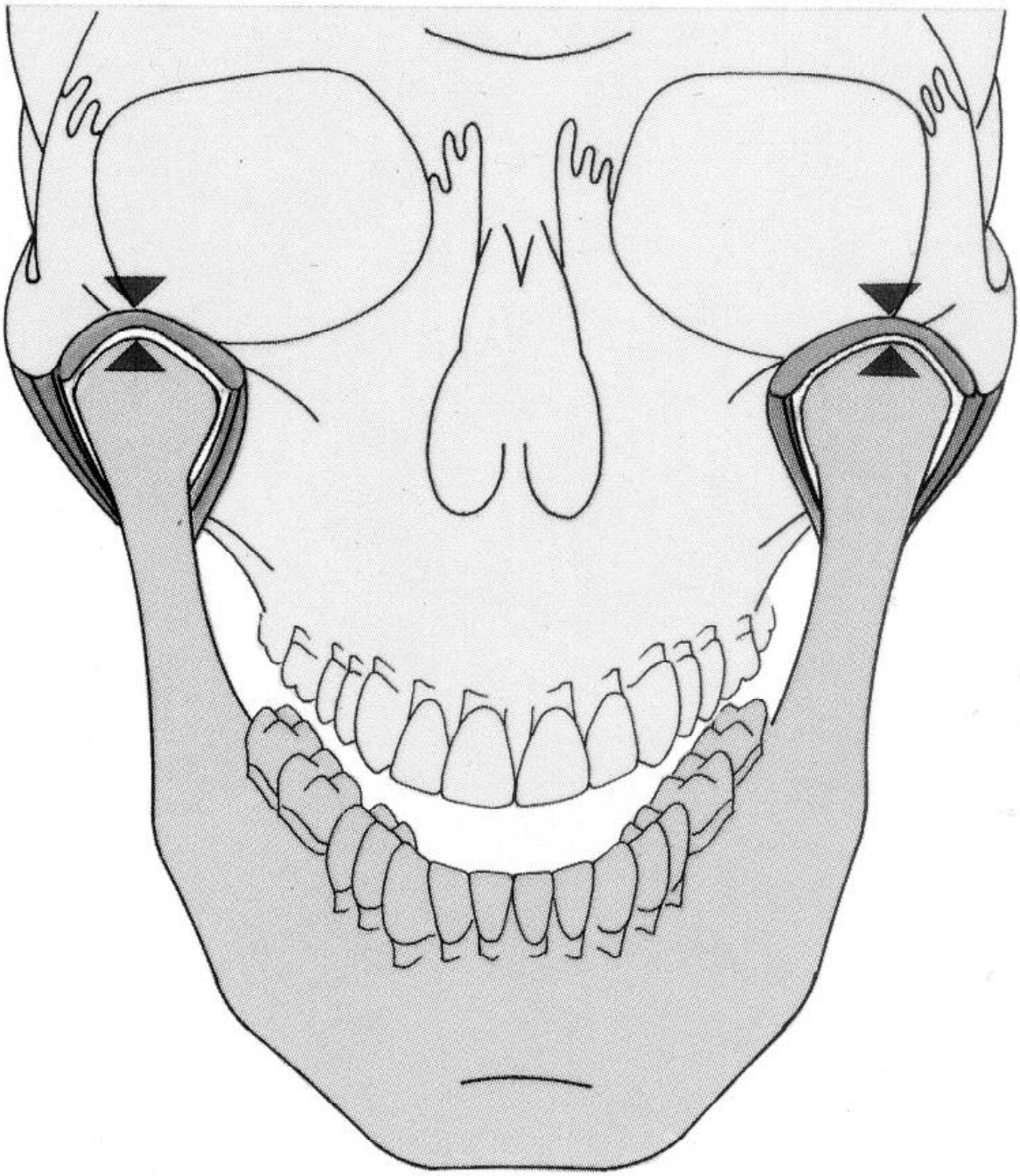

Abbildung 4

Die zentrische Kondylenposition in der Frontalen nach REUSCH [105]

SCHINDLER u.a. bezeichneten die retrale Kontaktposition als unphysiologisch, aus der heraus nur mit aktiver Unterstützung größere Öffnungsbewegungen stattfinden können. [107] LAURITZEN [70] beschrieb die nach ihm benannte Grifftechnik, die die Kondylen ebenfalls dorsal positionierte. DAWSON [17] manipulierte die Mandibula mit dem nach ihm benannten Griff mit sanftem Druck nach kraniodorsal. Dorsal gerichteten Positionierungen des Kondylenköpfchen ist gemeinsam, dass es bei anhaltender dorsaler und dorsokranialer Belastung der bilaminären Zone zu Fibrosierungen und reflektorischer myogener Hyperaktivität und Schmerzen kommen kann. [27,53] Eher passive Grifftechniken wie die Drei-Finger-Technik und Kinnführungstechnik ermöglichen es dem Behandler, die Kondylenköpfchen unforciert in die zentrische Relation zu führen, die der Patient aktiv einnehmen können muß. [9, 13, 104] KORDASS und HUGGER führten zur Überprüfung der zentrischen Positionierung die Kernspintomographie mit ihrem bildgebenden Verfahren an. [60] HILBE u.a. gingen bei einer rein muskelgeführten Positionierung, wie sie LUNDEEN [80] beschreiben, davon aus, dass der Kondylus durch die aus der muskelaktiven Schließbewegung resultierenden Kraft der Unterkieferlevatoren der Kondylenbahn anterior und superior angenähert wird.[43] KUBEIN u.a. fanden einen Positionsbereich am Os Temporale, in dem der Kondylus durch die Summation der Krafteinwirkungen eine einzige, eindeutige Fixierung findet. Diese liegt nicht im Zenith der Fossa, sondern in dem Übergang der Fossa zur Protuberantia. [68]

2.2.2 Scharnierachse

Die Zentrische Scharnierachse ist die in zentrischer Kondylenposition bestimmte gedachte horizontale Scharnierachse durch die beiden Kondylenköpfchen. [18] Die terminale Scharnierachse wird nach LAURITZEN in der retralen Grenzposition bestimmt [70], sie weicht von der zentrischen nach retral ab. [69,85] Der Unterkiefer kann um die zentrische Scharnierachse in der initialen Mundöffnungsphase ca. 25 mm rotieren, ohne dass die Kondylen die zentrische Kondylenposition verlassen. [46]

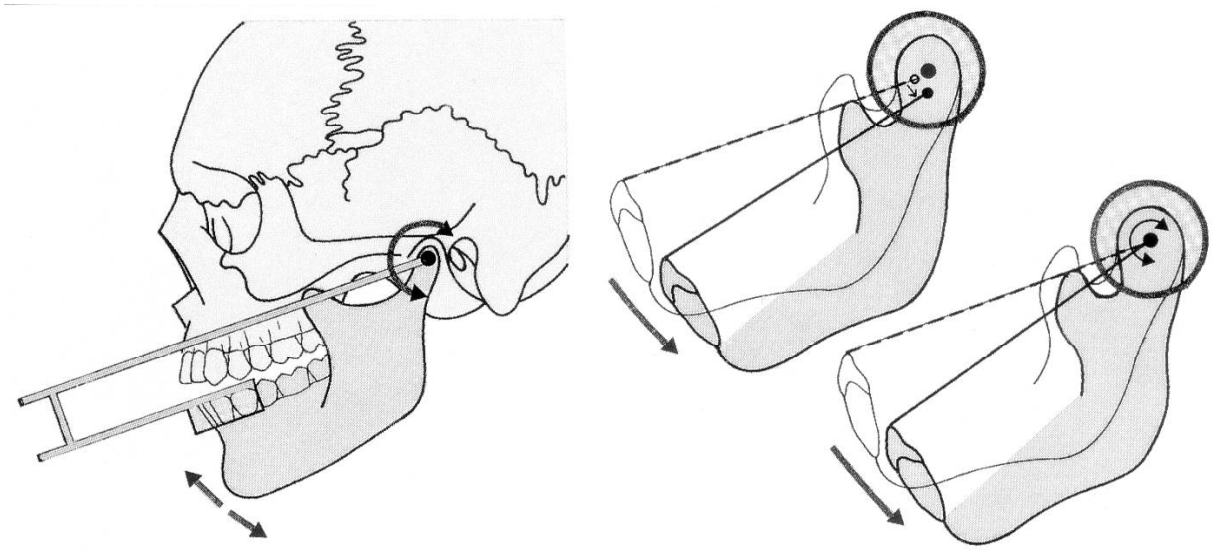

Abbildung 5
Die Lokalisation der Scharnierachse:
Nur wenn sich der Achszeiger im Rotationszentrum der Scharnierachse befindet, kommt es bei einer Öffnungsbewegung zu einer einer reinen Rotation des Achszeigers. Nach REUSCH [105]

Bei der Bestimmung des terminalen Scharnierachspunktes kommt es zu Abweichungen je nach Registrierverfahren: 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 des USR-Systems von Edinger die unterschiedliche

Scharnierachsenposition von zentrischen Kieferrelationsbestimmungen in Abhängigkeit vom Verfahren zur Kieferrelationsbestimmung nach. [2] UTZ u.a. stellten Abweichungen von 11mm in der x-Richtung und 4 mm in der y-Richtung fest. [126] 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] PRÖSCHEL u.a. postulierten aus der häufigen Bahnabweichung von Protrusions- und Öffnungsbahnen, dass es keinen einheitlichen Scharnierachspunkt geben kann, der nur mit einer Grifftechnik während der Öffnungsbewegung ermittelt wird und auch für die Protrusion als Rotationszentrum gelten kann. Sie führten die Abweichungen der Protrusions- und Öffnungsbahnen auf die Morphologie des Kondylus zurück, der in keinem Fall sich wie eine rotierende Kugel um eine Mittelachse verhält, sondern eher wie ein drehend-rollendes Rad. Daraus resultiert eine unterschiedliche Bahnschreibung des „Scharnierachspunktes“, abhängig von der Bewegung zur Bestimmung von diesem. Aus der elektronischen Auswertung vieler Protrusions- und Öffnungsbahnen ermittelten sie ein kinematisches Zentrum, aus dem heraus Protrusions- und Öffnungsbahnen auf derselben Bahn verlaufen. [100] Der arbiträre Scharnierachspunkt ist eine Mittelwertannahme, in dessen Radius sich die realen Scharnierachspunkte zu hoher Wahrscheinlichkeit befinden. Dabei liegen die arbiträren Scharnierachspunkte je nach Autor zwischen 1 % und 95 % in einem 5mm Umkreis um den realen Scharnierachspunkt. UTZ gab als Referenzwerte für die Bestimmung des arbiträren Scharnierachspunktes folgende Werte an, die er aus der Untersuchung von 121 Probanden ermittelt hatte: 11 mm ventral auf der Verbindungslinie Mitte Tragus – äußerer Augenwinkel und 3mm cranial davon. [126] REIBER u.a. gaben eine Trefferquote von 90 % im 5mm-Radius für folgenden Punkt an: 3mm hinter dem lateralen Kondylenpol auf einer Geraden Lateraler Kondylenpol – Infraorbitalpunkt und 6mm rechtwinklig davon cranial. [101] UTZ stellte Trefferquoten arbiträrer und realer

Scharnierachspunkte verschiedener Autoren gegenüber: 8 % für die Ermittlung mit Quick-Mount-Ohrbögen, 62 % - 75 % für die Ermittlung über den Punkt, der sich 11 mm ventral auf der Verbindungslinie Mitte Tragus – äußerer Augenwinkel und 3mm cranial davon befindet, 91 % für die Ermittlung über den Punkt, der sich 3mm hinter dem lateralen Kondylenpol auf einer Geraden Lateraler Kondylenpol – Infraorbitalpunkt und 6mm rechtwinklig davon cranial befindet. [128].

2.2.3 Achsorbitalebene

Die Schädelbezugsebene, die durch die zentrischen Scharnierachspunkte und dem knöchernen Unterrand der Orbita beschrieben wird, ist die Achsorbitalebene. [114, 44] Je nachdem welche Schädelbezugsebene ausgewählt wird, unterscheiden sich die Werte für die Kondylenbahnneigungswinkel in der Sagittalen und Horizontalen Ebene. (Frankfurter Horizontale, Camper´sche Ebene) [72] [114] [74]

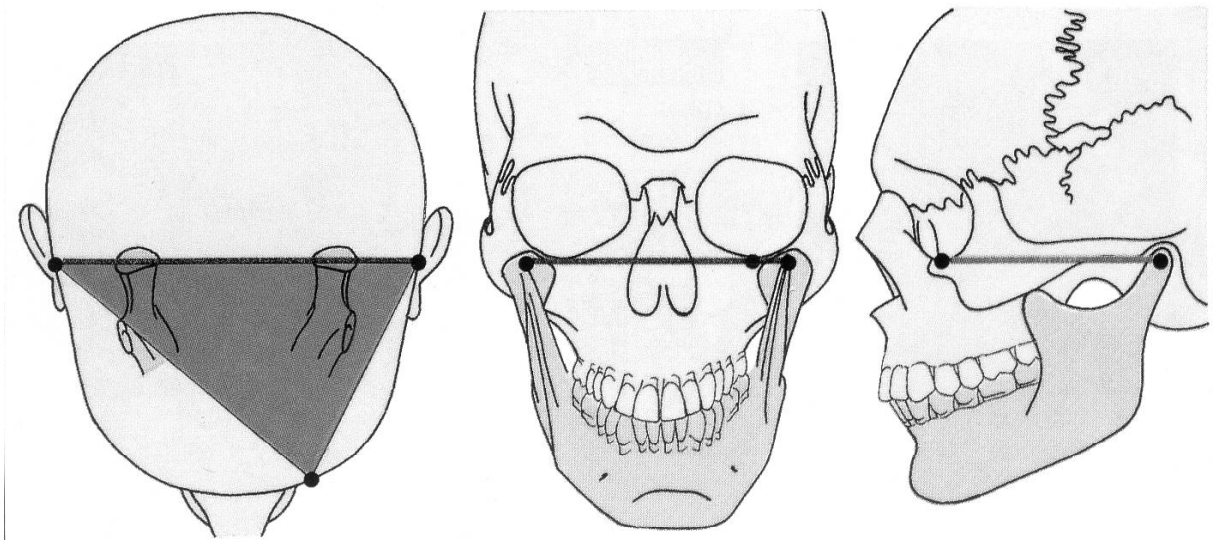

Abbildung 6

Die Achsorbitalebene nach REUSCH [105]

2.2.4 Sagittale Kondylenbahn

Die Kondylenbahn ist eine dreidimensionale Bewegungsbahn des Kondylus im schädelbezogenen Koordinatensystem. [18] Folglich ist die sagittale Kondylenbahn die auf die sagittale Bezugsebene projizierte Kondylenbahn.. [74]

2.2.4.1 Sagittaler Kondylenbahnwinkel

Der Sagittale Kondylenbahnwinkel **(SKN)** ist der Winkel zwischen der Geraden zweier Punkte der Sagittalen Kondylenbahn und einer Referenzgeraden einer Schädelbezugsebene. (Camper´sche Ebene, Frankfurter Horizontale, Achs-Orbital-Ebene) [74] Die Sagittale Kondylenbahn ist dabei die Bahn, die der Scharnierachspunkt durchläuft. [74] Ausgangspunkt der Geraden ist die zentrische Scharnierachse oder die Scharnierachsenstellung in maximaler Interkuspidation.[13, 67]] Der ventrale Punkt ist je nach Artikulatorsystem unterschiedlich. Die SAM® -Artikulatoren (Schulartikulator München, SLAVICEK und MACK 1979 [117]) arbeiten mit einem Punkt, der nach 10 mm der Kondylenbahn abgelesen wird, während hingegen andere wie die REFERENCE®- Artikulatoren (REUSCH und FEYEN 1993 [106]) und der PROTAR® (SCHULZ und WINZEN 1995 [108]) nach 5mm ablesen.

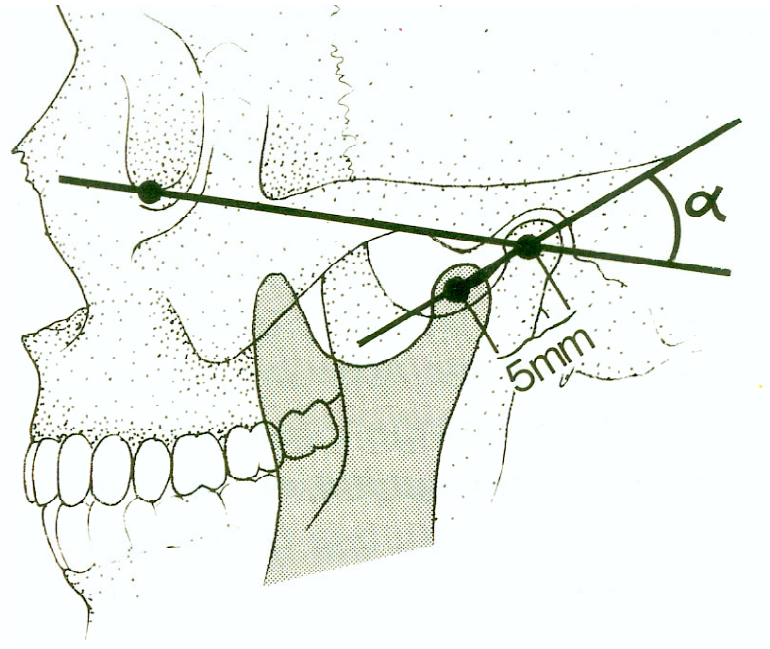

Abbildung 7
Der sagittale Kondylenbahnwinkel nach LOTZMANN [74]

2.2.5 Laterale Unterkieferbewegungen

2.2.5.1 Bennettbewegung

Die Bennettbewegung ist ein seitliches Versetzen des Laterotrusionskondylus während einer Laterotrusionsbewegung des Unterkiefers. [18] Man unterscheidet dabei die „Immediate Side Shift“ von der „Early side Shift“ und der „Progressive Side Shift“. Während man unter der „Immediate Side Shift“ den Versatz des unmittelbar nach Verlassen des Balancekondylus aus der zentrischen Relation versteht, betrachtet man bei „Early side Shift“ den Versatz des Laterotrusionskondylus auf den ersten 4mm der Mediotrusionsbewegung des Balancekondylus in der Horizontalebene.Die „Progressive Side Shift“ ist eine Betrachtung in der Frontalebene [34] Der Arbeitskondylus kann dabei eine reine Rotation, eine Laterotrusion, eine Latero-Retrusion, eine Latero-Protrusion, eine Latero-Detrusion oder auch eine

Latero-Surtrusion durchführen in der Horizontal- bzw. Frontalebene. [13, 74, 44]

2.2.5.2 Bennettwinkel

Der Bennettwinkel **(TKN = Transversale Kondylenbahnneigung)** ist ein in der Horizontalebene gemessener Winkel zwischen der Sagittalrichtung und der Verbindungslinie vom Startpunkt zu einem jeweiligen Punkt auf der Mediotrusionsbahn des Kondylus. [18, 44] Die Position des entfernteren Punktes richtet sich nach dem jeweiligen Artikulatorsystem oder Auswertungssystems.

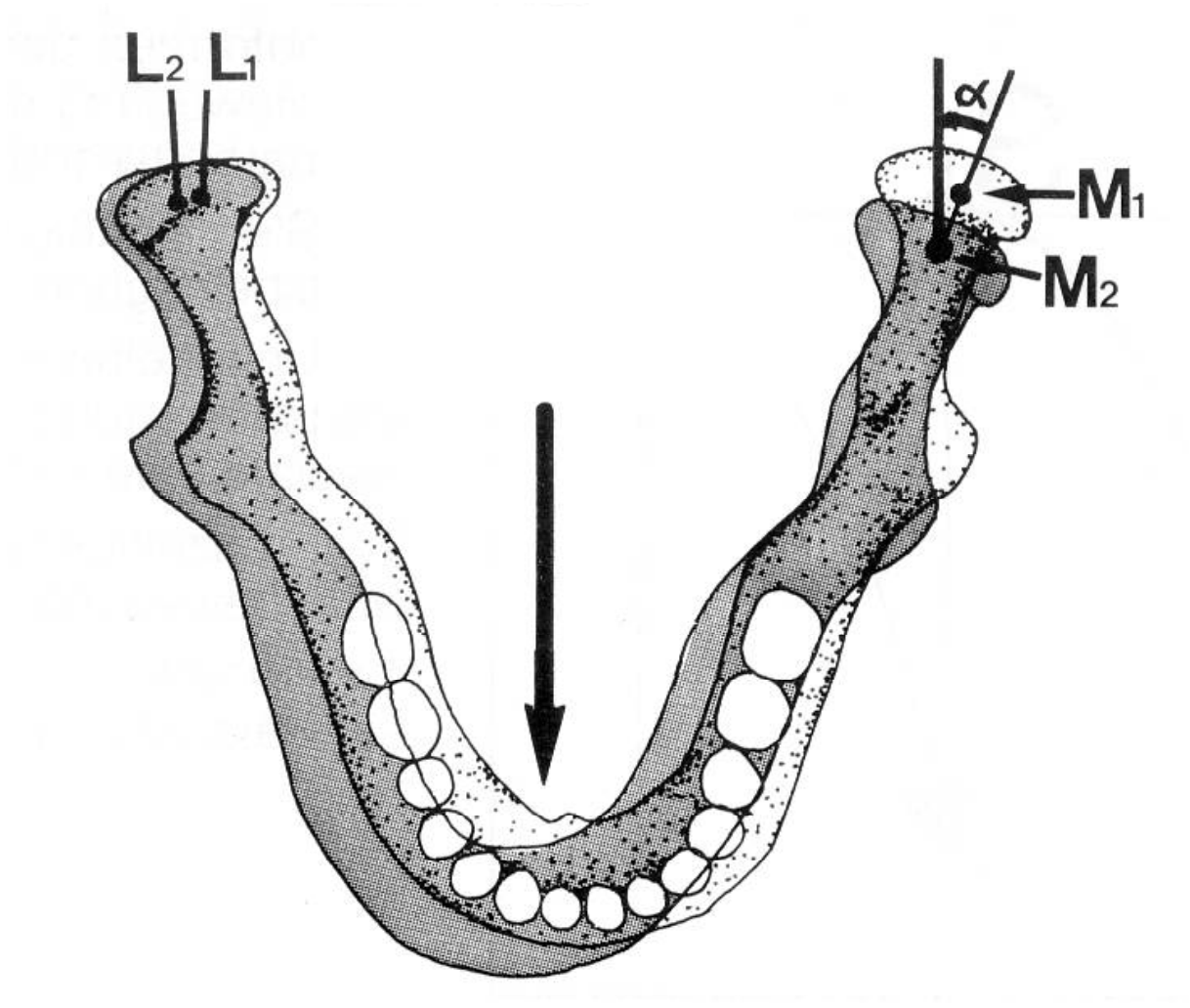

Abbildung 8
Der Bennettwinkel nach LOTZMANN [74

2.3 Funktionsanalyse

Die Funktionsanalyse ist die Grundlage der Diagnostik und Basis der Therapieentscheidung. Je nach Betrachter gliedert sie sich in einen klinischen und apparativen Teil bzw. in eine Untersuchung ohne Hilfsmittel und mit Hilfsmitteln. Die Analyse baut auf den Ergebnissen der einzelnen Untersuchungen auf und unterliegt damit einer chronologischen Abfolge, um unnötige Analysegänge zu vermeiden bzw. weiterführende einzuleiten. [66, 32, 27, 95] Dabei ergibt sich folgende Abfolge:

- Klinische Funktionsanalyse
- Klinische Okklusionsanalyse
- Instrumentelle Funktionsanalyse
- Instrumentelle Okklusionsanalyse
- Röntgen und weitere bildgebende Verfahren

2.3.1 Klinische Funktionsanalyse

Das gesamte orofaziale System wird durch Betrachtung, Palpation, Provokation und Befragung auf klinisch relevante Parameter untersucht wie Schmerzempfindungen, Sensibilitäten, Aussehen, Deformationen, Mobilität und Geräusche der beteiligten Strukturen. Es existieren mehrere bewährte Befundbögen, in die die Ergebnisse eingetragen werden. [103,1,20] Screening Tests dienen der schnellen Einschätzung weiteren Analysebedarfs. [95] BUMANN und GROOT LANDEWEER beschrieben die Bedeutung der manuellen Funktionstherapie als Basis einer gewebespezifischen Diagnose.[36]

2.3.2 Instrumentelle Funktionsanalyse

Instrumentelle Hilfsmaßnahmen zur Diagnostik und Therapie sollten aus Gründen des Aufwandes und der Kosten nur zusätzlich durchgeführt werden, wenn die Diagnostik der klinischen Untersuchung keine ausreichend gesicherte Diagnose gebracht hat oder aus planerischer Sicht ein Artikulatorsystem mit den individuellen Patientendaten programmiert werden

soll zur Herstellung von Zahnersatz. Sie dienen der Erhärtung von Verdachtsdiagnosen der klinischen Funktionsdiagnostik und der Aufspürung feinerer Zusammenhänge, die bei der klinischen Analyse nicht feststellbar waren. Ihr Hauptvorteil liegt in der Veranschaulichung komplexer Bewegungsabläufe und der Speicherbarkeit, Dokumentation und Vergleichbarkeit der Daten. Sie sollten jedoch nie ohne die Befunde der klinischen Analyse betrachtet werden[27, 95, 112, 87, 23, 13, 96] Die instrumentelle Funktionsanalyse dient mittels Achsiographie, Pantographie, Bogenübertragungen der Programmierung von Artikulatoren mit metrischen Daten wie dem sagittalen Kondylenbahnwinkel, dem Bennettwinkel und aber auch zur therapeutischen Einstellung von Kondylenpositionen in der Schienentherapie.[27, 13, 116, 23, 25] Herauszuheben für die vorliegende Arbeit sind die Pantographie und Achsiographie. Die Pantographie [90, 28] dient der Erfassung der anatomisch möglichen Grenzbewegungen durch Aufzeichnung in 6 Freiheitsgraden auf gelenknah und gelenkfern angebrachten mechanisch-graphischen Schreibplatten [STUART 1955 [91], McCOLLUM] oder elektrischen Schreibplatten [Pantronic® - Pantograph [16] nach CLAYTON 1985], die über spezielle Löffel (Clutches) und Bögen mit dem Schädel bzw. Unterkiefer verbunden sind. Über die Lokalisation der Scharnierachse und Schädelreferenzpunkten wird die Schädelbezugsebene festgelegt. Neben der Bestimmung des sagittalen Kondylenbahnwinkels, des Bennettwinkels und der Scharnierachse sind der Kondylarabstand, Bewegungsabläufe gelenkfern und die Bennettbewegung im Verlauf darstellbar. Die Achsiographie [116, 47] beschränkt sich auf die Ermittlung der Scharnierachse, der Schreibung einer Protrusion und Lateralbewegung zur Bestimmung des sagittalen Kondylenbahnwinkels, des Bennettwinkels und der scharnierachsengenauen Übertragung in den Artikulator. Über den Verlauf der aufgezeichneten Kurven sind funktionsdiagnostische Aussagen treffbar. Ist ein elektronisches System angeschlossen, sind auch Zeitparameter darstellbar.

2.4 Registriersysteme

2.4.1 Einteilung

Eine sinnvolle Einteilung der Registriersysteme ergibt sich durch die Lage ihrer Aufzeichnungsposition. Dabei unterscheidet man gelenknahe und gelenkferne Systeme. Andere Einteilungen richten sich nach historischen Gesichtspunkten oder teilen die Systeme in mechanisch – graphische, fotografische, myographische, magnetische, optische, elektronische, Ultraschall gesteuerte, berührungsfreie/ berührende, nach Bewegungsfreiheitsgraden, achsiographische, pantographische oder andersweitig gesteuerte ein. [47, 14]

2.4.1.1 Mechanisch-Graphische Verfahren

Die Registriersysteme entwickelten sich zunächst auf der Basis mechanisch – graphischer Aufzeichnung. GYSI entwickelte 1912 den Gysiregistrator, ein gelenknahes und gelenkfernes Verfahren zur Aufzeichnung von Protrusionsbahnen und Lateralbewegungen sowie zur schädelbezogenen Übertragung des Oberkiefers in den Artikulator. Gysi verband präaurikuläre Schreibfolien mit einer Stützstiftregistrierung[37,38]. McCOLLUM entwickelte 1934 den Gnathographen, der unter Zuhilfenahme eines Stützstiftes auf extraoralen Schreibplatten dreidimensionale Aufzeichnungen ermöglichte. STUART [90] entwickelte 1955 den Stuart®-Recorder, der 6 Freiheitsgrade im Raum erfaßt. Drei Freiheitsgrade sind nötig, um einen Punkt im schädelbezogenen Koordinatensystem zu definieren und für eine Geradenbeschreibung wie die Scharnierachse braucht man 6 Freiheitsgrade, um sie genau zu definieren und die Achsbewegung zeitgleich dreidimensional zu erfassen. Die Unterkieferbewegungen werden über vier achsnahe und zwei achsferne Schreibplatten gelenknah und gelenkfern aufgezeichnet. Es werden 12 Meßstrecken der Achsbewegung gleichzeitig aufgezeichnet. Mit Hilfe dieser Aufzeichnung ist es möglich, einen Artikulator individuell zu programmieren.

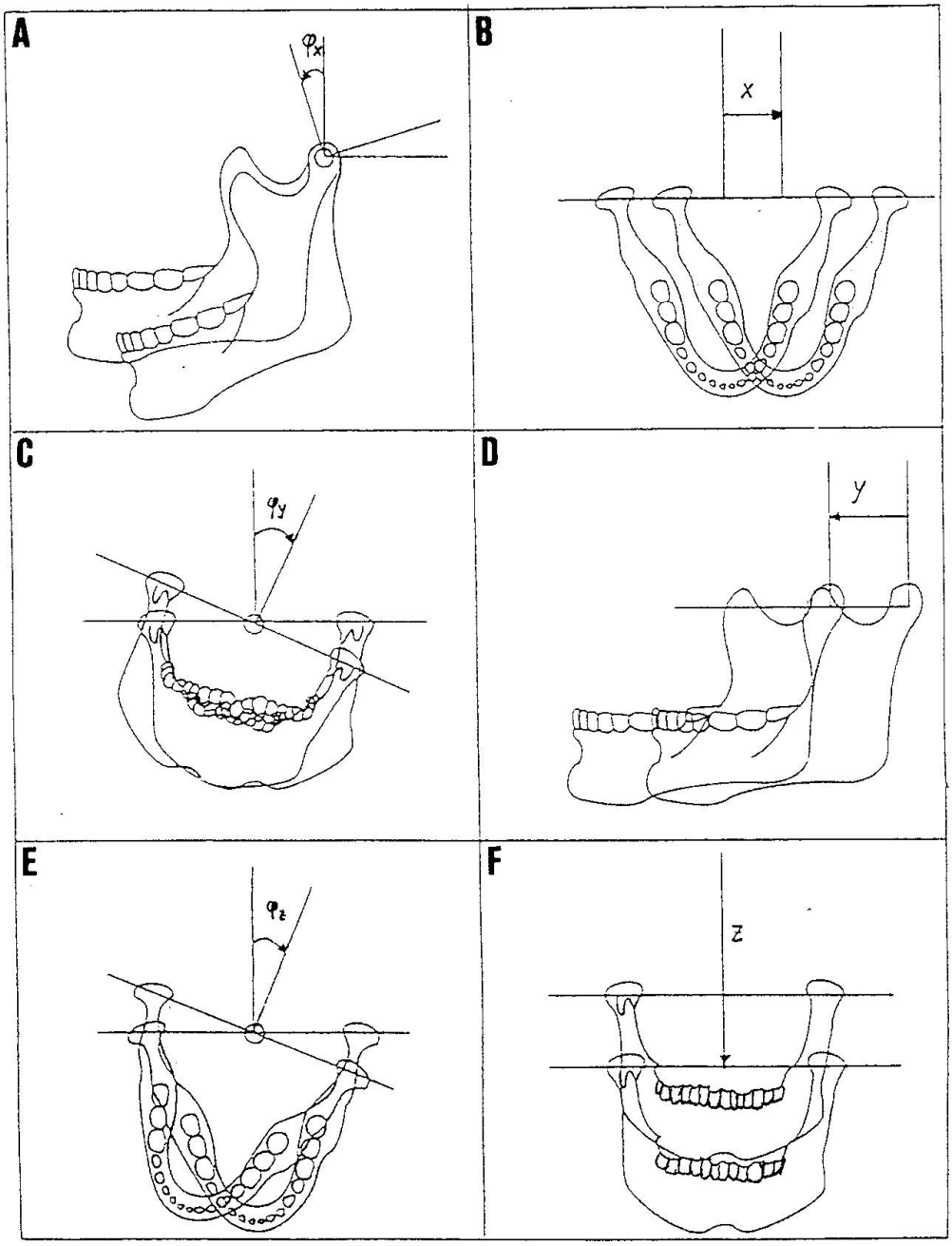

Abbildung 9

Darstellung der 6 Freiheitsgrade der Unterkieferbewegung (modifiziert nach SIEGLER u.a. 1991). Der Drehwinkel φ wird auf die x-, y- und z- Koordinate bezogen. [111]

CLAYTON konstruierte den Denar-Pantorgraphen, der über einen Stützstift geführt, Kondylarbewegungen pantographisch erfassen konnte. SWANSON (1966) und WIPF(1982) [120] nutzten die Stützstifttechnik, um mit vier Oberkiefer-Styli und einem stabilisierenden Unterkieferstützstift dreidimensionale Bewegungsbahnen in Form der Pfeilwinkelregistrate in einen langsam härtenden Kunststoff zu gravieren und dann einen Artikulator entsprechend zu programmieren. GERBER [32] (Condylator®1966) konstruierte an den Stuart-Pantographen angelehnte vereinfachte Registratur, die der möglichst genauen Programmierung von Artikulatoren dienen sollte. GERBER stellte 1970 eine Stützstiftregistratmethode vor.[33] Auf LEE geht der Quick Analyzer (PANADENT®-System) zurück, der eine Achslokalisation und die Schreibung von Protrusionsbahn sowie Angaben zu Lateralbewegungen liefert für die Artikulatorprogrammierung. Allerdings ist eine metrische Auswertung des Bennettwinkels nicht möglich. MACK und SLAVICEK(1980) entwickelten den Axiographen®. Mittels sagittal, gelenknah angebrachter Schreibflaggen kann eine Protrusion der Scharnierachse aufgezeichnet werden. Die Mediotrusion wird über mechanische Federmessuhren, die senkrecht zu den Flaggen angebracht sind, in Zahlenwerten sequentiell abgelesen. Die Bewegungsspurschreibung erfolgt durch die Übertragung der Zahlenwerte auf ein Messpapier. Das System hat keine 6 Freiheitsgrade und schreibt die Mediotrusion nicht direkt.[116] FEYEN und REUSCH entwickelten den Condylograph® innerhalb des Reference®-Systems für die Achsiographie. Im Gegensatz zum Axiographen® ist eine Schreibung der Mediotrusion möglich. Der Bennettwinkel wird mit einer Lupe fehlerkorrigiert abgelesen von der Schreibung. Durch Einschwenken der Mediotrusionsflaggen auf die Gelenkbahn werden weitere Projektionsfehler ausgeschaltet. Die Achslokalisation erfolgt über Schrauben am Unterkieferbogen.[106, 104]

2.4.1.2 Elektronische Verfahren

Elektronische Systeme nutzen verschiedene Methoden, um Signale von Apparaturen, die durch die Unterkieferbewegung sich bewegen, in elektronische Signale umzusetzen und an Rechner oder andere Apparaturen weiterzugeben zur weiteren Auswertung und Verarbeitung. Weist das System zudem 6 Freiheitsgrade auf, sind zeitechte Simulationen der Achsbewegung auf dem Computerbildschirm möglich, die auch die Geschwindigkeit darstellen. Dies ist ein Aufzeichnungsparameter, den graphische Systeme nicht bieten. [15]

2.4.1.2.1 Elektrische Verfahren

BEWERSDORFF entwickelte 1967 ein gelenkfernes elektrognathographisches System, das mit induktiven Winkelgebern, die jeweils über einen Faden mit einem Ober- und Unterkieferschneidezahn sind. Die Relativbewegungen der beiden Befestigungspunkte werden durch entsprechende Anordnung der Winkelgeber dreidimensional registriert. [8]

HENERS befestigte 1973 Drehbewegungsgeber über ein Gestänge am Ober- und Unterkiefer und setzte die elektrischen Impulse in elektronische Signale eines Kathodenstrahl-Oszillographen um. Er zeichnete zweidimensionale Posselt – Diagramme auf.[42] SCHINDLER stellte 1985 ein magnetoelektrisches gelenknahes System vor, das an einem modifizierten Axiographen® montiert war. Das System beruhte auf elektromagnetischer Strahlung und wurde an einem modifizierten Speicheroszillographen wiedergegeben. [107]

LUCKENBACH und FREESMEYER entwickelten das gelenkferne ECRS – System (Elektronisches Computergestütztes Registrier System), Handelsname Compugnath® ab 1979. Acht Drehpotentiometer und zwei Linearpotentiometer sind als Messwertgeber durch Gestänge und kartanische Gelenke mit an den oberen und unteren Schneidezähnen fixierten paraokklusalen Schienen verbunden. Spannungswerte, die die Drehpotentiometer während der Registrierung abgeben, werden im Computer in Winkelwerte umgerechnet, aus denen die Raumkoordinaten

ermittelt werden. Bezugsebene ist die Achsorbitalebene, wobei das System die Achse nicht direkt lokalisieren kann, sondern durch umfangreiche Rechenoperationen aus mehreren Öffnungs- und Schließbewegungen errechnet. Sämtliche Kondylenpositionen werden umfangreich errechnet. Mittels einer CAD/CNC – Frässtation können messdatengenaue Kunststoffboxen für die Programmierung eines Artikulators gefräst werden. [78, 79, 26] MEYER und DAL RI [82]entwickelten 1985 das SAS (ScharnierAchsSchreib-) System, das auf den Axiographen montiert wurde. Gelenknah werden zwei Widerstandsfolienflaggen montiert, die in zwei rechtwinklig aufeinanderstehenden Achsen linearisiert sind. Am Unterkieferbogen sind gelenknah zwei induktive Wegaufnehmer angebracht, die die Widerstandsfolien wie eine Messfläche treffen. Die Achslokalisation erfolgt manuell, aber unter Kontrolle, am Bildschirm. Analoge Schreibung macht eine Projektionsfehlerkorrektur mit Overlayfolien nötig, während eine Computerauswertung diese Fehler selbst behebt. Dazu ist auch die von KLETT entwickelte Software des Condylocomp einsetzbar. Das CADIAX-System (ComputerAidedDiagnosticAxisRecording) ist ein elektrisches gelenknahes Meßsystem, das 1988 an den mechanischen SAM-Axiographen angebracht wurde. Ähnlich dem SAS-System nehmen zwei sagittale Widerstandsfolienflaggen jeweils einen inkrementalen Messtaster mit je zwei Messspitzen auf. Die zwei Messspitzen ermöglichen eine Bestimmung des Öffnungswinkels der Scharnierachse u, wodurch das System die Scharnierachse selbst lokalisieren kann. Das System hat 6 Freiheitsgrade und kann Bewegungsbahnen beliebiger Punkte darstellen[115]. VOGEL (1989) nutzte die Kenntnisse von Gysis Stützstiftregistraten [37,38] aus, um kraftkontrollierte Pfeilwinkelregistrate mit seinem IPR-System zu schreiben, die funktionsdiagnostischen Aussagewert durch die computergestützte Auswertung vieler Wiederholungsregistrate zulassen. Eine dreidimensionale Bewegungsbeschreibung ist nicht möglich.[132,133]

2.4.1.2.2 Optische Systeme

GIBBS u.a. stellten 1966 das Case Gnathic Replicator-System vor. Photooptische Transducerteile, die die Unterkieferbewegung in 1/16mm Schritte aufteilen und über Motoren den Unterkiefer des Patienten in 0,25 mm-Schritten steuern. Im Computer können graphische Bilder erzeugt werden, während die gleichen Daten einen Playback-Replicator steuern können, der die Bewegungen am Modell sichtbar macht. Gelenknahe und –ferne Aufzeichnungen sind möglich.[88]BURCKHARDT stellte 1982 den Stereognathographen mit CRJM-System (Contactless Registration of Jaw Movement) vor. Drei übereinanderliegende optoelektronische Empfänger erfassen dreidimensional, berührungslos und in 6 Freiheitsgraden die Scharnierachsbewegungen in gelenknahen Boxen. Das Softwareprogramm SGG korrigiert Projektionsfehler und stellt in Echtzeit oder in Zeitlupe die Bewegungen auf dem Monitor dar. Mit dem CPS (Condylen-Positions-Simulator), einem Artikulator, sind mit Hilfe der eingeblendeten Bildschirmkurven die Modelle des Patienten entsprechend der patientenspezifischen Bewegungsbahnen bewegbar. [15] OHLROGGE entwickelte 1982 den Pantoscop® auf optoelektronischer Grundlage. Die Unterkieferbewegungen werden über einen Bogen, an dessen Enden optoelektronische Elemente sitzen, berührungslos und gelenknah übertragen und einer Auswertung per Computer zugeführt. [88] KLETT [55] stellte 1982 den optoelektronischen String-LR-Recorder vor. Das berührungslose, gelenknahe Registrierverfahren ist in der Lage, über von den Messsensoren ausgestrahlte, reflektierte und wiederempfangene Lichtsignale lichtintensitäts- und entfernungsabhängige Spannungsmomente zu erzeugen, die im LR-Recorder ausgewertet werden. Damit ist auch eine Achslokalisation durch das System gelenknah möglich. 1992 folgte das weiterentwickelte Modell, der String®-Condylocomp-LR 3.

2.4.1.2.3 Ultraschallverfahren

Ultraschall ist ein geeignetes Medium, um über Sender und Empfänger Ortsveränderungen in diesem System zu erfassen und über ein geeignetes Auswertungsprogramm zu anschaulichen Daten umzuwandeln. HANSEN [39] entwickelte 1983 ein Ultraschall-Laufzeit-Meßverfahren für Ganganalysen im Kniebereich. HÄRING [40]wandte 1986 diese Technik an, um mit an Schläfen, Stirn und Unterkiefer angebrachten Sendern und 4 im Raum angebrachten Empfängern dreidimensionale Aufzeichnungen von Kiefergelenksbewegungen durchzuführen. Das Ultraschallsystem MT 1602 wurde 1980 von HANSEN [39] vorgestellt und für den Praxiseinsatz vorgesehen. Es misst über die Laufzeit von Ultraschallimpulsen die neun Abstände zwischen drei Sendern im Unterkiefergestell, das paraokklusal mit den Zähnen verbunden wird, und drei Empfängern im Kopfgestell und berechnet daraus die kartesischen Koordinaten des Senderzentrums und dessen Rotationswinkel, beides relativ zu einem schädelfesten Bezugssystem.[100] Das System emöglicht die zeitkoordinierte Darstellung eines beliebigen Punktes eines Objektes.[64] BRUNNER entwickelte den MT 1602 weiter und brachte 1997 mit dem Jaw Motion Analysis (JMA) ein anwendungsfreundliches Aufzeichnungsgerät heraus. Drei Miniatur-Schallsender im Meß- und Zeigesensor senden zu 4 Mikrofonen im Kopfteil der Apparatur Ultraschall aus, dessen Laufzeitmessung eine genaue Angabe beliebiger Punkte des Objektes durch das Auswertungsprogramm WinJaw ermöglicht. [11, 12] EDINGER stellte 1989 das USR-Ultraschallsystem vor, das über die Software ROSY einen kongruent zu den Ultraschallmessstrecken am Kopf ausgerichteten Artikulator steuern kann.[21]

2.4.1.3 Fotografische Verfahren und sonstige Verfahren

KOPP und BUMANN stellen 1989 ein **fotografisches Verfahren** vor, das gelenknah und –fern über Miniaturlämpchen Licht aussendet, dass fotografisch erfasst und über die Leuchtspuren Bewegungsabläufe wiedergibt. [59] FURUYA stellte 1984 den Saphon Visi-Trainer vor, der über zwei Leuchtdioden Unterkieferbewegungen aufzeichnen konnte. [31] EISENBURGER u.a. untersuchten 1998 Myopathien mit der **Thermographie**, die mit Infrarotkameras die Wärmeausstrahlung von Geweben wiedergibt und Aussagen über den Gewebezustand von Muskeln und Gefäßen zulässt. [22] SCHWAHN u.a. untersuchen 1998 mit einem gelenknahen **sonographischen Verfahren**, bei dem mit einem 13 MHz-Schallkopf das Kiefergelenk beschallt wurde und die Videoaufzeichnung mit einer elektronischen Software ausgewertet wurde. [109] KORDASS untersuchte mit der gelenknahen **Magnetresonanztomographie** (MRT) Bewegungsabläufe. Die Fast-MRT bietet aber nur scheinbare dynamische Bewegungsabläufe, die in Wirklichkeit sequentielle Einzelaufnahmen schnell hintereinander reiht und einen visuellen dynamischen Eindruck erzeugt. [63]
LEWIN entwickelte ein auf **magnetische Feldstrahlung** basierendes gelenkfernes System, den Sirognathographen, das durch die Entfernungsänderung mit der entsprechenden Feldstärkenänderung von am Unterkiefer befestigten Sensoren zu einem extraoral angebrachten Sensorsystem Bewegungsabläufe sichtbar werden lässt.[73] Die Aktivität der Muskulatur bei verschiedenen Funktonszuständen bzw. –abläufen lässt sich mit der **Elektromyographie** beschreiben.[92]

2.4.2 Messgenauigkeit der Systeme

JMA: HUGGER u.a. montierten das JMA-System auf einen Protar®7-Artikulator und gaben Sollwerte für den sagittalen Kondylenbahnwinkel, den

Bennettwinkel und die Neigung des Frontzahntellers vor, den das JMA-System als Istwert messen sollte. Die Istwerte weichen für den sagittalen Kondylenbahnwinkel um 1,2 ± 0,2 Grad, für den Bennettwinkel + 0,6 ± 0,5 Grad und für den Neigungswinkel am Frontzahnteller um –0,1 ± 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-System nach und erhielten 104 ± 14 Mikrometer, 129 ± 9 Mikrometer bzw. 166 ± 13 Mikrometer mittlere Längenmessabweichung.[49] Der Hersteller Zebris gibt 0,1 mm mittleren lokalen Messfehler des Messsensors und maximale Messauflösung von 0,01 mm an.[12]

Compugnath: MIURA, LUCKENBACH und FREESMEYER stellten in einem Artikulatorversuch max. Abweichungen von – 3,5 Grad bzw. 4,0 Grad für den Bennettwinkel bzw. für den sagittalen Kondylenbahnwinkel von den Sollwerten fest.(Mittelwert –0,2 Grad bzw. –1,0 Grad) [83] LUCKENBACH ermittelte die Scharnierachse am Artikulator mit ± 0,1mm und am Patienten (im Vergleich zur mechanisch bestimmten Achse) mit ±0,8mm. [79]

String-Conylocomp-LR3: HUGGER u.a. erhielten in einem Artikulatorversuch Abweichungen von max 2 Grad bzw. 3 Grad für den sagittalen Kondylenbahnwinkel bzw. Bennettwinkel. [51] HUGGER stellte für die SKN 2,1 ± 0,3 Grad (re) und 1,9 ± 0,3 Grad (li) bzw. 2,0 ± 0,6 Grad (re) und 1,8 ± 0,5 Grad (li) für die TKN Abweichung von den Sollwerten im Artikulatorversuch . [47]

MT 1602: GOEDECKE gab das rein systembedingte Auflösungsvermögen mit 0,1 – 0,2 mm in der sagittalen und 0,3 bis 0,4 mm in der Frontalen und Horizontalen an.[35]

CADIAX: PIEHSLINGER u.a. gaben 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]

Condylograph: FEYEN gab eine hohe Übereinstimmung des Systems mit den Sollwerten im Artikulatorversuch an. [24]

2.4.3 Reproduktionsversuche

Scharnierachse: LAURITZEN ließ mit seinem Achsfinder-System mehrere Gruppen verschiedener Behandler die Achse an einem Meßtisch lokalisieren. Die maximale Abweichung lag bei 1,5 mm vom realen Achspunkt. [71] KLAMT gibt die Genauigkeit der Reproduzierbarkeit der Scharnierachsbestimmung mit ± 1mm an, gemessen mit dem **MT 1602**. [54] Pröschel u.a. gaben die Reproduzierbarkeit einer Artikulatorscharnierachsmessung mit dem **MT 1602** auf ein Feld von 2 x 2 mm genau an.[100] AHLERS und EDINGER untersuchten die Reproduzierbarkeit verschiedener Zentrikregistrate mit **USR-Sytem** und dem Robotersystem **ROSY** und geben zwischen 0,0 mm bis 0,239 mm als Mittelwerte der Standardabweichung an.[2] BURCKHARDT gab die Lokalisierbarkeit der Scharnierachse für den **Stereognathographen** mit einer Genauigkeit von 0,5mm an. [15]

Wiederholungsmessungen: MIURA, LUCKENBACH und FREESMEYER stellten in einem Artikulatorversuch mit dem **Compugnath** max. Abweichungen dreier Messungen von 3,4 Grad bzw. 3,1Grad (Mittelwert) für den Bennettwinkel bzw. für den sagittalen Kondylenbahnwinkel von den Sollwerten fest. [83] BAULIG und REIBER ermittelten am **String®-Condylocomp 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] 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 0,2mm ± 0,14mm Abweichung eines nach JÄHNIG modifizierten **Axiographen,** die sie aufgrund von max. 4 Messungen bestimmter Strecken am gleichen Patienten ermittelten für die Reliabilität von Registraten und 2° ± 2° für die Reliabilität von Protrusionskurven nach 5mm an.[125] STAINER u.a. achsiographierten 48 Patienten dreimal im Zeitraum von durchschnittlich 3,3 Jahren mit dem **Axiographen** und stellten Kurvenabweichungendifferenzen 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 ± 1,5mm Abweichung für den zentrischen Scharnierachspunkt bzw. 3,4 Grad ± 3,0 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]

2.4.4 Vergleichende Systemversuche

HUGGER, KORDASS u.a. verglichen den **String®-Condylocomp 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-Condylocomp 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®-Condylocomp LR3** und eines **MT 1602-Systems** untereinander von max. 2 Grad , im Mittelwert von 1,1 Grad im Kondylarbereich, Frontstiftbereich und auf den Okklusalflächen von Molaren von den Sollwerten des Artikulators. [52] BAULIG und REIBER erhielten eine max. Abweichung von 1,9 Grad bei vergleichenden Messungen des **String®-Condylocomp LR3** und **Axiographen®** in einem Artikulatormeßversuch. [4] WÖSTMANN u.a. verglichen das **Cadiax (Version 2)-System** mit dem **String-Condylocomp LR 3** in einer Messtischapparatur. Gemessen wurden Längen verschiedener Sollpunkte zum Ausgangspunkti. Das Cadiax vergößerte durchschnittlich um 4% die Strecken, während der Condylocomp fast keine Abweichung für die vertikalen Strecke und eine Rotationsstrecke zeigte, jedoch in der Sagittalen Verkleinerungen von 4 %. Der Condylocomp zeigte eine schlechtere Reproduzierbarkeit der Werte und wich mit zunehmender Messwertzahl zunehmend ab, weswegen eine Neueichung nach gewisser Meßanzahl empfohlen wird. [135] STAMM und WÖSTMANN verglichen das **Cadiax (Version 2)-System** mit dem **String-Condylocomp LR 3** in einem Meßartikulator in einem weiteren Versuch. Bei reiner Rotation wurde die Achse des Artikulators mit einem Fehler <2mm gefunden von beiden Systemen.[118] 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 einem Checkbiß nach 5mm.Die Differenzen betrugen rechts 4,8 Grad und links 4,4 Grad im Mittelwert. [7] SCHWAHN u.a. überprüften pathologische Befunde aus der Achsiographie mit dem **SAS-System** mit dem **MRT-Verfahren (Magnetresonanztomogramm)** und **Axiograph ®-Befunde** mit **MRT-Verfahren.** In 24 von 32 Fällen konnten Mikro- oder Makrotrauma des SAS-Systems und 32 von 46 Fällen der mechanischen

Achsiographie durch das MRT bestätigt werden. [110] MAY u.a. stellten eine gute Korrelation zwischen Bahnspurlängen einer Achsiographie mit dem **SAS-System** und der in der **MRT-Technik** ermittelten Kondylenbeweglichkeit fest. [81] KORDASS überlagerte **MRT-BEFUNDE** mit achsiographischen des **MT 1602** und stellt sich entsprechende Abläufe wie Befunde fest. [65] KORDASS u.a. stellten pathologische Befunde aus Aufzeichnungen mit dem **Sirognathographen** den Aufzeichnungen aus **Kernspintomogrammen** gegenüber und fanden Entsprechungen. [62]