



M. Oliver Ahlers

M. O. Ahlers¹, O. Bernhardt², H. A. Jakstat³, B. Kordaß⁴, J. C. Türp⁵,
H. J. Schindler⁶, A. Hugger⁷

Motion analysis of the mandible: concept for standardized evaluation of computer-assisted recording of condylar movements

Bewegungsanalyse des Unterkiefers: Konzept zur standardisierten Auswertung computerunterstützter Aufzeichnung kondylärer Bewegungen

Zusammenfassung

Die Methode der Aufzeichnung von Bewegungen des Unterkiefers ist in der zahnärztlichen Therapie schon lange eingeführt. Hier dient sie zur Erfassung der kondylären Bewegung am Patienten als Grundlage der patientengerechten Programmierung individuell einstellbarer Artikulatoren. Davon abweichend besteht inzwischen zudem die Möglichkeit, aus erstellten kondylären Bewegungsaufzeichnungen des Unterkiefers auf die morphologische Situation im Kiefergelenkbereich Rückschlüsse zu ziehen. Die jüngste Nutzungsmöglichkeit von Aufzeichnungsdaten zur Bewegungsanalyse besteht im diagnostischen und behandlungsbegleitenden Funktionsmonitoring des

Abstract

The method of recording mandibular movements was first introduced in dentistry as a tool for treatment planning decades ago. The objective is to capture condylar movement data for patient-specific programming of articulators with individualized adjustment. Apart from that, current systems now enable the clinician to analyze the acquired mandibular/condylar movement recordings in order to obtain insight into the morphological situation of the temporomandibular joint region. The latest application for analysis of the recorded jaw-motion data allows a functional monitoring of the patient as a diagnostic and surveillance tool accompanying treatment. Parameters for the analysis

1. PD. Dr. med. dent. M. Oliver Ahlers, CMD-Centrum Hamburg-Eppendorf sowie Poliklinik für Zahnerhaltung, Zentrum für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde, Universitätsklinikum Hamburg Eppendorf
2. Prof. Dr. med. dent. Olaf Bernhardt, Poliklinik für Zahnerhaltung, Zentrum für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde der Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald
3. Prof. Dr. med. dent. Holger A. Jakstat, Vorklinische Propädeutik und Werkstoffkunde, Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik und Werkstoffkunde, Zentrum für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde, Universität Leipzig
4. Prof. Dr. med. dent. Bernd Kordaß, Abteilung für Digitale Zahnmedizin – Okklusions- und Kaufunktionstherapie, Zentrum für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde der Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald
5. Prof. Dr. med. dent. Jens C. Türp, Klinik für Rekonstruktive Zahnmedizin und Myoarthropathien, Universitätskliniken für Zahnmedizin, Universität Basel, Schweiz
6. Prof. Dr. med. dent. Hans-Jürgen Schindler, Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik, Universitätszahnklinik, Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg
7. Prof. Dr. med. dent. Alfons Hugger, Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik, Westdeutsche Kieferklinik, Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf



of such recordings have already been published. However, so far a standardized and practicable protocol for the documentation and analysis of jaw-movement recordings is still lacking. Such a diagnostic protocol and the respective documentation guidelines are presented in this article by a multicenter group of authors.

Introduction

The method of recording mandibular movements was first introduced in dentistry as a tool for treatment planning decades ago. The corresponding methods published in the early years of development were originally based on mechanical systems. The goal of recording the patient's mandibular movements was to record the jaw-motion data needed for a geometric analysis that would allow the clinician to achieve the best possible **patient-specific programming of articulators** for prosthetic restorations^{1,2}.

In the 1970s, Farrar³ described the association between mandibular movement, the timing of clicking sounds in the temporomandibular joint (TMJ), and the underlying structural cause of these acoustic phenomena, ie, displacement of the articular disc of the TMJ. Based on this, special analytical techniques were developed to study condylar movement patterns and **gain insight into the morphological and intra-articular relationships within the TMJs**⁴⁻⁷.

New applications for instrumented analysis of jaw movements are the **recording of the functional movement capacity and of the coordination of mandibular movements**^{8,9}. However, generally accepted criteria for the parameterization and evaluation of such recordings are still lacking. Therefore, the German Society for Diagnostics and Therapy (DGFDT) held a consensus conference to develop and publish such parameters in 2012¹⁰. Proposals for standardized and consistent documentation and analysis were also developed at that conference.

The aim of this publication is to present a standardized scheme for the structured analysis of computer-assisted recordings of condylar movements. The criteria for this protocol were developed and parameterized within the framework of a multicenter collaboration based on the results of the consensus conference. This article describes the resulting analysis protocol and the underlying basis of the individual findings.

Patienten. Bereits publiziert wurden Parameter der Auswertung solcher Aufzeichnungen. Bislang fehlte allerdings ein standardisiertes und praxistaugliches Protokoll zur Befundung und Auswertung derartiger Bewegungen. Die multizentrische Autorengruppe stellt in diesem Beitrag ein entsprechendes Protokoll samt dazugehörigen Dokumentationsvorgaben vor.

Einleitung

Aufzeichnungen von Unterkieferbewegungen sind in der zahnärztlichen Prothetik schon lange eingeführt. Entsprechende Verfahren wurden bereits früh angegeben und basierten ursprünglich auf mechanischen Systemen. Das Ziel dieser Aufzeichnungen bestand darin, die Bewegungen des Unterkiefers der Patienten zu registrieren und nachfolgend so geometrisch auszuwerten, dass eine möglichst **patientengerechte Programmierung von Artikulatoren** für prothetisch-restaurative Arbeiten erfolgen konnte^{1,2}.

In den 1970er Jahren berichtete Farrar³ über seine Entdeckung der Zusammenhänge zwischen dem Bewegungsverhalten des Unterkiefers, dem Zeitpunkt von Knackgeräuschen der Kiefergelenke und strukturbasierten Ursachen für diese akustischen Phänomene in Form von Verlagerungen des Discus articularis. Auf dieser Grundlage wurden spezielle Analyseverfahren entwickelt, mittels derer das kondyläre Bewegungsverhalten studiert werden konnte und **Rückschlüsse auf die morphologischen intraartikulären Gegebenheiten in den Kiefergelenken** möglich wurden⁴⁻⁷.

Eine weitere Anwendung finden instrumentelle Bewegungsaufzeichnungen mittlerweile in der **Erfassung und Analyse des funktionellen Bewegungsraumes (Bewegungskapazität) sowie der Koordination von Unterkieferbewegungen**^{8,9}. Bislang fehlten allgemein anerkannte Kriterien zur Parametrisierung und Auswertung solcher Aufzeichnungen. Diese wurden im Rahmen einer Konsensuskonferenz der Deutschen Gesellschaft für Funktionsdiagnostik und -therapie 2012 erarbeitet und veröffentlicht¹⁰. In derselben Konferenz wurden auch Vorschläge für eine standardisierte und aussagekräftige Dokumentation und Auswertung erarbeitet.

Ziel der vorliegenden Publikation ist es, ein Protokoll für ein strukturiertes Vorgehen bei der standardisierten Auswertung computerunterstützter Aufzeichnung kondylärer Bewegungen vorzustellen. Hierfür wurden im



Rahmen eines multizentrischen Abstimmungsprozesses auf Grundlage des Ergebnisses der genannten Konsensuskonferenz die entsprechenden Kriterien ausgearbeitet und parametrisiert. Der nachfolgende Beitrag beschreibt das daraus resultierende Analyseprotokoll und die Hintergründe der einzelnen Befunde.

Grundsätzlicher Aufbau der Auswertungssystematik

Das Vorgehen ist inhaltlich und formal in vier verschiedene Abschnitte untergliedert:

- Einleitend werden zum einen die **Indikation und Voreinstellungen** für die Untersuchung und zum anderen die Ausgangssituation erfasst, die den nachfolgenden Auswertungen und den erfassten Befunden zugrunde liegen.
- Im sich anschließenden Abschnitt „**kondyläre Stabilität**“ wird die Reproduzierbarkeit, mit der Start- und Endposition der Kieferbewegungen im kondylären Bereich eingenommen werden, strukturiert ausgewertet.
- Zur Prüfung der Bewegungskapazität und der Bewegungskoordination erfolgt im nachfolgenden Abschnitt „**kondylärer Bewegungsablauf**“ die parametrisierte Befundung der Bewegung des Unterkiefers zwischen dem Start- und dem Endpunkt, sowohl hinsichtlich der Bewegungsform als auch der übrigen Parameter.
- Jenseits der standardisierten parametrisierten Auswertung ergänzen abschließende „**Bemerkungen zur Auswertung**“ die instrumentelle Bewegungsanalyse.

Eine Umsetzung des Auswertungssystems in Form eines entsprechenden Befundbogens ist bereits realisiert⁹. Deswegen gestaltete unter anderem mit der Vorgabe, den medizinisch gebotenen Rahmen der zu erhebenden Informationen sprachlich und grafisch derart zu bearbeiten, dass der Gesamtumfang der strukturiert zu erfassenden Informationen auf eine Seite im Format DIN-A4 passte (Abb. 1).

Ein weiteres Ziel war die Erfassung in Form ankreuzbarer Befundoptionen. Dies wiederum setzte die nahezu vollständige Parametrisierung der zu erhebenden Befunde voraus, was wiederum die Voraussetzung für eine spätere Digitalisierung schafft (siehe Diskussion).

Basic structure of the analysis protocol

The protocol is divided into four distinct sections based on formal and content criteria:

- “**Indication and standard settings**” establishes the indication and standard settings for the examination as well as the initial baseline conditions that serve as the basis of later analyses and findings.
- “**Analysis of condylar stability**” focuses on a structured assessment of the reproducibility of the start and end positions of mandibular movements in the condylar region.
- “**Condylar movement**” consists of parameterized assessment of mandibular movement between the starting and stopping point with regard to the condylar path and other parameters (movement capacity and coordination of movements).
- “**Comments and interpretations**” supplement the instrumented analysis of jaw movements beyond the standardized parametric analysis.

Regarding implementation of the proposed system of analysis, a form for documentation of the results has already been developed⁹. One requirement was that the form be designed in such a way that the information gathered during the recordings could be linguistically and graphically documented on a single page (Fig 1).

Another goal was to design a form with check-off options for the documentation of findings. This in turn required the almost complete parameterization of the collected findings, which, in turn, is the prerequisite for digitization of the data (see Discussion).

Indication and standard settings

The proposed protocol for evaluation of the results of instrumented analysis of jaw movements is entirely independent of any specific instrument manufacturer or supplier. Hence, it can be used with any suitable recording system for the registration of jaw movements. The first step of the evaluation protocol is, therefore, to enter the type of registration system. The currently available electronic **recording systems** for the registration of jaw movements are included in the list of options printed on the form¹². The list embraces three ultrasound-based mandibular movement recording systems:

- JMA – Jaw Motion Analyzer (Zebris) (Fig 2).
- ARCUSdigma II (KaVo)
- Axioquick Recorder (SAM Präzisionstechnik).



Instrumentelle Bewegungsanalyse (BA)



Weitere Informationen zu den Befunden finden Sie im Internet unter
 http://www.dentaconcept.de/forumbilder/bewegungsanalyse.html

Entwicklung: Priv.-Doz. Dr. M. Oliver Ahlers, CMD, Centrum Hamburg-Experten für
 Kieferorthopädie, Zahnklinik, Universität Hamburg, Prof. Dr. B. Konrad, ZMKK,
 Prof. Dr. Holger A. Jägle, Uniklinik Leipzig, Prof. Dr. B. Konrad, ZMKK,
 Ernst-Moritz-Arndt-Universität, Greifswald; Prof. Dr. J. J. van't Hof-Grootenboer,

© dentaConcept Verlag GmbH / Art. Nr. 520035 / ISBN 978-3-933465-20-7
 www.dentaconcept.de
 Falkenberg 88764, C. 2025 | Hamburg, www.dentaconcept.de

Patient/in Datum

Patienten-Nummer Geburtsdatum

Indikation und Voreinstellungen

- Registriersystem**
- Zebbris JMA System
 - KaVo ARCUSdigma
 - SAM Axioquick Recorder
 - Gamma Cadiax compact 2
 - Gamma Cadiax 4
 - DDI FreeCorder BlueFox
 -

- Posteriore Referenzpunkte**
- arbiträr nach Systemvorgaben
 - arbiträr nach anatomischer Hautreferenz
 - individuell
 - kinematisch (nach KOHNO/PRÖSCHEL/NAEJJE)

- Indikation: Prüfung der...**
- Bewegungskapazität
 - Bewegungskoordination
 - okklusalen Zentrierung / Stabilität der Kondylenposition
 - Artikulatorprogrammierung
 - Andere:

Kondyläre Stabilität

rechts **links**

- Bewegungsbeginn** (Oszillation um Startpunkt)
- stabil
 - instabil

Startpunktverschiebung

- cranial
- posterior
- anterior
- caudal

- Bewegungsbeginn** (Oszillation um Startpunkt)
- stabil
 - instabil

- cranial
- anterior
- posterior
- caudal

Haltepunkt in Inkursion

- cranial
- posterior
- anterior
- caudal

Haltepunkt in Inkursion

- cranial
- anterior
- posterior
- caudal

Endpunktverschiebung der Inkursion

- cranial
- posterior
- anterior
- caudal

Endpunktverschiebung der Inkursion

- cranial
- anterior
- posterior
- caudal

Bemerkungen und Auswertung

.....

Datum / Unterschrift

Version 1.0, Hamburg 2013

- Adapterbefestigung**
- paraokklusal
 - (peri-)okklusal
- Okklusion möglich Okklusionsfläche bedeckt

- Startposition**
- Aktuelle Kieferposition Position
 - Therapeutische Kieferposition Position
 - Okklusionsschiene mit planer Kaufläche
 - Okklusionsschiene mit Höcker-Fossa-Relief

- Startkalibrierung**
- Nullpunkt gehalten
 - Abweichung vom Nullpunkt belassen
 - nach Abweichung vom Nullpunkt Neukalibrierung

- Ausführung dynamischer Bewegungen**
- ungeführt ohne Zahnkontakt
 - geführt ohne Zahnkontakt
 - ungeführt mit Zahnkontakt
 - geführt mit Zahnkontakt

Kondylärer Bewegungsablauf

rechts **links**

- Bahnlänge (Öffnen/Schießen)**
- auffällig verkürzt
 - normal
 - auffällig verlängert
 - linear
 - kurvilinear
- mm

- Bahnform**
- anterior konkav (kurvenförmig)
 - sprunghaft / 8-förmig
 - geradlinig
 - kaudal konvex (invers)
 - irregulär

- Geschwindigkeitsverlauf**
- eingipflig (normal).....
 - zweigipflig
 - mehrgipflig.....

- Kondylenkoordination**
- (weitgehende) Gleichmäßigkeit
 - leichte Ungleichmäßigkeit
 - deutliche Ungleichmäßigkeit

Datum / Unterschrift

Version 1.0, Hamburg 2013

Fig 1 Examination form for "Instrumented Analysis of Jaw Movements" (©dentaConcept Verlag, Hamburg, Germany).

Abb. 1 Befundbogen „Instrumentelle Bewegungsanalyse“ (©dentaConcept Verlag, Hamburg)



Fig 2 Example of an ultrasound-based electronic movement recording system (JMA – Jaw Motion Analyzer, Zebris) (Photo ©dentaConcept Verlag).

Abb. 2 Beispiel für ein elektronisches Bewegungsaufzeichnungssystem auf Basis der Ultraschallmesstechnik (Jaw Motion Analyzer, Zebris, Foto: ©dentaConcept Verlag, Hamburg).



Fig 3 Example of an electronic movement recording system based on the voltage division method (Cadiax Compact 2, Gamma Dental) (Photo ©dentaConcept Verlag).

Abb. 3 Beispiel für ein elektronisches Bewegungsaufzeichnungssystem, das messtechnisch auf dem Spannungsteilungsverfahren aufbaut (Cadiax Compact 2, Gamma Dental, Foto: ©dentaConcept Verlag, Hamburg).

Indikation und Voreinstellungen

Die entwickelte Systematik zur Auswertung der instrumentellen Bewegungsanalyse ist vollkommen unabhängig von den Geräten einzelner Hersteller bzw. Inverkehrbringer entsprechender Bewegungsaufzeichnungssysteme konzipiert. Den Anfang des Auswertungssystems bildet daher die Erfassung des eingesetzten **Registriersystems**. Als vorgedruckte Optionen werden die derzeit in Verkehr gebrachten elektronischen Systeme zur Registrierung der Unterkieferbewegung angeboten¹². Hierzu zählen die folgenden drei Registriersysteme auf Basis der Ultraschallmesstechnik:

- JMA-System (Jaw Motion Analyzer, Fa. Zebris, Isny, Abb. 2),
- ARCUSdigma II (Fa. KaVo, Biberach),
- Axioquick Recorder (Fa. SAM Präzisionstechnik, Gauting/München).

Berücksichtigt sind ferner zwei aktuell lieferbare Registriersysteme, welche die Unterkieferbewegungen gelenknah erfassen und die messtechnisch auf Basis des Spannungsteilungsverfahrens aufgebaut sind:

- Cadiax Compact 2 (Fa. Gamma Dental, Klosterneuburg/Wien, Österreich, Abb. 3),
- Cadiax 4 (Fa. Gamma Dental).

Also listed are two currently available electronic recording systems designed for the registration and display of hinge axis movements of the mandible that are based on the voltage division method:

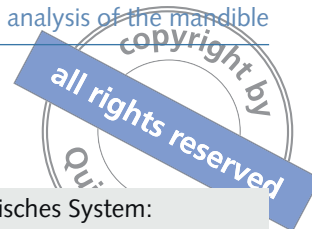
- Cadiax Compact 2 (Gamma Dental) (Fig 3).
- Cadiax 4 (Gamma Dental).

An opto-electronic system is also included on the list:

- Freecorder Bluefox (Dental Innovation).
- Free-text entries can be made for either older systems that are no longer actively marketed or for future systems.

Posterior reference points are generally defined at the onset of mandibular movement recordings. In the proposed concept, the available options for reference point definition are as follows:

- Arbitrary, according to system specifications: this option usually applies for Cadiax Compact without upgrade to the double-stylus system of Cadiax 4; use of this option with ultrasound-guided systems is also possible.
- Arbitrary: an anatomical point on the skin surface, as marked by the user, serves as reference point.
- Individual: an individually determined hinge axis point is used as reference point.



- Kinematic: a kinematic axis or kinematic center according to Kohno/Pröschel/Naeije¹³⁻¹⁵ is used as reference point.

The subsequent procedure is essentially dependent on the individual **indication** for the examination.

- Individual programming of an articulator is a classical indication. Recordings and evaluations typically comprise the angle of inclination and sometimes also the radius of curvature of condylar movement in relation to a reference plane. The results are evaluated, documented, and displayed using the analytical software supplied with the various electronic recording systems.
- Instrumented analysis of jaw movements additionally offers the possibility of a three-dimensional recording of the current jaw movement capacity.
- Electronic recording systems with a PC-based display make it possible to record and analyze the coordination of jaw-movements.
- Special analyses may also be performed to evaluate the degree to which the originally calibrated condylar position is captured three-dimensionally from the course of movement. If necessary, this can also be performed with an oral appliance inserted.
- Moreover, instrumented analysis of jaw movements may, of course, be indicated for investigation of other specific questions.

The techniques for **attachment of the tray adapter** may vary depending on the indication:

- For paraocclusal tray attachment, the tray adapter is first adapted to the contours of the vestibular surfaces of the mandibular teeth using a suitable acrylic material, and is then attached to the teeth with the help of, for instance, carboxylate luting cement. A modified technique that does not require the use of luting cement may be used as an alternative method¹⁶.
- In periocclusal tray attachment (a term coined by Klett⁵), the adapter tray circumferentially covers the occlusal surfaces of the entire lower arch. On the one hand, periocclusal attachment offers much greater ease of handling for the dentist and the dental team than the paraocclusal technique. On the other hand, it is not possible to include the occlusal situation in the analysis when using the periocclusal technique. Consequently, the movement begins at a slightly upwardly rotating starting position. This, in turn, means that there is no possibility of performing an initial analysis of movement parameters during jaw-opening movement, or a terminal analysis during jaw-closing movement.

Ebenso erfasst ist ein optoelektronisches System:

- Freecorder Bluefox (Fa. Dental Innovation, Dortmund).
- Für Anwender, die funktionstüchtige ältere, aber nicht mehr aktiv vertriebene oder künftige Registriersysteme einsetzen, ist eine Freitextoption vorgesehen.

Die Aufzeichnungen beginnen in der Regel mit der Festlegung **posteriorer Referenzpunkte**. Folgende Optionen zur Referenzpunktbestimmung stehen im vorgestellten Konzept zur Auswahl:

- arbiträr nach Systemvorgaben (beim Cadiax Compact 2 ist dies regelhaft der Fall; bei den ultraschallgestützten Systemen ist ein solches Vorgehen als Option möglich);
- arbiträr nach einer anatomischen, vom Untersucher markierten Hautreferenz;
- individuell, d. h. Punkte nach individuell bestimmter Scharnierachse; oder
- kinematisch, d. h. Punkte, die sich auf die kinematische Achse bzw. auf das kinematische Zentrum nach Kohno/Pröschel/Naeije beziehen¹³⁻¹⁵.

Das weitere Vorgehen ist wesentlich an die individuelle **Indikation** der Untersuchung gebunden.

- Eine Indikation kann die klassische individuelle Artikulatorprogrammierung sein. Hierzu werden typischerweise der Neigungswinkel, eventuell auch der Krümmungsradius der kondylären Bewegung in Relation zu einer Bezugsebene aufgezeichnet und ausgewertet. Die entsprechenden Ergebnisse werden anhand der Auswertungssoftware, die zu verschiedenen elektronischen Bewegungsaufzeichnungssystemen vorliegt, ausgegeben und dort dokumentiert.
- Davon abweichend bietet die instrumentelle Bewegungsanalyse die Möglichkeit einer dreidimensionalen Erfassung der aktuellen Bewegungskapazität.
- Durch die elektronische Aufzeichnung und die PC-gestützte Wiedergabe ist zudem eine Erfassung und Auswertung der Bewegungskoordination möglich.
- Auch besteht die Möglichkeit, durch spezielle Auswertungen zu prüfen, inwieweit aus dem Bewegungsverlauf heraus die Kondylenposition dreidimensional erreicht wird. Dieser kann gegebenenfalls mit eingesetzter Okklusionsschiene durchgeführt werden.
- Selbstverständlich können darüber hinaus andere individuelle Fragestellungen Veranlassung für eine instrumentelle Bewegungsanalyse bieten.

In Abhängigkeit von der jeweiligen Indikation kann die **Adapterbefestigung** in verschiedener Form erfolgen:

- Bei der paraokklusalen Adapterbefestigung wird der Löffeladapter zunächst mittels geeigneter Kunststoffe an die Kontur der Vestibulärfläche der Unterkieferzähne angepasst und anschließend mittels Befestigungszement an der Unterkieferzahnreihe fixiert. Alternativ kommt ein modifiziertes Verfahren zur Anwendung, das einen Verzicht auf Befestigungszement ermöglicht¹⁶.
- Im Gegensatz dazu ist bei der „periokklusalen“ (Begriff nach Klett⁵) Adapterbefestigung die Kaufläche durch einen Befestigungsadapter ringsum bedeckt. Dieses Vorgehen ist im Vergleich zu den anderen Verfahren von der Handhabung deutlich weniger anspruchsvoll für den Zahnarzt und sein Team. Dafür besteht in diesem Fall nicht die Möglichkeit, die okklusale Situation in die Auswertung einzubeziehen. Dies bedingt, dass der Bewegungsbeginn in einer leicht aufrotierten Startposition erfolgt, was wiederum dazu führt, dass keine Möglichkeit besteht, Bewegungsphänomene initial bei der Öffnungsbewegung sowie terminal bei der Kieferschließbewegung zu untersuchen.

Auch bei der Auswahl der **Startposition** für die Bewegungsaufzeichnung bestehen verschiedene Optionen:

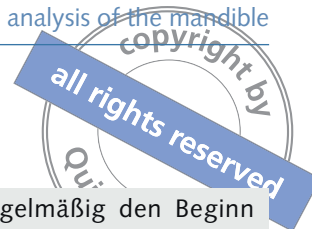
- Der Normalfall ist eine Aufzeichnung, die von der *aktuell durch die Zähne determinierten Kieferposition* ausgeht. Hierzu ist es hilfreich abzuschätzen, wie gut diese Position im Einzelfall verschlüsselt ist: Bei einer von einer geometrisch stabil verschlüsselten Interkuspidationsposition ausgehenden Bewegung ist eine reproduzierbare Rückkehr zur kalibrierten Startposition zu erwarten. Wenn die Zähne des Unterkiefers hingegen nicht stabil dental verschlüsselt sind, kann der Unterkiefer lediglich eine labile Abstützung gegenüber den Oberkieferzähnen finden.
- Im Behandlungsverlauf kann es sinnvoll sein, die Unterkieferbewegung ausgehend von einer durch eine Okklusionsschiene eingestellten Kieferposition aufzuzeichnen. Hierfür findet die *Aufzeichnung mit eingesetzter Okklusionsschiene* statt. Die Stabilität, mit der die Unterkieferposition dabei eingestellt wird, hängt wesentlich von der okklusalen Gestaltung der Schiene ab. Hierfür ist im Sinne eines Unterpunktes zu differenzieren, ob die Kaufläche der Okklusionsschiene plan oder mit einem Höcker-Fossa-Relief versehen ist. Im letzteren Fall sollte die Startposition, aus der heraus die Unterkieferbewegung erfolgt, deutlich verschlüsselt sein.

As for the **starting position**, there are also different options to indicate the circumstances that determine the starting point of mandibular movement recording:

- Normally, the recording starts from the *jaw position currently determined by the teeth*. It is helpful to assess how well this position is encoded in the individual patient: A reproducible return to the calibrated starting position can be expected if the movement starts from a geometrically stable intercuspal position. If, however, the mandibular teeth are not stably positioned against the antagonists, the mandibular jaw only obtains insufficient stabilisation in relation to the maxillary teeth.
- In the course of treatment, it may be useful to record mandibular movements starting from a jaw position defined by an oral splint. In this case, *recordings are made with the oral application* in the patient's mouth.
- The occlusal design of the splint largely determines the stability of the mandibular position. It makes a difference whether the occlusal surface of the splint is flat or has a predetermined cusp-fossa pattern. In the latter case, the starting position of mandibular movement should be stably positioned.

Start calibration is usually the first step of instrumented analysis of jaw movements using electronic recording systems. At a user-determined time the mandibular position is set as the zero point. In the case of perioclusal attachment of the mandibular recording bow, centric relation should be the zero point. In paraocclusal attachment of the mandibular recording bow, start calibration and all movements can proceed from intercuspidation or habitual occlusion, respectively.

- If that *zero point* is maintained throughout the further recordings, then a stable jaw position is ensured.
- If at this time a *deviation from the zero point* occurs, recalibration of the system is generally performed.
- Deviation of the mandibular position from the calibrated starting point may occur, and this deviation can be determined to be a clinically relevant displacement. In this case, the examiner can make a conscious decision to maintain the displacement as clinically relevant information. However, this should be clearly noted to avoid misinterpretation of this change as incorrect start calibration. There are also different options for the **evaluation of dynamic movements**. This is sometimes crucial for the resulting course of mandibular movements. In order to assess the recorded movements correctly, it is important to know how the corresponding dynamic movements were executed.



Mandibular movements may be:

- *Guided*
- *Unguided*

Guided movements are generally characterized by the fact that force (eg, lateral force) is applied to the lower jaw by the examiner during the excursion. As this force influences the course of movement, it is important to know whether such forces were applied during the movement.

Two types of recordings can be distinguished based on the presence or absence of tooth contacts during jaw movement:

- *Tooth-guided movement*: Paraocclusal attachment of the mandibular tray adapter (and hence the recording bow) permits the registration of tooth-guided movements. These recordings usually provide information on the characteristics of mandibular movement upon occlusal contact.
- *Non-tooth-guided movement*: Traces of this type do not provide information about occlusal influences on the path of the mandibular movement. However, the recorded movements are free from occlusal influences, which in certain circumstances can be helpful.

Analysis of condylar stability

The objective of the condylar stability assessment is to evaluate occlusal centricity and/or the stability of the condylar position at the beginning, during, and, above all, at the end of the mandibular movement.

First, the stability of condylar position is evaluated at the **start of movement**. Oscillation around the previously calibrated starting point, ie, dispersion around the mean of the measured condylar position, is the criterion used for this task. This is measured in either intercuspatation (paraocclusal registration) or incisal contact alone (periocclusal registration), with natural closing movements in each case. It should be noted that condylar movement patterns in the fossa–disc–condyle complex are influenced by the mandibular closing velocity and head posture. The slower the closing movement of the mandible, the greater the influence of head position on the closing movement. For this reason, it is advisable to establish a "normal position" for the cervical spine and to keep the closing velocity as constant as possible (by having the patient practice beforehand) over the course of time.

Deviations are then to be regarded as real oscillations when they clearly exceed the normal spatial biometric variance of approximately 0.3 to 0.4 mm in the specific spatial

Eine **Startkalibrierung** bildet regelmäßig den Beginn der instrumentellen Bewegungsaufzeichnungen mittels elektronischer Aufzeichnungsinstrumente. Hierbei wird zu einem vom Untersucher wählbaren Zeitpunkt der Nullpunkt festgelegt. Bei *periokklusaler* Befestigung des Unterkieferbogens sollte der Nullpunkt die zentrische Kieferrelation sein. Bei *paraokklusaler* Befestigung des Unterkieferbogens können die Startkalibration und alle Bewegungen von der Interkuspidationsposition ausgehen.

- Wird jener *Nullpunkt* im weiteren Untersuchungsverlauf zu Behandlungsbeginn gehalten, so ist dies die Gewähr für eine stabil eingenommene Kieferposition.
- Bei einer *Abweichung vom Nullpunkt* zu diesem Zeitpunkt erfolgt typischerweise eine Neukalibrierung des Systems.
- Es kann vorkommen, dass der Unterkiefer von der kalibrierten Startposition abweicht. Sofern diese Abweichung als klinisch relevante Verlagerung eingeschätzt wird, kann der Untersucher bewusst entscheiden, die Verlagerung als relevante klinische Information beizubehalten. Um zu vermeiden, dass diese Veränderung als fehlerhafte Startkalibrierung missverstanden wird, besteht die Möglichkeit, dies unmissverständlich zu dokumentieren.

Auch bei der **Ausführung dynamischer Bewegungen** bestehen verschiedene Möglichkeiten der Durchführung. Diese sind für die resultierenden Verläufe der Unterkieferbewegung teilweise von entscheidender Bedeutung. Um die aufgezeichneten Bewegungen korrekt einschätzen zu können, ist es daher wichtig zu wissen, auf welche Weise die entsprechenden dynamischen Bewegungen ausgeführt wurden. Die Unterkieferbewegungen können

- *ungeführt* oder
- *geführt* erfolgen.

Die *geführte* Bewegung ist in Regel dadurch gekennzeichnet, dass bei der Exkursion vom Untersucher eine (beispielsweise nach lateral) ausgeübte Kraft auf den Unterkiefer einwirkt. Der Bewegungsverlauf wird hierdurch beeinflusst, weshalb das Wissen um derartige Einwirkungen während der Bewegung wichtig ist. Auch hinsichtlich der im Bewegungsverlauf eingenommenen Zahnkontakte sind zwei Alternativen möglich:

- *Bewegungen mit Zahnkontakt* sind möglich bei vorheriger paraokklusaler Befestigung des Unterkieferbogens. Diese Aufzeichnungen geben charakteristischen

Aufschluss über die Bewegung des Unterkiefers bei Okklusionskontakten.

- *Bewegungen ohne Zahnkontakt* erlauben keine Möglichkeit des Rückschlusses okklusaler Einflüsse auf den Bewegungsverlauf des Unterkiefers, erfolgen andererseits aber auch frei von Einflüssen durch die Okklusion.

Analyse der kondylären Stabilität

Die Analyse der kondylären Stabilität dient der Erfassung der okklusalen Zentrierung bzw. der Stabilität der Kondylenposition zu Beginn sowie im Verlauf und vor allem zum Ende der Unterkieferbewegung.

Zu diesem Zweck wird zunächst die Stabilität der Kondylenposition am **Bewegungsbeginn** bewertet. Das Kriterium hierfür ist die Oszillation um den zuvor kalibrierten Startpunkt, also die Streuung um den Mittelwert der gemessenen Kondylenposition. Erfasst wird dieser in Interkuspitation (bei paraokklusaler Aufzeichnung) oder bei alleinigem inzisalen Kontakt (periokklusale Aufzeichnung), jeweils bei natürlichen Schließbewegungen. Dabei ist zu beachten, dass die kondylären Bewegungsmuster im Fossa-Diskus-Kondylus-Komplex von der Geschwindigkeit der Schließbewegung des Unterkiefers und der Kopfhaltung abhängen. Je langsamer die Schließbewegung des Unterkiefers erfolgt, umso mehr beeinflusst die Kopfhaltung die Schließbewegung. Daher sollte im weiteren Verlauf eine physiologische Stellung der Halswirbelsäule ermöglicht und in dieser auf eine möglichst gleichbleibende Schließgeschwindigkeit geachtet werden (vorheriges Üben mit dem Patienten). Abweichungen sind dann als solche zu bewerten, wenn sie eine normale räumliche biometrische Varianz von etwa 0,3 bis 0,4 mm in den spezifischen Raumrichtungen (frontal, sagittal, horizontal) deutlich übersteigen. Vor diesem Hintergrund kann die kondyläre Stabilität zu Bewegungsbeginn unterschieden werden in:

- *stabil*: die Abweichungen bewegen sich innerhalb der normalen Streuung;
- *instabil*: die Varianzen liegen deutlich außerhalb der normalen Streuung.

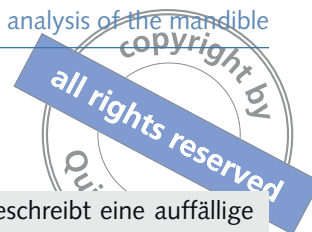
In der Folge wird geprüft, ob sich im Verlauf verschiedener Öffnungs- und Schließbewegungen eine Veränderung des Startpunktes ergibt, ob bei den Schließbewegungen ein Haltepunkt angesteuert wird und ob der Endpunkt der Schließbewegung vom ursprünglichen Bewegungsbeginn relevant abweicht.

planes (frontal, sagittal, horizontal). Condylar stability at the start of movement can then be classified as either stable or unstable based on the degree of that variance:

- *Stable*: deviation within the normal variation range.
- *Unstable*: deviation clearly outside of the normal variation range.

Therefore, it is necessary to check whether a change in the starting point occurs over the course of different mandibular opening and closing movements, whether a breakpoint occurs during closing movements, and whether a relevant change in the stopping point of closing movement occurs, as compared to baseline.

- The **starting point displacement** is a marked shift in condylar position in a specific direction in space with respect to the reference position. The mean of repeated measurements of normal closing movement of the mandible serves as the reference value. Any starting point displacement that may occur is described in terms of the direction (superior, inferior, posterior, anterior) or a combination of directions of shifting (anteriorposterior etc) from baseline.
- A **breakpoint during incursion** is characterized by a brief pause in closing movement when bringing the teeth into maximum intercuspation, followed by a renewed increase in closing velocity. Such a breakpoint is a sign of impaired neuromuscular coordination of free closing movement into maximum intercuspation. Its occurrence in association with TMJ arthropathy may indicate that the jaw assumes an approximately normal position at that point¹⁷. If stable occlusal support is lacking at this position and jaw-closure muscle activity persists, the characteristically transient deceleration of functional movement is followed by the continuation of mandibular movement, usually in the posterosuperior direction. If such a break in closing movement does occur, the location of the breakpoint is described in terms of the direction (superior, inferior, posterior, anterior) or combination of directions of displacement (anteroposterior, etc) from the starting point.
- The **stopping point displacement** during incursion is a reproducible but significant deviation from the normal scatter associated with oscillation around the previously calibrated starting point (see above) of the incursive stopping point of closing movements. This deviation is an expression of occlusal instability due to inadequate occlusal guidance when closing the teeth into maximum intercuspation. Any stopping-point displacement that may occur is also described in terms of the direction (superior,



inferior, posterior, anterior) or combination of directions of shifting (anteroposterior, etc) from baseline.

Structured documentation of changes in the starting point, breakpoint, and stopping point positions allows for the systematic analysis of these findings. This allows the clinician to determine at a glance, immediately after the recording and in later consultations, whether changes in the reference points and/or breakpoints have occurred, and take any such changes into account.

Analysis of the path of condylar movement

Recording the path of condylar movement serves different purposes: besides enabling the determination of jaw-movement capacity and the evaluation of the neuromuscular coordination of movements, it provides information on potential changes within the joint. For this purpose, the recorded condylar movement must allow for the characterization of various parameters, including the length and curvature of the condylar path, the speed of condylar movement, and the bilateral coordination of the condyles.

Condylar path length during mandibular opening and closing movements may be characterized as:

- *Shortened.*
- *Normal length.*
- *Lengthened.*

When the system software measures the length of condylar tracings, it is important to know whether the corresponding path was *linear* or *curvilinear*. Without this information, it would not be possible to compare the computer measurements to other measurements. A significant reduction in condylar path length may be due to a protective postural change to avoid joint pain, for example in patients with capsulitis or synovitis of the TMJs. TMJ disc displacement without reduction is also frequently accompanied by condylar path shortening, especially in acute cases (please compare Fig 7).

Various characteristic **condylar path curvature patterns** can be distinguished, albeit with a certain degree of abstraction. For example:

- *Anterior concave curvature* is characteristic of normal movement of the condyles (Figs 4 and 5).
- An *erratic figure-8* tracing, in which the opening and closing movement tracings cross, is indicative of an intra-articular disorder (disc displacement with reduction) (Fig 6).

- Die **Startpunktverschiebung** beschreibt eine auffällige Kondylenverlagerung in einer spezifischen Raumrichtung in Bezug zur Referenzposition. Als Referenzwert dient der Mittelwert mehrmaliger Messungen physiologischer Schließbewegungen. Kommt es zu einer Startpunktverschiebung, wird diese hinsichtlich der Richtung der Verlagerung angegeben (kranial, kaudal, posterior, anterior), wobei verschiedene Richtungen miteinander kombiniert werden können (beispielsweise anterior und kaudal).
- Ein **Haltepunkt in Inkursion** bezeichnet eine kurze Unterbrechung einer Schließbewegung in die Interkuspitation, in deren Folge die Bewegungsgeschwindigkeit wieder zunimmt. Ein solcher Haltepunkt ist Ausdruck einer neuromuskulären Dyskoordination der freien Schließbewegung in die maximale Verzahnung. Im Zusammenhang mit Arthropathien der Kiefergelenke kann dies ein Hinweis dafür sein, dass in dieser Position eine in etwa physiologische Kieferposition eingenommen wird¹⁷. Sofern in dieser Position die Okklusion nicht stabil abgestützt wird und die muskuläre Aktivität der Schließmuskulatur fortbesteht, kommt es nach einem vorübergehenden charakteristischen Abbremsen der Bewegungsfunktion zu einer Fortsetzung der Unterkieferbewegung, zumeist nach retrokranial. Findet eine solche Unterbrechung der Schließbewegung statt, wird die Lokalisation dieses Haltepunktes als Abweichung vom Startpunkt angegeben (kranial, kaudal, posterior, anterior), wobei erneut verschiedene Richtungen kombiniert werden können (beispielsweise anterior und kaudal).
- Die **Endpunktverschiebung der Inkursion** ist eine reproduzierbare, gleichwohl deutliche Abweichung von der im Zusammenhang mit der Oszillation um den zuvor kalibrierten Startpunkt beschriebenen normalen Streuung des inkursiven Endpunktes bei Schließbewegungen. Diese Abweichung ist Ausdruck einer instabilen Okklusion durch unzureichende okklusale Führung in Interkuspitation. Auch eine Endpunktverschiebung wird hinsichtlich der Verlagerungsrichtung angegeben (kranial, kaudal, posterior, anterior), wobei auch hier verschiedene Richtungen vorkommen und miteinander kombiniert werden können (beispielsweise retral und kranial).

Die strukturierte Erfassung von Veränderungen der Start-, Halte- und Endpunkte systematisiert die Auswertung derartiger Befunde. Dies ermöglicht es sowohl unmittelbar

nach der Aufzeichnung als auch bei späterer Konsultation der Befundauswertung mit einem Blick zu erfassen, ob Verschiebungen von Referenzpunkten und/oder zwischenzeitliche Haltepunkte aufgetreten und zu berücksichtigen sind.

Analyse des kondylären Bewegungsablaufes

Die Erfassung des kondylären Bewegungsablaufes dient sowohl der Bestimmung der Bewegungskapazität als auch der Beurteilung der Bewegungskoordination; sie erlaubt zudem Rückschlüsse auf mögliche intraartikuläre Veränderungen. Erforderlich hierfür ist die Erfassung des Bewegungsablaufes im Hinblick auf verschiedene Merkmale, darunter die Länge und Form des Bahnverlaufes, die Geschwindigkeit, mit der die Bewegungen der Kondylen erfolgten und die bilaterale Koordination der Kondylen.

Hinsichtlich der **Bahnlänge** beim Öffnen und Schließen wird unterschieden zwischen:

- auffällig verkürzter,
- normal (*physiologisch*) langer und
- auffällig verlängerter Bewegungsspur.

Sofern die Länge als metrischer Wert aus der entsprechenden Gerätesoftware ausgelesen wird, ist es wichtig zu wissen, ob es sich um einen *linearen* oder *kurvilinearen* Streckenwert handelt, da ohne diese Information der entsprechende Wert nicht mit Werten von alio loco ausgeführten Messungen vergleichbar ist.

Auffällige Verkürzungen der kondylären Bahnlänge können Folge einer Schonhaltung zur Vermeidung von Gelenkschmerzen sein, beispielsweise bei bestehender Kapsulitis/Synovitis des jeweilig betroffenen Kiefergelenks (vgl. Abb. 7). Auch eine Diskusverlagerung ohne Reposition geht häufig mit einer Verkürzung der Bewegungsbahnen einher, insbesondere im akuten Fall.

Hinsichtlich der **Bahnform** sind einige typische Bewegungsmuster unterscheidbar, auch wenn damit eine gewisse Abstraktion verbunden ist:

- Ein *anterior konkaver kurvenförmiger* Verlauf ist typisch für einen physiologischen Bewegungsablauf (Abb. 4 und 5).
- Im Gegensatz dazu deutet ein *sprunghafter* Verlauf, bei dem sich die Öffnungs- und Schließbewegung in Form einer „8“ überkreuzen, auf intraartikuläre Störungen (Diskusverlagerung mit Reposition, Abb. 6).

- A *straight-line tracing* and/or *shortened opening and closing* movements are suggestive of disc displacement without reduction, potentially accompanied by arthritic changes (Fig 7).
- A *posterior convex curvature* (inverse curvature) is typically associated with advanced TMJ osteoarthritis.
- Structural changes in the TMJ region, abnormal movement of the mandible, and/or technique-related artifacts may also result in irregular curvature of the condylar path.

The **speed of condylar movement** over the condylar path provides information on the coordination of movements. Special software is required for appropriate processing of the data relevant to the analysis. The length of the condylar path (translation length) relative to the corresponding speed of movement serves as the basis of the analysis. With this information, modern software and respective settings can determine the velocity of opening and closing movements at a given point in time for each motion segment. Typically, there is a velocity increase (acceleration) during opening movement, followed by a velocity decrease (deceleration) after reaching the maximum opening position. Later, the initiation of jaw-closing movement results in a renewed increase in movement velocity, followed by deceleration towards the end of the movement. A normal velocity profile is characterized by a largely one-peak velocity curve during jaw opening and closing movements.

However, the condylar velocity may exhibit a two-peak or multi-peak profile during jaw opening or jaw closing, respectively. Velocity profiles with two peaks or more indicate a temporary loss of speed, which may be attributable to disorders of arthrogenic or myogenic origin (Figs 8 and 9). Recurrent velocity losses in the right and/or left TMJ during mandibular movement can be interpreted as dysfunctional.

Coordination of movements and/or **condylar coordination** are assessed by comparing the paths of condylar movement in the frontal view and top view. Different types of movement are distinguished:

- Largely uniform/parallel movement (Fig 10).
- Slight/beginning irregular/non-parallel movement.
- Marked, more or less pronounced irregular/non-parallel movement (Fig 11).

Comments and interpretations

The final free-text option is useful in that it allows the investigator to record comments on the specifics of individual movement recordings.

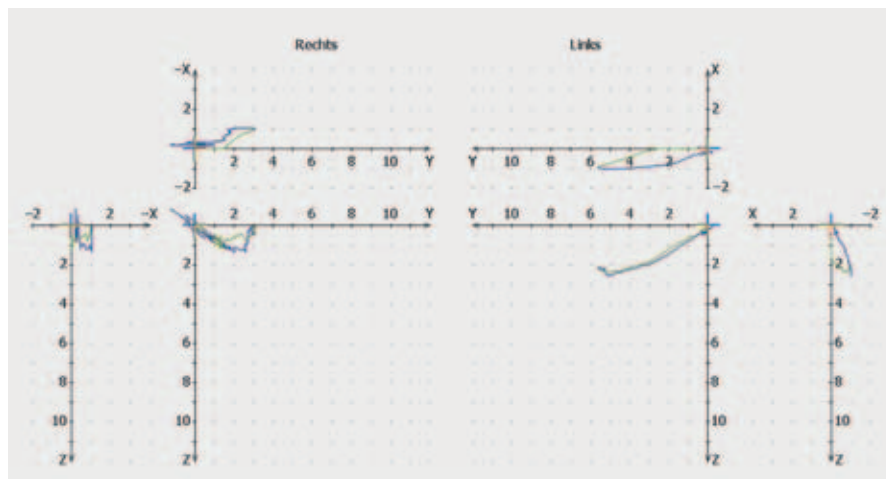
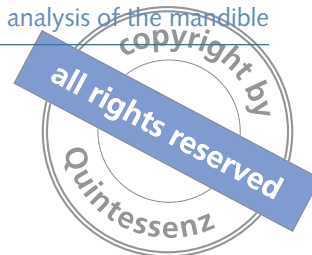


Fig 4 Example of an irregular condylar movement path on the right-hand side (paraocclusal registration at the onset of treatment, starting in habitual occlusion).

Abb. 4 Beispiel für einen irregulären Bewegungsverlauf rechts (paraokklusale Aufzeichnung zu Behandlungsbeginn in habitueller Okklusion).

Diagnostic classification of TMDs is not part of the protocol for structured analysis because this would limit its applicability to only one diagnostic system.

Nevertheless, diagnostic classification of the findings is of considerable significance and importance. Due to the conscious decision not to include a diagnostic classification, the individual interpretation and/or classification of findings by the attending dentist must be entered on the form as free-text entries.

Discussion

Technical quality and reliability of the evaluated registrations

The field of instrumented analysis of jaw movements has undergone continuous development, especially since the introduction of electronic recording systems. In particular, the improved resolution of the sensors in the various recording systems has resulted in the improvement of signal quality. Studies conducted using this technology have confirmed the high technical and diagnostic validity and reliability of movement recordings based on specific parameters⁴.

Regarding the analysis of mandibular movements to obtain structural information about patients with a suspected diagnosis of TMJ arthropathies, controlled clinical trials confirmed the high diagnostic specificity of movement analysis. Controlled clinical trials showed that, compared to magnetic resonance imaging (MRI), mandibular movement recordings have a high specificity (>85%) for disc displacement with reduction. In comparison, the diagnostic sensitivity of mandibular movement registration followed by motion

- Eine *geradlinige und/oder verkürzte* Öffnungs- und Schließbewegung lässt an Diskusverlagerungen ohne Reposition, unter Umständen auch an arthrotische Veränderungen denken (Abb. 7).
- Eine *kaudal konvex* (invers) verlaufende Bewegungsbahn ist typischerweise mit einer fortgeschrittenen Kiefergelenkarthrose assoziiert.
- Darüber hinaus kommen irreguläre Bewegungsformen vor, die durch Strukturveränderungen im Kiefergelenkbereich und/oder ungewöhnliche Bewegungsabläufe des Unterkiefers, aber auch durch technische Artefakte bedingt sein können.

Die **Geschwindigkeit der Kondylen im Bewegungsverlauf** vermittelt einen Eindruck über die Koordination der Bewegungsausführung. Voraussetzung hierfür ist eine entsprechende Aufbereitung der beurteilungsrelevanten Messdaten mittels spezieller Software. Als Grundlage der Auswertung dient die jeweilige kondyläre Bewegungsstrecke (Translationslänge) in Bezug zur dazugehörigen Bewegungsgeschwindigkeit. Auf dieser Grundlage kann mittels moderner Software für jeden Bewegungsabschnitt die Geschwindigkeit ermittelt werden, mit der die jeweilige Öffnungs- und Schließbewegung zum gewählten Zeitpunkt erfolgt. Typischerweise erfolgt eine Zunahme der Geschwindigkeit (Beschleunigung) während der Öffnungsbewegung, gefolgt von einem Rückgang der Geschwindigkeit beim Erreichen der maximalen Öffnungsposition. Im weiteren Verlauf kommt es bei Einleitung der Kieferschließbewegung zu einem erneuten Anstieg der Geschwindigkeit, gefolgt von einem Abbremsen zum Ende der Bewegung.

Fig 5 Example of an anterior concave condylar movement path (paraocclusal registration with relaxation splint, starting from centric occlusion after initial functional therapy)-

Abb. 5 Beispiel für eine anterior konkave Bewegungsbahn (gleiche Patientin nach viermonatiger initialer Funktionstherapie, paraokklusale Aufzeichnung mit Relaxierungsschiene in zentrischer Kieferrelation).

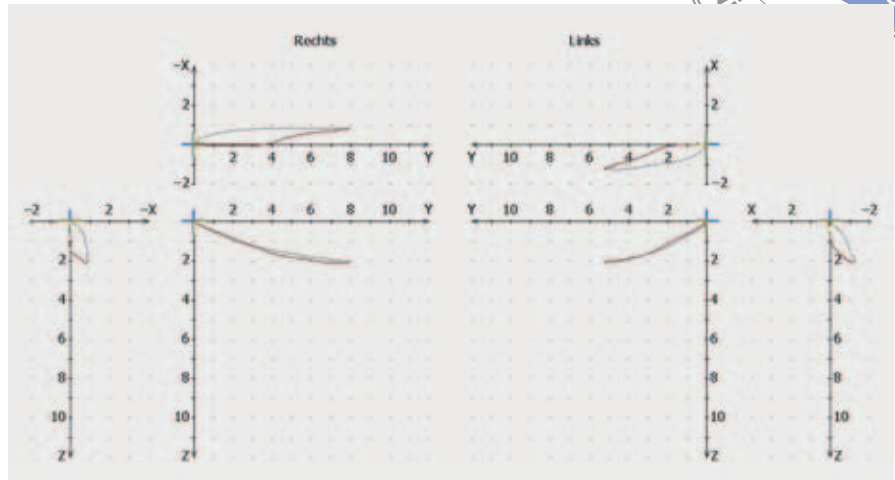


Fig 6 Example of a condylar path tracing with erratic figure-8 curvature (right-hand side).

Abb. 6 Beispiel für einen sprunghaften (8-förmigen) Bewegungsverlauf auf der rechten Kieferseite.

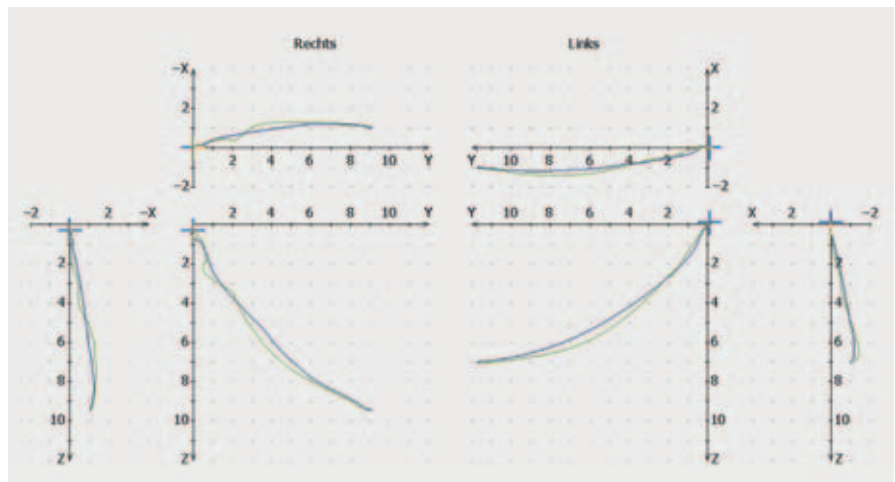
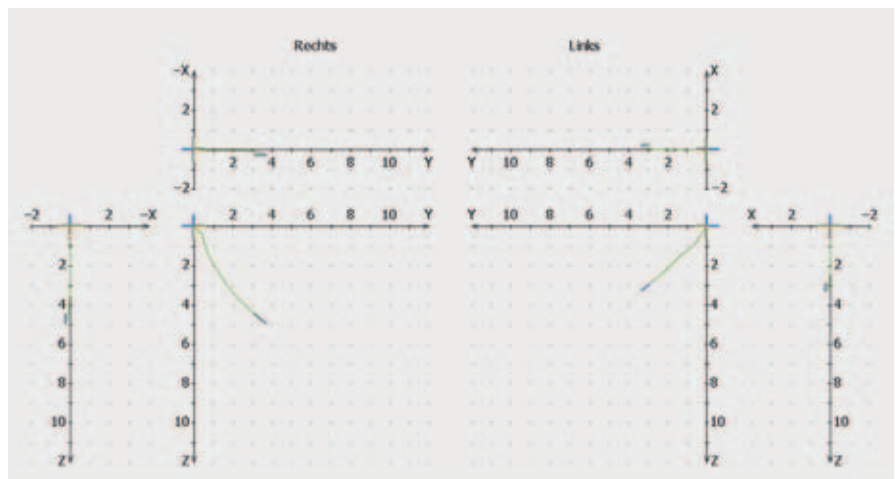


Fig 7 Example of shortened and straightened condylar path.

Abb. 7 Beispiel für eine auffällig verkürzte und zu gerade Bewegungsbahn auf der linken Kieferseite.



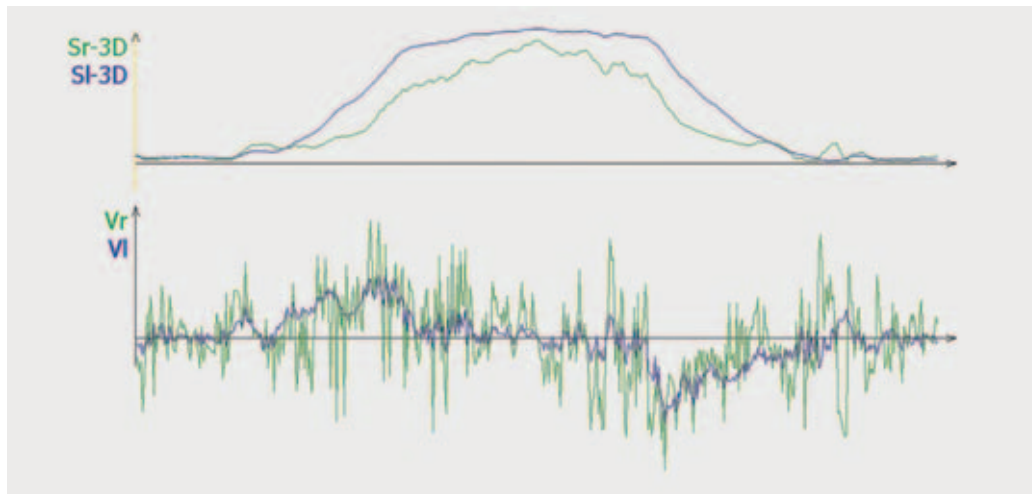


Fig 8 Example of a multi-peak condylar velocity profile at the onset of treatment (same patient as in Figs 4 and 5 before treatment). Example of a distance–time diagram which shows a multi-peak condylar velocity profile at the onset of treatment (same patient as in Figs 4 and 5 before treatment; Sr-3D/SI-3D = 3-dimensional separation of the right resp. left condyle from the calibrated starting point, Vr/VI = Velocity of the right and left condyle).

Abb. 8 Beispiel für einen mehrgipfligen Geschwindigkeitsverlauf (Patientin aus Abb. 4 und 5, zu Behandlungsbeginn). Beispiel für ein Weg-Zeit-Diagramm mit einem mehrgipfligen Geschwindigkeitsverlauf (Patientin aus Abb. 4 und 5, zu Behandlungsbeginn; Sr-3D/SI-3D = Betrag der 3-dimensionalen Strecke des rechten bzw. linken Kondylus vom kalibrierten Startpunkt, Vr/VI = Geschwindigkeit des rechten und linken Kondylus).

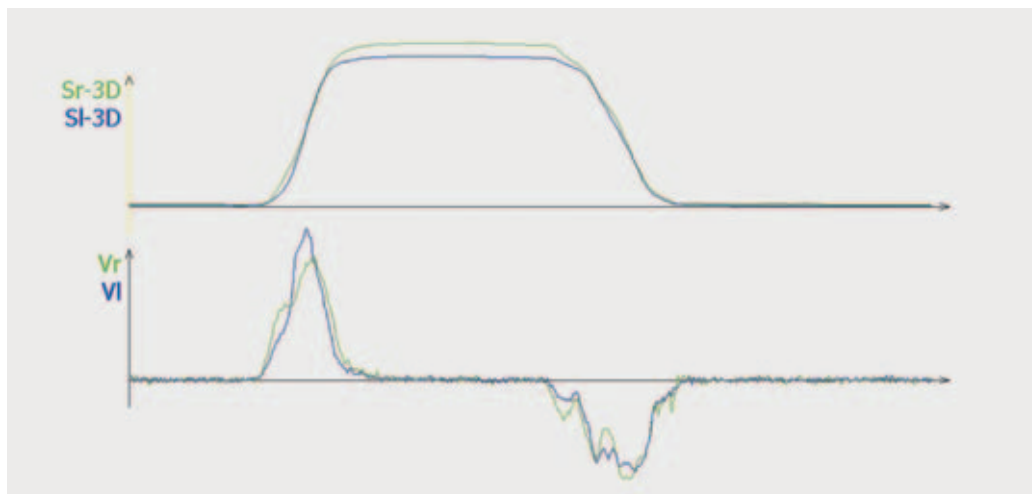
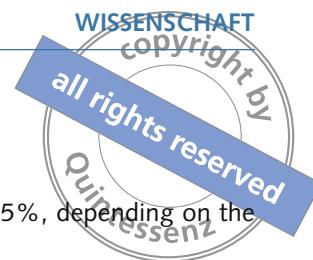


Fig 9 Example of a single-peak condylar velocity profile after initial functional therapy (same patient after initial functional therapy). Example of a distance–time diagram which shows a single-peak condylar velocity profile after initial functional therapy (same patient after initial functional therapy; 3-dimensional separation of the right resp. left condyle from the calibrated starting point, Vr/VI = Velocity of the right and left condyle).

Abb. 9 Beispiel für einen eingipfligen Geschwindigkeitsverlauf (gleiche Patientin nach initialer Funktionstherapie). Beispiel für ein Weg-Zeit-Diagramm mit einem eingipfligen Geschwindigkeitsverlauf (gleiche Patientin nach initialer Funktionstherapie; Sr-3D/SI-3D = Betrag der 3-dimensionalen Strecke des rechten bzw. linken Kondylus vom kalibrierten Startpunkt, Vr/VI = Geschwindigkeit des rechten und linken Kondylus).



Ein physiologischer Geschwindigkeitsverlauf ist durch einen weitgehend eingipfligen Verlauf der Geschwindigkeitskurve bei Kieferöffnung und Kieferschluss charakterisiert. Davon abweichend kann das kondyläre Geschwindigkeitsverhalten durch zwei- oder mehrgipflige Profile gekennzeichnet sein, jeweils bezogen auf die Kieferöffnung oder den Kieferschluss. Zwei- und mehrgipflige Geschwindigkeitsprofile weisen auf temporäre Geschwindigkeitsverluste hin, die auf arthrogene, mitunter aber auch auf myogene Probleme zurückzuführen sind (Abb. 8 und 9). Auf das rechte und/oder linke Kiefergelenk bezogene Geschwindigkeitsverluste während der Bewegungsausführung können bei wiederholtem Auftreten als Dysfunktionsmerkmale gewertet werden.

Die **Bewegungs- bzw. Kondylenkoordination** ist darüber hinaus durch einen Vergleich des Bewegungsverlaufes der Kondylen in der Frontalansicht bzw. der Aufsicht beurteilbar. Hierbei wird unterschieden zwischen

- einer weitgehenden Gleichmäßigkeit/Parallelität (Abb. 10),
- leichten/beginnenden Ungleichmäßigkeiten/Disparallelitäten und
- deutlichen, mehr oder weniger ausgeprägten Ungleichmäßigkeiten/Disparallelitäten (Abb. 11).

Bemerkungen und Auswertungen

Die abschließende Freitextoption ist hilfreich, um dem Untersucher zu ermöglichen, Bemerkungen zu Spezifika der einzelnen Bewegungsaufzeichnungen zu notieren.

Nicht Bestandteil dieses strukturierten Auswertungsprotokolls ist die Zuordnung der Befunde zu einzelnen Diagnosen, weil dies die Anwendbarkeit auf *nur ein* Diagnosesystem begrenzen würde. Dennoch kommt der Zuordnung der Befunde zu Diagnosen diagnostisch eine erhebliche Bedeutung zu. Diese bewusste Entscheidung führt dazu, dass in der Papierversion die Zuordnung der Befunde zu vorherigen Diagnosen bzw. die Korrektur vorher gestellter Diagnosen durch den behandelnden Zahnarzt als Freitext erfolgen muss.

Diskussion

Technische Qualität und Reliabilität der ausgewerteten Registrierungen

Die instrumentelle Aufzeichnung der Unterkieferbewegung hat vor allem nach Einführung elektronischer Auf-

analysis ranged from only 30% to 75%, depending on the study^{18,19}.

The high specificity in conjunction with the relatively low sensitivity implies that in the case of mandibular movement recordings suggesting a disc displacement with reduction ("positive" test result) this diagnosis is probably correct (low false-positive rate). Conversely, due to the low sensitivity (high false-negative rate), the depiction of a "normal movement" ("negative" test result) does not allow an exclusion of a disk displacement with reduction. A recent study by Marpaung et al.¹⁹ indicated that the reason for the low sensitivity was the high number of MRI diagnoses of disc displacement with reduction in clinically asymptomatic patients. However, disc displacement with reduction is clinically relevant only in the presence of clinically manifest functional disorders. Therefore, high specificity of the diagnostic method is of greater value for the avoidance of over-treatment than high sensitivity.

Technical requirements for structured analysis

Technical developments have resulted in improved capabilities for the analysis of movement patterns. Jaw movement data are no longer recorded on graph paper or stored directly in the recording equipment (eg in the Gamma Cadiax Compact 1, Gamma Dental or earlier version of ARCUSdigma, KaVo). Today, this is done using electronic recording systems with PC-based display and storage capabilities. Viewing and analysis of movement recording can thus be performed on the PC screen using device-dependent software. Besides being able to play and repeat the movement recordings, modern systems also provide options to modify the playback speed, which enhances the visual analysis of movement patterns. In addition, some systems now offer new possibilities for the analysis of jaw movements, such as the calculation of the speed of movement.

Contextual requirements for structured analysis

Jakstat¹⁸ has stressed that modern systems for mandibular movement registration provide more than enough information about the specific movement patterns, but that there is often a knowledge deficit due to the lack of standards for processing and structuring the results.

The "Diagnostic Criteria for Dysfunction" developed for the assessment of instrumented jaw movement recordings¹⁰ provided the basis for the appropriately standardized

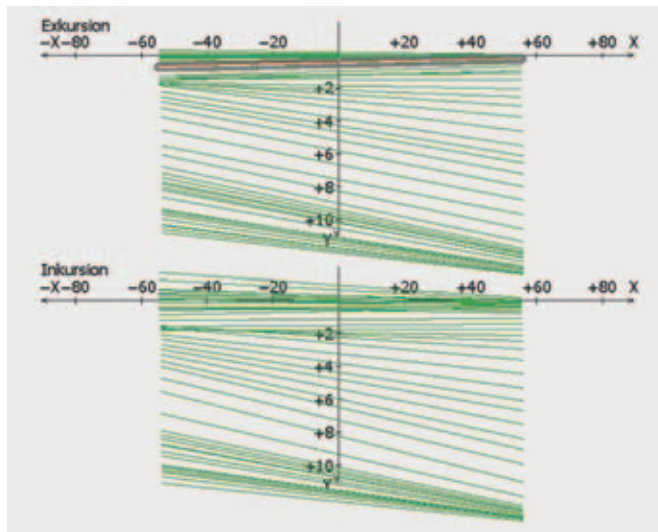


Fig 10 Example of marked non-uniformity of condylar coordination with unilateral line densification (same patient as in Figs 4 and 5 before treatment).

Abb. 10 Beispiel für eine deutliche Ungleichmäßigkeit der Kondylenkoordination mit einseitiger Linienverdichtung (Patientin aus Abb. 4 und 5, zu Behandlungsbeginn).

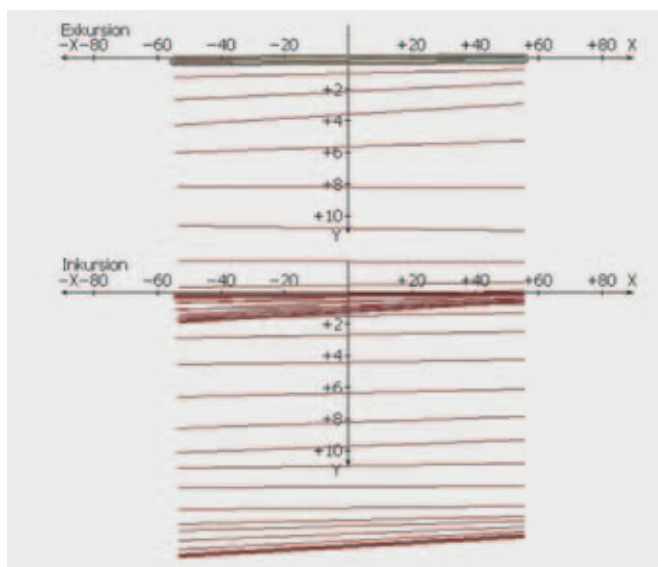


Fig 11 Example of largely uniform condylar coordination (same patient after initial functional therapy).

Abb. 11 Beispiel für eine weitgehende Gleichmäßigkeit der Kondylenkoordination (gleiche Patientin nach initialer Funktionstherapie).

zeichnungstechniken eine stetige Weiterentwicklung erfahren. Insbesondere die verbesserte Auflösung der Sensoren hat in den verschiedenen technischen Systemen eine Verbesserung der Signalqualität ermöglicht. Auf dieser Grundlage durchgeführte Studien bescheinigen Bewegungsaufzeichnungen hinsichtlich bestimmter Parameter eine hohe technische und diagnostische Validität und Reliabilität⁴.

Hinsichtlich der Analyse von Unterkieferbewegungen zur Strukturaufklärung bei Verdacht auf Arthropathien der Kiefergelenke bestätigten kontrollierte klinische Studien die hohe diagnostische *Spezifität* der Bewegungsanalyse. So konnten kontrollierte klinische Studien den Unterkieferbewegungsaufzeichnungen hinsichtlich Diskusverlagerungen mit Reposition im Vergleich zum Magnetresonanztomogramm (MRT) eine hohe Spezifität bescheinigen (> 85%). Im Vergleich dazu lagen die Werte für die diagnostische *Sensitivität* der Bewegungsaufzeichnungen mit nachfolgender Bewegungsanalyse je nach Studie nur zwischen 30% und 75%^{18,19}.

Die hohe Spezifität in Verbindung mit der relativ geringen Sensitivität hat zur Folge, dass bei Bewegungsspuren, die das klinische Bild einer Diskusverlagerung mit Reposition nahelegen („positives“ Testergebnis), eine solche Diagnose wahrscheinlich korrekt ist (geringe Falsch-Positiv-Rate). Umgekehrt erlaubt eine „unauffällige“ Bewegungsaufzeichnung („negativer“ Befund“) wegen der geringen Sensitivität (hohe Falsch-Negativ-Rate) keinen Ausschluss einer Diskusverlagerung mit Reposition. In einer aktuellen Studie von Marpaung et al.¹⁹ wurde als Ursache der niedrigen Sensitivität eine hohe Zahl von im MRT entdeckten Diskusverlagerungen mit Reposition bei klinisch symptomlosen Patienten gefunden. Da andererseits Diskusverlagerungen mit Reposition aber nur im Zusammenhang mit klinisch manifesten Funktionsstörungen relevant sind, ist eine *hohe Spezifität* der Diagnosemittel von höherem Wert für die Vermeidung von Überbehandlung als eine hohe Sensitivität.

Technische Voraussetzung zur strukturierten Auswertung

Die technische Weiterentwicklung hat zudem die Möglichkeiten zur Auswertung der Bewegungsverläufe verbessert. An die Stelle der ehemaligen Aufzeichnung der Bewegungsdaten auf Millimeterpapier oder der späteren Speicherung in den Aufzeichnungsgeräten selbst (z. B. Gamma Cadiax Compact 1, Fa. Gamma Dental; frühere



Version des ARCUSdigma, Fa. KaVo) ist mittlerweile die PC-gestützte Speicherung und Darstellung der Aufzeichnungsdaten getreten. Dadurch können die Bewegungsaufzeichnungen mittels geräteabhängiger Software am PC-Bildschirm betrachtet und analysiert werden. Dabei bestehen neben der Möglichkeit zur Wiedergabe und Wiederholung der Aufzeichnung Optionen zur Beeinflussung der Wiedergabegeschwindigkeit, was die visuelle Auswertung der Bewegungsverläufe verbessert. Hinzu kommen heute geräteabhängig neue Möglichkeiten der Auswertung, wie die Berechnung der Bewegungsgeschwindigkeit.

Inhaltliche Voraussetzungen zur strukturierten Auswertung

Jakstat²⁰ betonte daher, dass die modernen Geräte zur Aufzeichnung der Kieferbewegung mehr als genug Informationen über den jeweiligen Bewegungsverlauf lieferten. Es bestünde aber vielfach ein Erkenntnisdefizit, bedingt durch bislang fehlende Standards zur Aufbereitung und Strukturierung der Ergebnisse.

Mit der Entwicklung der „Diagnostischen Kriterien für Dysfunktion“ zur Beurteilung instrumenteller Registrierungen¹⁰ wurde die Grundlage für eine entsprechende standardisierte Aufbereitung und Auswertung von Bewegungsaufzeichnungen geschaffen. Das hier vorgestellte Konzept baut darauf auf und ermöglicht eine parametrisierte standardisierte Auswertung instrumenteller funktionsanalytischer Bewegungsaufzeichnungen.

Die gemeinsame Entwicklung im Rahmen einer multizentrischen internationalen Arbeitsgruppe schafft zudem die Voraussetzung für eine möglichst breite Akzeptanz.

Vorteile der Auswertung auf einem gedruckten Befundbogen

In der Praxis bietet die Erfassung der Information in Form des vorgestellten gedruckten Befundbogens durchaus ergonomische Vorteile. Dies liegt daran, dass bei der Analyse der Bewegungsaufzeichnungen die gerätespezifische Software in der Regel den jeweiligen PC-Bildschirm und die Steuerungswerkzeuge des PCs, also Tastatur und Maus, blockiert.

Daher bietet es sich an, zur Auswertung einen gedruckten Befundbogen zu verwenden, unterstützt von einem Block oder eingespannt in ein Klemmbrett. In Praxen mit „papierloser“ Karteiführung wird der ausgefüllte Befundbogen anschließend gescannt und im Patientenordner archiviert.

processing and analysis of mandibular movement recordings. The concept presented here is based on this foundation and enables a parameterized and standardized evaluation of mandibular movement recordings within dental functional analysis.

Joint development of the procedure in the context of an international multicenter consortium also meets the conditions for achieving the widest possible acceptance.

Benefits of a printed examination form for evaluation

The proposed printed examination form for the documentation of information and findings offers ergonomic benefits in practice because the PC screen and control devices, such as the keyboard and mouse, are usually blocked by the device-specific software while the analysis of jaw movement recordings is being performed.

Therefore, it makes sense to use a printed examination form supported by a notebook, or clamped in a clipboard. In dental practices with “paperless” patient records, the completed examination form can be scanned and stored in the patient’s folder.

Outlook for conversion to diagnostic software

The design of the proposed examination with structured assessment options (check boxes or option buttons) provides a format suitable from the onset for use in a graphical user interface. This would create the conditions needed to use the form for software-based documentation and analysis. And this, in turn, should create the conditions needed for obtaining access to expert systems.

Outlooks for diagnostic classification of the findings

In the past, a small number of (slightly differing) structured systems for diagnostic assessment and classification of clinical findings associated with craniomandibular disorders (CMDs) or temporomandibular disorders (TMDs) have been published in the literature²¹⁻²⁸. Conversely, until now a published standardized system for the structured analysis of instrumental movement recordings was lacking. Therefore, the scheme for structured analysis of jaw-movement recordings presented in this article is not only independent of specific measurement and analysis systems but is also fundamentally compatible with different diagnostic systems and – to avoid one-sided bias – does not include a diagnostic classification scheme.



When transferring the proposed evaluation protocol for jaw-movement analysis to eventually developed analysis software, it would be advisable to establish a catalog for the diagnostic classification of individual findings comparable to the existing catalog for the diagnostic classification of findings from clinical functional analysis²⁹. This could serve as the foundation for a software-based linkage of the findings to the existing diagnoses³⁰. With this rule-based analysis scheme, the results could be combined with those of other functional diagnostic tests (clinical functional analysis, manual structural analysis, MRI) to aid the dentist by presenting the information in a useful format – and as a contribution to content quality assurance.

Conflict of interest statement

This work was performed without third-party financial support. Authors of the article are also writers of the documentation form for analysis of examination results, which is shown in this article. The alternative use of other similar forms is, of course, possible and does not affect the validity of the techniques described in this article. The sole objective of the present work is to provide information on relevant content and evaluation strategies, as well as their practical implementation. Condylar movement recordings can be acquired using any suitable instrument system. The authors expressly state that the proposed analytical concept is not specifically geared towards any given manufacturer and is free from any third-party influence.

Perspektiven für die Übertragung in diagnostische Software

Die Ausgestaltung des vorgestellten Befundbogens in Form einer grafisch strukturierten Benutzeroberfläche mit Beurteilungsoptionen (Checkboxes bzw. Option-Buttons) schafft die Voraussetzung für eine Übertragung in eine softwaregestützte Dokumentation und Auswertung. Dies wiederum sollte die Möglichkeit einer Anbindung an Expertensysteme schaffen.

Perspektiven für eine Zuordnung von Befunden zu Diagnosen

Bislang mangelte es an publizierten standardisierten Systemen zur strukturierten Auswertung von Bewegungsaufzeichnungen. Im Gegensatz dazu wurden in der Literatur verschiedene strukturierte Diagnosesysteme mit einer entsprechenden Zuordnung klinischer Befunde veröffentlicht²¹⁻²⁸. Vor diesem Hintergrund ist das vorstehend vorgestellte System zur strukturierten Auswertung von Bewegungsaufzeichnungen nicht nur unabhängig von einzelnen technischen Messsystemen konzipiert, sondern grundsätzlich auch zu verschiedenen Diagnosesystemen kompatibel. Um eine einseitige Zuordnung zu vermeiden, ist daher in das Untersuchungsprotokoll selbst kein Diagnoseschema eingefügt.

Bei späteren Übertragungen des vorgestellten Auswertungsprotokolls zur Bewegungsanalyse in eine entsprechende Auswertungssoftware bietet es sich daher an, die Zuordnung der Einzelbefunde zu den Diagnosen nach dem Vorbild der klinischen Funktionsanalyse zu katalogisieren²⁹ und auf dieser Basis eine softwaregestützte Zuordnung der erhobenen Befunde zu bestehenden Diagnosen zu entwickeln³⁰. In der Folge könnte diese regelbasierte Auswertung eine Zusammenführung der Ergebnisse mit denen aus anderen funktionsdiagnostischen Untersuchungen (klinische Funktionsanalyse, manuelle Strukturanalyse, bildgebende Untersuchungen per Magnetresonanztomografie) ermöglichen, um so dem Zahnarzt durch sinnvolle Aufbereitung der Informationen zu assistieren – als Beitrag zu einer inhaltlichen Qualitätssicherung.

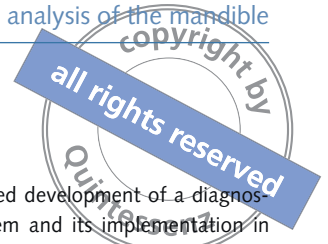
Interessenkonflikt

Die Arbeit wurde ohne finanzielle Unterstützung durch Dritte erstellt. Autoren des Beitrags sind zugleich Autoren des im Beitrag abgebildeten Befundblattes zur Auswertung der

Untersuchung. Selbstverständlich können alternativ andere vergleichbare Befundbögen verwendet werden; die im Beitrag beschriebenen Techniken sind davon nicht berührt. Das Ziel des Beitrags ist allein die Darstellung der Inhalte und Auswertungsstrategien und deren praktische Umsetzung. Für die Durchführung von Bewegungsaufzeichnungen können beliebige geeignete Instrumente eingesetzt werden. Das vorgestellte Auswertungskonzept ist ausdrücklich nicht auf die Instrumente einzelner Hersteller ausgerichtet und frei von Einflüssen Dritter. Ferner erklären die Autoren, dass die Patienten ihr Einverständnis zur Teilnahme an der vorgelegten Untersuchung dokumentiert haben.

References

- Hugger A. Gelenknahe elektronisch Erfassung der Unterkieferfunktion und ihre Umsetzung in den Artikulator: klinisch-experimentelle Untersuchungen an Probanden und Patienten. Berlin: Quintessenz, 2000.
- Slavicek R, Mack H. Der Axiograph. Inf Orthod Kieferorthop 1982;14:53–62.
- Farrar WB. Differentiation of temporomandibular joint dysfunction to simplify treatment. J Prosthet Dent 1972;28:629–636.
- Bernhardt O, Kordass B, Meyer G. The diagnostic values of computerized jaw tracking for arthrogenous temporomandibular disorders (TMDs). [Der diagnostische Wert von computergestützten Kieferbewegungsaufzeichnungen bei arthrogenen kranio-mandibulären Dysfunktionen]. CranioMand Func. 2014;6:39–50.
- Klett R. Zur Biomechanik des Kiefergelenkknackens. III: Ätiologie der zentrischen und exzentrischen Diskusluxation. Dtsch Zahnärztl Z. 1986;41:684–692.
- Kordaß B. Kopplung der Kernpantomographie des Kiefergelenkes mit computergestützten Aufzeichnungen der Kondylenbahn. Neue Aspekte für die funktionsorientierte Kiefergelenkdiagnostik und -therapie. Berlin: Quintessenz, 1996.
- Kordass B. Computer-assisted instrumental functional diagnostics – state of development, possibilities, and limits. Int J Comput Dent 2003; 5:249–269.
- Kordass B, Bernhardt O, Ratzmann A, Hugger S, Hugger A. Standard and limit values of mandibular condylar and incisal movement capacity. Int J Comput Dent 2014;17:9–20.
- Kordass B, Hugger A, Bernhardt O. Correlation between computer-assisted measurements of mandibular opening and closing movements and clinical symptoms of temporomandibular dysfunction. Int J Comput Dent 2012;15:93–107.
- Hugger A, Hugger S, Ahlers MO, Schindler HJ, Türp JC, Kordass B. Movement function of the mandible: A concept for structuring criteria for analysis and for standardizing computer-assisted recordings (Expert statement for developing Diagnostic Criteria for Dysfunction). [Die Bewegungsfunktion des Unterkiefers: Konzept zur Strukturierung von Analyse-kriterien und zur Standardisierung bei der computerunterstützten Aufzeichnung (Stellungnahme im Rahmen der Erarbeitung von Diagnostischen Kriterien für Dysfunktion)]. J CranioMandib Funct 2013;5:41–53.
- Ahlers MO, Jakstat HA, Hugger A, Türp JC, Bernhardt O, Kordass B. Befundbogen Instrumentelle Bewegungsanalyse [dentaConcept Formblätter]. Hamburg: dentaConcept 2013.
- Kordass B, Ruge S, Ratzmann A, Hugger A. Current technologies for functional diagnostics and CAD/CAM. Int J Comput Dent 2013;16:163–171.
- Kohno S. Analyse der Kondylenbewegung in der Sagittalebene. Dtsch Zahnärztl Z 1971;27:739–745.
- Naeije M. Measurement of condylar motion: a plea for the use of the condylar kinematic centre. J Oral Rehabil. 2003;30:225–30.
- Pröschel P, Feng H, Ohkawa S, Ott R, Hofmann M. Untersuchung zur Interpretation des Bewegungsverhaltens kondylärer Punkte. Dtsch Zahnärztl Z. 1993;48:323–6.
- Ahlers MO. The attachment of a paraocclusal tray adapter to the lower arch for axiography – an improved procedure. J CranioMand Func. 2009;1:241–250.
- Trulsson M, Essick GK. Mechanosensation. In: Miles TS, Nauntofte B, Svensson P (eds). Clinical Oral Physiology. Copenhagen: Quintessence, 2004:190–194.
- Kobs G. Differentialdiagnostische Aspekte bei der Beurteilung von Funktionsstörungen des stomatognathen Systems mittels elektronischer Achsiographie und Magnetresonanztomographie [Med. Diss.]. Greifswald: Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald, 2003.
- Marpaung CM, Kalaykova SI, Lobbezoo F, Naeije M. Validity of functional diagnostic examination for temporomandibular joint disc displacement with reduction. J Oral Rehabil 2014;41:243–249.
- Jakstat HA. Computer und CMD – was wünscht sich der Zahnarzt – was gibt es schon? Deutsche Gesellschaft für Funktionsdiagnostik und -therapie (DGFD), 42 Jahrestagung; Bad Homburg: Deutsche Gesellschaft für Funktionsdiagnostik und -therapie (DGFD) 04.05.2009.
- American Academy of Orofacial Pain Guidelines Committee. Okeson JP (ed). Diagnostic Classification of Orofacial Pain Disorders. In: The American Academy of Orofacial Pain. Orofacial Pain – Guidelines for Assessment, Classification, and Management. Carol Stream, Illinois: Quintessence, 1996:45–52.
- Freesmeyer WB. Zahnärztliche Funktionstherapie. München: Hanser, 1993.
- Fuhr K, Reiber T. Klinische Funktionsdiagnostik. In: Koeck B (ed). Funktionsstörungen des Kauorgans. Praxis der Zahnheilkunde 8, ed 3. München: Urban & Schwarzenberg; 1995;75:113.
- Headache Classification Committee of the International Headache Society. Olesen J (ed). Classification and diagnostic criteria for headache disorders, cranial neuralgias and facial pain. Cephalalgia. 1988;8(7, suppl).
- Okeson JP. Management of Temporomandibular Disorders and Occlusion, ed 7. St Louis: Mosby, 2012.



26. Dworkin SF. Research Diagnostic criteria for Temporomandibular Disorders: current status and future relevance. *J Oral Rehabil* 2010;37:734–743.
27. Dworkin SF, LeResche L. Research diagnostic criteria for temporomandibular disorders: review, criteria, examinations and specifications, critique. *J Craniomandib Disord* 1992;6:301–355.
28. Jakstat HA, Ahlers MO. Initialdiagnosen bei CMD. In: Ahlers MO, Jakstat HA (eds). *Klinische Funktionsanalyse • Manuelle Strukturanalyse • Interdisziplinäre Diagnostik*. dentaConcept Arbeitsbücher, ed 4. Hamburg: dentaConcept, 2011:329–364.
29. Ahlers MO, Jakstat HA. Auswertung und Prinzip der Diagnostik. In: Ahlers MO, Jakstat HA (eds). *Klinische Funktionsanalyse • Manuelle Strukturanalyse • Interdisziplinäre Diagnostik*. dentaConcept-Arbeitsbücher, ed 4. Hamburg: dentaConcept, 2011:317–328.
30. Ahlers MO, Jakstat HA. Evidence-based development of a diagnosis-dependent therapy-planning system and its implementation in modern diagnostic software. *Int J Comput Dent* 2005;8:203–219.

Address/Adresse

Priv.-Doz. Dr. M. Oliver Ahlers
CMD-Centrum Hamburg-Eppendorf
Falkenried 88 (CiM, Haus C, 3. OG)
20251 Hamburg
E-Mail: oliver.ahlers@cmd-centrum.de