

2. Patienten und Methoden

2.1 Auswahl der Patienten bzw. Probanden

In dem Untersuchungszeitraum vom Juli 2003 bis zum Juli 2004 wurden 47 Kiefergelenke ($n = 47$) von 39 Studienteilnehmern untersucht. Die untersuchten Kiefergelenke gliedern sich in zwei Gruppen, die zusammen ausgewertet wurden.

Alle Studienteilnehmer wurden vor Beginn der Untersuchung mittels eines Aufklärungsbogens mit Einwilligungserklärung und eines persönlichen Gesprächs über die Risiken und mögliche Komplikationen aufgeklärt.

Patienten

Bei dieser Gruppe handelt es sich um Patienten, die aufgrund von Kiefergelenkbeschwerden von niedergelassenen Zahnärzten oder aus einer der beiden Zahnkliniken zur Kiefergelenkdiagnostik im MRT in die Radiologie überwiesen wurden. Die Untersuchung erfolgte während des klinischen Routinebetriebs. Für die Aufnahmen im 1,5-T-MRT wurde das Standard-Sequenzprotokoll des 1,5-T-Systems zur Kiefergelenksdiagnostik verwendet.

Probanden

Bei dieser Gruppe handelt es sich um Kiefergelenke von Studenten aus der Zahnklinik. Die Studenten haben sich freiwillig zu dieser Studie gemeldet. Die Probanden wurden außerhalb des Klinikbetriebs unter nahezu optimalen Bedingungen ohne Zeitdruck an bestimmten Studienterminen untersucht. Für die MR-Aufnahmen dieser Gruppe wurden die Standard-Sequenzen des 1,5-T-MRT optimiert, um nochmals eine Bildqualitätssteigerung zu erhalten.

Die Kiefergelenke der Probandengruppe waren zum größten Teil symptomlos. Zwar klagten einige über gelegentliche Kiefergelenkgeräusche wie Knacken oder Reiben, jedoch hatte keiner der Untersuchungsteilnehmer akute Schmerzzustände.

2.2 Apparative Ausstattung

2.2.1 Die Magnetresonanztomographen

MR-Signa[®] 3.0 T Excite[™]

Der Magnetresonanztomograph ist von der Firma General Electric Company (GE), Milwaukee, Wisconsin, USA. Hierbei handelt es sich um das Modell MR-Signa[®] 3.0 T Excite[™]. Dieses Gerät hat einen Kompaktmagneten der Magnetfeldstärke 3,0 Tesla. Es besteht aus [41]:

- Gradientenspulen zum Erzeugen des Gradientenmagnetfeldes während der Aufnahme (Steilheitswert des Feldgradienten 40 mT/m und Anstiegsrate 150 mT/m/ms)
- Hauptspulen, die aus einem in eine Kupfermatrix eingebetteten Draht aus Niobtitan (NbTi) gefertigt sind.
- Kryogene, die zum Kühlen verwendet werden
- Shim-Spulen zum Ausgleichen von Inhomogenitäten im Hauptmagnetfeld
- HF-Spulen zum Erzeugen des HF-Feldes während der Aufnahme

1.5 T Signa[®] Twin Speed with Excite

Das 1,5-T-System ist ein Kernspintomograph des Modells 1.5 T Signa[®] Twin Speed with Excite der Firma General Electric Company (GE), Milwaukee, Wisconsin, USA. Bei diesem Gerät handelt es sich um einen Magnetresonanztomographen mit einem Kompaktmagneten der Magnetfeldstärke 1,5 Tesla.

Um die Ausdehnung seines Streufeldes zu reduzieren, sind beide Geräte durch die integrierte Abschirmung und durch die Wände des Magnetraumes ähnlich gut abgeschirmt. Dies ist wichtig, um für den Vergleich der beiden Systeme möglichst identische Bedingungen zu erreichen.

2.2.2 Oberflächenspulen

4-cm-Oberflächenspule für MR-Signa[®] 3.0T

Die 4-cm-Oberflächenspule (Abb. 7) wurde von der Firma Rapid Biomedical GmbH aus Würzburg für das GE MR-Signa[®] 3.0 T entwickelt. Sie ist eine Oberflächenspule mit der

Frequenz 127,7 MHz, die speziell für Strukturen, die sehr nah an der Körperoberfläche lokalisiert sind, entworfen wurde. Sie weist in den ersten vier Zentimetern Eindringtiefe, im Vergleich zur 3-Zoll-Oberflächenspule, ein höheres Signal-Rausch-Verhältnis auf (siehe Abb. 21). Da das Kiefergelenk ein kleines Gelenk (1-2 cm Größe) ist und 2-3 cm unterhalb der Hautoberfläche liegt [34], ist es genau im optimalen Empfangsbereich der Spule lokalisiert.



Abb. 7: 4-cm-Oberflächenspule

3-Zoll runde Oberflächenspule für 1.5 T Signa®

Bei der Oberflächenspule, die für die Kiefergelenkaufnahmen im 1,5-Tesla-MRT benutzt wurde, handelt es sich um eine runde Phased-Array-Doppelspule, die einen Durchmesser von 3 Zoll hat.

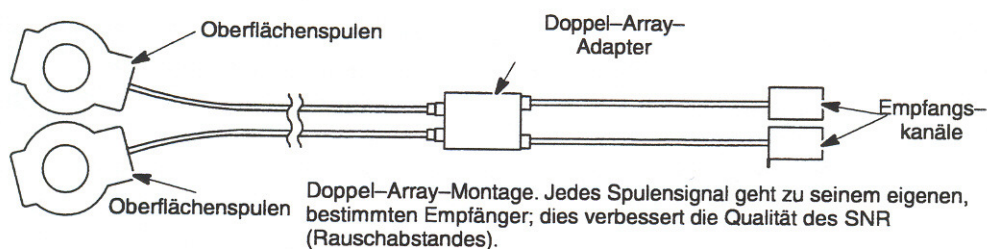


Abb. 8: Skizze der Doppel-Array-Montage [42]

Die runden Spulen sind Oberflächenspulen, die sich speziell für Bildaufnahmen eignen, bei denen die zu untersuchende Struktur nahe an der Hautoberfläche (Kiefergelenk, Handgelenk, Orbita etc.) liegt. Die kleineren Spulen ermöglichen einen verbesserten

Rauschabstand (SNR). Bei der Doppelarraymontage (Abb. 8) geht jedes Spulensignal zu seinem eigenen bestimmten Empfänger, was zusätzlich das Signal-Rausch-Verhältnis verbessert. Die Empfangskanäle werden in den Phased-Array-Anschluss des Schlittendeckels eingesteckt. Die Doppelspulen sind auf die Positioniervorrichtung (siehe Abb. 9) montiert und können nun so nah wie möglich an den Untersuchungsbereich positioniert werden. Bei der Phased-Array-Doppelspule ist darauf zu achten, dass die beiden Felder der Eindringtiefe sich nicht überschneiden. Falls Sie sich überschneiden, wird in diesem Bereich der Rauschabstand verringert.

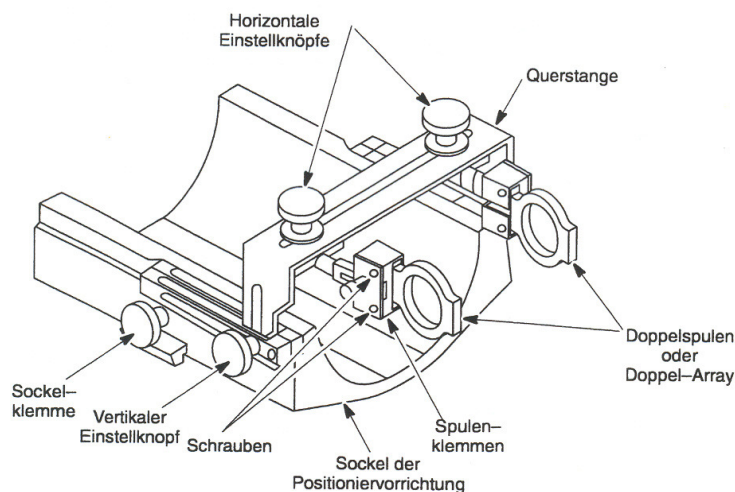


Abb. 9: Positioniervorrichtung mit Doppelspulen [42]

2.3 Voruntersuchungen

In den Voruntersuchen wurden die Untersuchungsparameter für das MR-Signa[®] 3.0 T Excite[™] mit der 4-cm-Oberflächenspule festgelegt.

Es wurden die Messungen des Rauschabstandes an der 16-cm-Phantomkugel (Abb. 10 a) durchgeführt. Im 3,0-T-MRT wurde die 4-cm-Oberflächenspule auf die Phantomkugel aufgeklebt. Im 1,5-T-System erfolgten die Aufnahmen mit den 3-Zoll-Oberflächenspulen und der Montagevorrichtung. Die Aufnahmen wurden auf einem PACS (Picture Archiving & Communication System) (Marvin) gespeichert und zu einem späteren Zeitpunkt mit Hilfe der Auswertungs- und Bildbetrachtungssoftware Centricity[®] bearbeitet. Zur Messung des SNR wurde, jeweils nach 5 mm Eindringtiefe, das Signal ermittelt (Abb. 11). Zusätzlich wurde das Rauschen an einem festgelegten Bildpunkt außerhalb der Phantomkugel bestimmt. Das SNR errechnet sich dann aus der

Gleichung [43]:

$$\text{SNR} = \text{mean SI}_{\text{alle 5 mm}} / \text{SD}_{\text{Luft}} \quad (\text{SI} = \text{Signalintensität}; \text{SD} = \text{Standardabweichung})$$

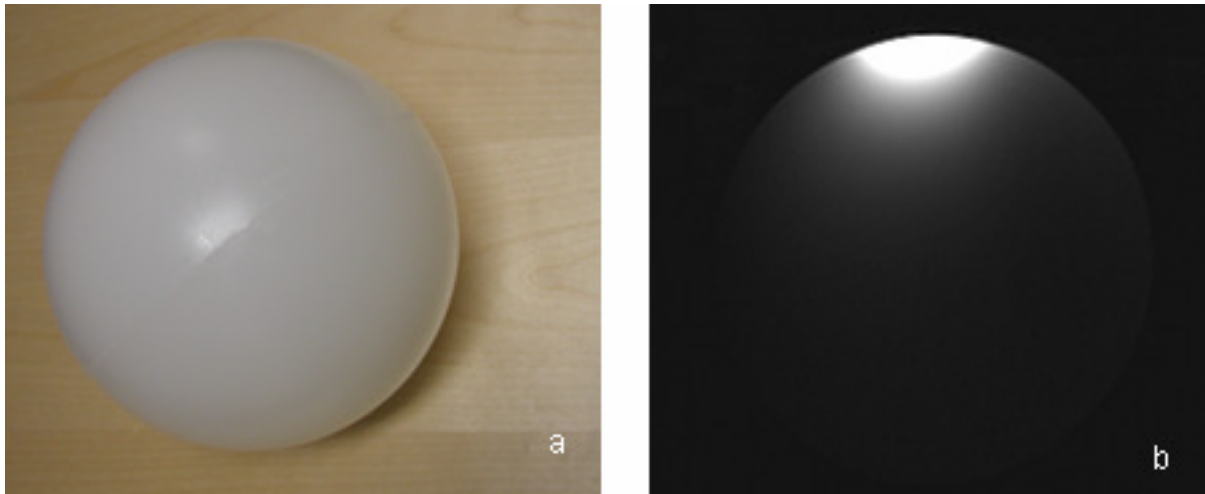


Abb. 10: a) 16-cm-Phantomkugel b) MR-Aufnahme der Phantomkugel für die SNR-Messung

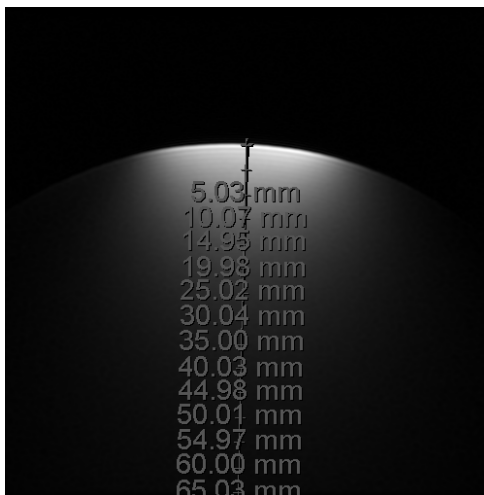


Abb. 11: Darstellung der SNR-Messung an der 16-cm-Phantomkugel

Befestigung der 4-cm-Oberflächenspule

Die Befestigungsmethode der 4-cm-Oberflächenspule auf der Hautoberfläche in naher Lagebeziehung zum Kiefergelenk bei maximaler Mundöffnung und in Ruheschwebelage wurde entwickelt. Die besten Ergebnisse wurden durch ein direktes Auflegen der Oberflächen auf die Hautoberfläche erzielt. Zur Fixierung dienten Zellstoff und Klebeband.

Fixierung des Unterkiefers

Für die Fixierung des Unterkiefers bei maximaler Mundöffnung wurde ein Beißkeil, hergestellt im zahntechnischen Labor der Zahnklinik der Charité CVK, aus PMMA verwendet. Dieser Beißkeil verursachte keine Artefakte durch Störung der Homogenität des Magnetfeldes. Ziel war es, den Unterkiefer so in der maximal möglichen Mundöffnung zu fixieren, dass es zu keinen Bewegungsartefakten kam. Bei maximaler Mundöffnung wurde der Beißkeil entlang der Zahnreihen so weit wie möglich nach dorsal geschoben. Der Unterkiefer war nun fixiert und die maximale Mundöffnung konnte jederzeit reproduziert werden. Der Beißkeil aus PMMA (siehe Abb. 12 b) erwies sich als sehr praktikabel.

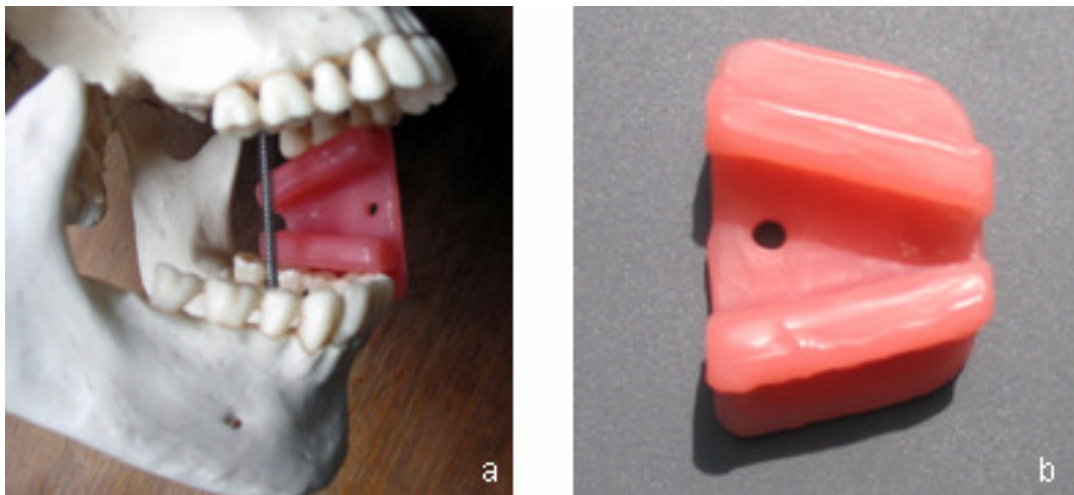


Abb. 12: a) Darstellung des Beißkeils „in situ“, b) Beißkeil aus PMMA

Kalibrierung der Untersucher

Für das Auswerten der Kiefergelenksaufnahmen anhand des Auswertungsbogens war es wichtig, die Untersucher zu kalibrieren. Für die Kalibrierung wurde ein Kiefergelenk gemeinsam befundet und etwaige Unklarheiten wurden gemeinsam geklärt. Die spätere Gesamtauswertung erfolgte jedoch unabhängig voneinander, zeitlich und räumlich getrennt.

2.4 Hauptuntersuchungen

2.4.1 Untersuchungsparameter im 3,0-T- und 1,5-T-MRT

Nach wissenschaftlichen Studien von Vogl, Rammelsberg, Marquardt und Hugger

wurden folgende Untersuchungsparameter favorisiert [4, 13, 44, 45]:

- die Schichtebenen: schrägsagittal und schrägcoronar.
- Unterkieferstellung: Ruheschwebelage und maximale Mundöffnung.

Für die sagittalen und coronaren Schichten wurden folgende Untersuchungsparameter ermittelt (siehe Tab. 1 und 2).

Für den Vergleich von 1,5 T und 3,0 T wurden die Sequenzen im 3,0-T-MRT optimiert. Schwerpunkt bei der Sequenzerstellung war, ein möglichst hohes SNR bei besserer oder gleicher Bildqualität zu bekommen, ohne die Messzeit im Vergleich zum 1,5 T zu erhöhen. Es wurde das FOV auf 10 x 10 cm festgelegt, eine möglichst kleine Schichtdicke (2 mm) und ein geringer Abstand zwischen den Schichten (0,3 mm) gewählt. Die Receiver-Bandbreite wurde im 3,0 T halbiert (1,5 T: 61,05; 3,0 T: 30,52). Die „Echo train length“ wurde von 6 auf 8 erhöht und die „Number of excitations“ (NEX) von 2 auf 4 verdoppelt. Durch diese Veränderungen wurde ein sehr hohes Signal-Rausch-Verhältnis bei niedriger Messzeit erzielt. Trotz kleinerer Schichtdicke (3,0 T: 2,0 mm; 1,5 T: 2,3 mm) und längerer TE (3,0 T: 42,50 ms; 1,5 T: 20 ms) ist das SNR im 3,0 T deutlich höher als im 1,5 T. Die Messmatrix wurde auf 512^2 interpoliert. Auch die PD- und T1-gewichteten Aufnahmen des 1,5 T sind auf diese Bildauflösung hochgerechnet worden. So wurde bei den protonengewichteten Aufnahmen eine isotrope Pixelkantenlänge von ca. 0,2 x 0,2 mm erreicht. Bei den T1-gewichteten Aufnahmen lag die Kantenlänge der Pixel bei 0,47 mm x 0,47 mm. Diese T1-Sequenz war Bestandteil der klinischen Standardsequenzen für die coronare Projektion (Abb.: 13).

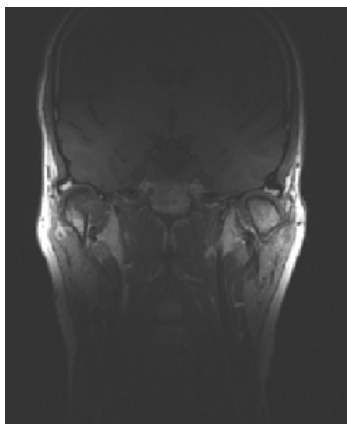


Abb. 13: 1,5-T-MRT-Aufnahme in coronarer Projektion FOV 24 x 24 cm

Sie fand somit auch für die Kiefergelenksaufnahmen in der Patientengruppe Verwendung. Da die Auflösung bei einem FOV von 24 x 24 cm niedrig war, mussten für eine bessere Bildauflösung die coronaren Sequenzen optimiert werden.

In der Probandengruppe wurden die coronaren Projektionen mit dieser optimierten PD-gewichteten Sequenz und einem FOV von 10 x 10 cm akquiriert. So erhielt man ebenfalls eine Voxelkantenlänge von 0,2 mm x 0,2 mm.

Tab. 1: Untersuchungsparameter für 3,0-T-MRT

| | |
|-----------------------------|--|
| Spule | 4-cm-Oberflächenspule (Augenspule) 127,7 MHz |
| Pulssequenz | Fast-Spin-Echo |
| Modus | 2D |
| Grade Mode | Zoom |
| Field of view | 10 x 10 cm |
| Schichtdicke | 2,0 mm |
| Anzahl der Schichten | 13 |
| Raum zwischen den Schichten | 0,3 mm |
| Messmatrix | Interpoliert auf 512 ² |
| Kantenlänge der Voxel | 0,2 x 0,2 mm |
| Wichtung | Protonendichte |
| Messzeit | 3:17 min |
| Echo time (TE) | 42,50 ms |
| Repetition time (TR) | 2400,0 ms |
| Echo train length | 8 |
| Bandwidth | 30,52 Hz |
| Frequenz | 192 Hz |
| Phase | 160 |
| NEX | 4 |
| Auto Center Frequency | water |
| No phase wrap | ja |
| Tailored RF | ja |
| Extended Dynamic Range | ja |
| Autoshim | ja |
| Flip angle | 90° |
| Variable Bandwidth | ja |
| Fettsättigung | ja |

Tab. 2: Untersuchungsparameter für 1,5 T Signa® Twin Speed (klinische Standard-Sequenzen)

| Untersuchungsparameter für das 1,5-T-System | Standard Sequenzen PD-gewichtet für die sagittale Projektion | Standard Sequenzprotokoll für die coronaren Aufnahmen |
|--|---|--|
| Spule | 3-Zoll runde Oberflächenspule für 1.5 T Signa®, Doppelarraymontage | |
| Schichtebene | schrägsagittal, schrägcoronar | schrägcoronar |
| Pulssequenz | Fast-Spin-Echo | Spin-Echo |
| Modus | 2D | 2D |
| Field of view | 10 x 10 cm | 24 x 24 cm |
| Schichtdicke | 2,3 mm | 3,0 mm |
| Anzahl der Schichten | 18 | 15 |
| Raum zwischen Schichten | 0,3 mm | 0,0 mm |
| Messmatrix | 320 x 224 Pixel | 320 x 224 Pixel |
| Interpoliert auf 512 ² | ja | ja |
| Kantenlänge der Voxel | 0,2 x 0,2 mm | 0,47 x 0,47 mm |
| Wichtung | Protonendichte | T1 |
| Messzeit | beidseitig 6:39 Minuten | 1:21 Minuten |
| Echo time (TE) | 20 ms | 8,0 ms |
| Repetition time (TR) | 2360,0 ms | 420,0 ms |
| Echo train length | 6 | 0 |
| Bandwidth | 61,05 Hz | 61,06 Hz |
| Frequenz | 320 Hz | 320 Hz |
| Phase | 224 | 224 |
| NEX | 2 | 1 |
| No phase wrap | ja | - |
| Tailored RF | ja | - |
| Flip angle | 90° | 81° |
| Variable Bandwidth | ja | ja |
| Fettsättigung | ja | nein |

2.4.2 Untersuchungstechnik im 3,0-T- und 1,5-T-MRT

Nachdem der Untersuchungsteilnehmer alle metallhaltigen Gegenstände vom Körper entfernt hatte, wurde er in Rückenlage auf den beweglichen Untersuchungstisch des MRT positioniert. Die Lage des Condylus wurde mittels Palpation durch den Untersucher durch Öffnungs- und Schließbewegungen ermittelt. Als Anhaltspunkt in der Ruheschwebelage galt der anteriore Rand des Porus acusticus externus. Der Condylus musste genau im Zentrum der Oberflächenspulen liegen und der Spulenschaft wurde parallel zum Magneten ausgerichtet. War die Spule richtig positioniert (Abb. 14), wurde sie fixiert. Für die MR-Aufnahmen in max. Mundöffnung im 3,0-T-MRT wurde die 4-cm-Oberflächenspule nachpositioniert. Nach der korrekten Positionierung wurde nun der Proband/Patient in den Magneten des MRT gefahren und es konnte mit der Datenakquisition begonnen werden.



Abb. 14: Proband mit positionierter Oberflächenspule

Der erste Scanvorgang war der „Localizer“. Dies ist eine T1-gewichtete Sequenz mit großem FOV. Durch die transversale Scout-Schicht wurden zunächst die beiden Condylen und die Processi coronoidei visualisiert. Dies geschah in der Ruheschwebelage. Die parasagittalen Schichten wurden senkrecht zur Condylusachse, also ventral ca. 30° zur Mittsagittalen, anguliert. Als Referenzpunkte („Landmarken“) für die Angulierung dienten der Processus coronoideus und der Condylus (siehe Abb. 15).

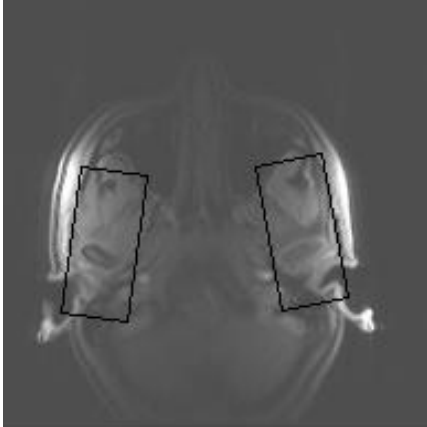


Abb. 15: Darstellung der Angulierung der sagittalen Schichtstapel in der Localizer-Aufnahme

Nachdem die sagittalen Schichten aufgenommen worden sind, wurden in der transversalen Scout-Schicht die coronaren Schichtebenen festgelegt. Sie wurden mit Hilfe der sagittalen Schichten senkrecht auf den Verlauf des Discus articularis gelegt und orthogonal zu den sagittalen Schichten positioniert. Dies ermöglichte die Erkennung von Seitabweichung und Rotationsdislokationen [13]. Die Sequenzparameter waren für die coronare Messung in der Probandengruppe identisch mit dem Sequenzprotokoll für die sagittalen Messungen (siehe Abb. 16).

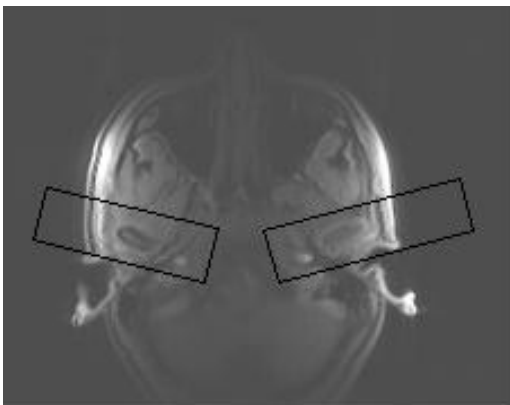


Abb. 16: Darstellung der coronaren Schichtstapel

Die Aufnahmen aus der Gruppe der Patienten wurden innerhalb des klinischen Alltagsbetriebs mit dem Standard-Sequenzprotokoll für Kiefergelenksaufnahmen angefertigt. Dieses Standardprotokoll sah für die coronaren Projektionen eine T1-gewichtete Spin-Echo-Sequenz vor. In dieser Sequenz war das FOV sehr groß (24 x 24 cm) und ermöglichte eine Detailerkennung nur bedingt. Deswegen wurde das Sequenzprotokoll leicht optimiert und für die Probandengruppe verwendet. Hierbei

wurden auch die coronaren Aufnahmen mit einer PD-gewichteten Sequenz aufgenommen.

Als die Messungen in der Ruheschwebelage abgeschlossen waren, wurde der Untersuchungsteilnehmer aus dem Magneten bis zum Ausrichtungslicht gefahren und aufgefordert, den Mund maximal zu öffnen und diese Unterkieferposition mit Hilfe des Beißkeils fixiert.

Da der Patient/Proband den Unterkiefer auf dem Beißkeil in maximaler Mundöffnung abstützen konnte, kam es zu weniger Bewegungsartefakten, die durch angestrengte Muskelkontraktionen für die maximale Mundöffnung verursacht werden konnten. Allerdings lief durch die liegende Position der Speichel nach dorsal und es kam zu leichten Bewegungsartefakten durch das Schlucken. Im weiteren Vorgehen wurde durch die Localizer-Aufnahme die neue Lage der Condylen, die durch die Mundöffnung entstanden war, visualisiert und die Lage der sagittalen und coronaren Schichtstapel festgelegt. Die Lagebestimmung der Schichten erfolgte analog der Aufnahmen in Ruheschwebelage.

Auf eine i. v. Gabe von Kontrastmittel wurde bewusst verzichtet. Bei den Patientenfällen, die im Rahmen dieser Arbeit untersucht wurden, lag der Verdacht auf diskoligamentäre Dysfunktionen oder Gelenkbinnenläsionen vor, so dass eine Gabe von Kontrastmittel nicht notwendig war. Allerdings sollte bei allen Formen von entzündlichen Gelenkerkrankungen und zum Ausschluss von tumorösen Veränderungen ein Kontrastmittel appliziert werden [13].

2.4.3 Vorbereitung und Auswertung der Kiefergelenksaufnahmen

Vorbereitung Bilder

Ziel dieser Studie ist der Vergleich von diagnostischen Kiefergelenksaufnahmen im 1,5-T-MRT und im 3,0-T-MRT. Um eine Beeinflussung der Auswerter zu vermeiden, wurden die Aufnahmen anonymisiert und als DICOM-Bilder in PowerPoint®-Präsentationen (Microsoft Corp., Redmond, Washington, USA) eingearbeitet. Mit Hilfe des Programms „DICOM for PowerPoint“ [46] gelang es, die DICOM-Bilder aus dem radiologischen Bild- und Befundarchiv „Marvin“ der Strahlenklinik des CVK in die PowerPoint-Folien einzuarbeiten. Dieses Programm konvertiert 12- oder 16-bit DICOM-

Dateien in 8-bit Graphik-Dateien. Die Untersucher hatten nun individuell die Möglichkeit, die Bilderserie durchzublätern, einzelne Bereiche zu vergrößern, Kontraste zu optimieren und/oder die Beschriftung der Bilder sichtbar zu machen.

1,5-T- und 3,0-T-Aufnahmen wurden identisch präsentiert. War es notwendig die Bilder genau zu identifizieren, konnte durch Verschieben des DICOM-Bildes auf der PowerPoint-Folie die Identifikationskennung sichtbar gemacht werden (siehe Abb. 17 a u. b). Die entsprechenden Bewertungen wurden in eine Exceltabelle eingetragen.

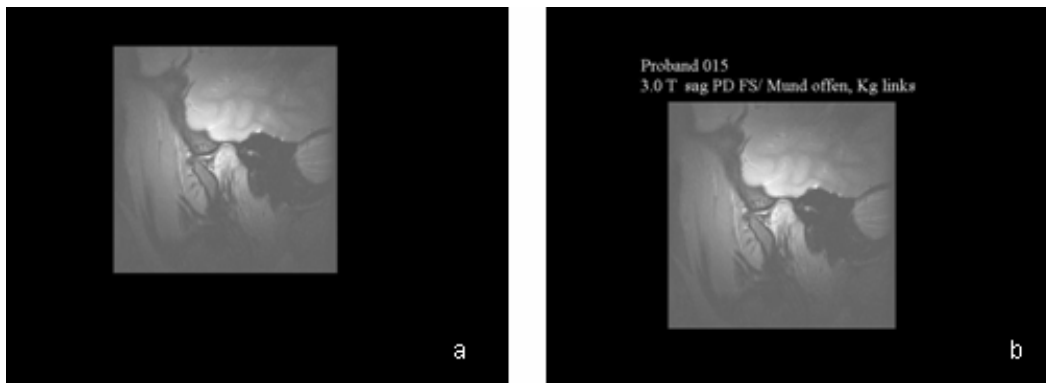


Abb. 17: a) PowerPoint-Folie zur Auswertung (Identifikationskennung verdeckt), b) PowerPoint-Folie (Identifikationskennung freigelegt)

2.4.4 Auswertungsbogen

Der Auswertungsbogen wurde mit dem Microsoft Computerprogramm Excel[®] (Microsoft Corp., Redmond, Washington, USA) erstellt und gliedert sich in vier Bewertungsabschnitte. Im ersten Teil bewerteten die Untersucher, die zu erkennenden anatomischen Strukturen des Kiefergelenks mittels einer numerischen Skala. Im zweiten Teil wurde der Gesamteindruck der Bildqualität beurteilt, im dritten Teil wurde das SNR gemessen und im vierten Teil lag der Schwerpunkt in der Diagnostik. Diese vier Auswertungsteile wurden für die Untersuchung im 1,5-T- und 3,0-T-MRT (sagittale und coronare Projektion) in Ruheschwebelage und in maximaler Mundöffnung durchgeführt.

Die Bewertungen wurden von zwei Ärzten, einem Radiologen und einem Zahnarzt, zeitlich und räumlich getrennt durchgeführt.

Erster Auswertungsteil

In der **sagittalen Projektion** wurden knöcherne Strukturen (Tuberculum articulare, Fossa mandibularis, Processus condylaris), Discus articularis (anterior Diskuspol, posteriorer Diskuspol, Intermediärzone), Bilaminäre Zone (oberes Blatt, unteres Blatt), Capsula articularis, muskuläre Strukturen (Musculus pterygoideus lateralis Caput superior, M. pterygoideus lateralis Caput inferior), Gelenkknorpel (temporale Gelenkfläche, mandibuläre Gelenkfläche) und Gelenkkompartiment (oberer Gelenkspalt, unterer Gelenkspalt) beurteilt.

Analog wurden in der **coronaren Projektion** knöcherne Strukturen (Tuberculum articulare, Fossa mandibularis, Processus condylaris), Discus articularis (anteriorer Diskuspol, posteriorer Diskuspol, Intermediärzone), Ligamentäre Strukturen (Lig. laterale, mediales attachment), Gelenkkompartiment (oberer Gelenkspalt, unterer Gelenkspalt), muskuläre Strukturen (Musculus pterygoideus lateralis Caput superior, M. pterygoideus lateralis Caput inferior, M. masseter) und Gelenkknorpel (temporale Gelenkfläche, mandibuläre Gelenkfläche) bewertet.

Diese Strukturen sind mit folgendem Bewertungsschema eingeteilt worden (Tab. 3).

Tab. 3: Bewertungsschema für die anatomischen Strukturen

| |
|---|
| 0 = Identifikation und Differenzierung nicht möglich |
| 1 = Identifikation und Differenzierung ist schwer (unsicher) |
| 2 = ist identifizierbar, die Differenzierung ist schwer |
| 3 = gut identifizierbar, Differenzierung nicht an der gesamten Oberfläche |
| 4 = sehr gut identifizierbar und sehr gut differenzierbar |

Zweiter Auswertungsteil

Beurteilung der Bildqualität bei sagittaler und coronarer Projektion, jeweils in Ruheschwebelage und maximaler Mundöffnung. Bei diesem Auswertungsteil wurde nur der qualitative Bildeindruck insgesamt beurteilt. Die Differenzierung erfolgte mit folgendem Bewertungsschema (Tab. 4):

Tab. 4: Bewertungsschema des Gesamteindrucks der Bildqualität

| |
|--|
| 0 = starke Artefakte (keine diagnostische Aussage möglich) |
| 1 = schlechte Bildqualität (diagnostische Information ist eingeschränkt) |
| 2 = befriedigend (diagnostische Information ist vorhanden) |
| 3 = gute Qualität (geringe Einschränkungen durch Artefakte) |
| 4 = sehr gut (kleine Artefakte) |
| 5 = exzellent |

Dritter Auswertungsteil

Als objektiv bestimmbares Bewertungskriterium der Bildqualität wurde das Verhältnis von Signal zu Rauschen (SNR) gemessen. Dazu wurden zwei Messungen im Bildbearbeitungsprogramm „Centricity“ durchgeführt. Für die erste Messung wurde die Bildschicht ausgewählt, in der der Diskus den größten Umfang aufweist (sagittal und auch coronar). In dieser Schicht konnte nun im Zentrum des Diskus mit dem ROI (engl.: Region of Interest), ein kleiner Kreis von der Fläche ca. 0,4 mm², der den Messbereich markierte, die durchschnittliche Signalintensität (SI) gemessen werden. In der zweiten Messung wurde das ROI in den äußeren Gehörgang (Luft) platziert und dort die Standardabweichung (SD) gemessen. Das SNR wird nach folgenden Formel berechnet [43]: $SNR = \text{mean SI}_{\text{Discus articularis}} / SD_{\text{Luft}}$.

Diese Messung erfolgte bei jedem Kiefergelenk in jeder Stellung und in jeder Projektion (siehe Abb. 18 a und b).

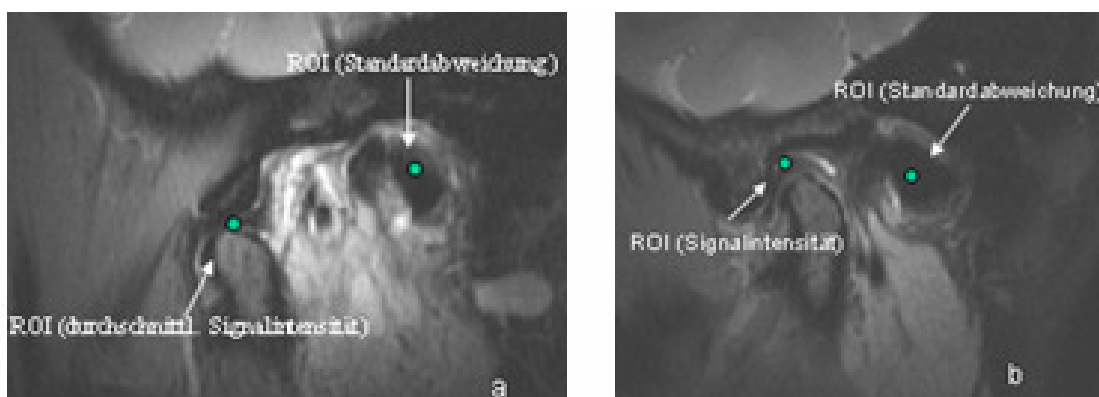


Abb. 18: a) MR-Aufnahme mit „ROI“ für die SNR-Messung in max. Mundöffnung. b) in Ruheschwebelage

Vierter Auswertungsteil

Festlegung der Diagnosen im Bereich der Condylusmorphologie, Diskusposition, transversale Diskusverlagerung (ausschließlich coronare Aufnahmen) durch die einzelnen Auswerter.

- Die Condylusmorphologie konnte wie folgt bewertet werden (Tab. 5)

Tab. 5: Bewertungsschema Condylusmorphologie [45]

| |
|---------------------------|
| 0 = physiologisch |
| 1 = anteriore Abflachung |
| 2 = posteriore Abflachung |
| 3 = dachgiebelartig |
| 4 = plan |
| 5 = nicht zu beurteilen |

- Bewertungsschema für Diskusposition (Tab. 6)

Tab. 6: Bewertungsschema Diskusposition (Einteilung der Diskusverlagerungen nach [13])

| |
|--|
| 0 = physiologisch |
| 1 = ant. Diskusverlagerung Grad 1 (zwischen 10 und 11 Uhr) |
| 2 = ant. Diskusverlagerung Grad 2 (zwischen 9 und 10 Uhr) |
| 3 = anteriore Diskusverlagerung ohne Rep. |
| 4 = post. Diskusverlagerung Grad 1 |
| 5 = post. Diskusverlag. Grad 2 (posterior des superioren Condyluspols) |

- Bewertungsschema für die transversale Diskusverlagerung

Diese Beurteilung wurde nur bei den coronaren Aufnahmen durchgeführt. (Einteilung der einzelnen Luxationsformen, siehe Tab. 7).

Tab. 7: Diagnoseschema transversaler Diskusverlagerungen (Einteilung nach [13])

| |
|--|
| 0 = physiologisch |
| 1 = rein medial Def.: med. oder lat. Befestigung des Diskus am Condylus ist verschoben |
| 2 = rein lateral |
| 3 = anteromediale Rotation. Def: Diskus ist nicht vollständig in einer Schicht zu erkennen |
| 4 = anterolaterale Rotation |
| 5 = rein anterior: Diskus liegt anterior und ist in der Schicht nicht darstellbar |

Die Auswertungen des vierten Auswertungsteils erfolgten deskriptiv mit Kreuztabellen. Es wurden ausführlich die prozentualen Verteilungen der Befunde der Condylusmorphologie, Diskusposition, transversalen Diskusverlagerung (ausschließlich coronare Aufnahmen) im Vergleich der beiden MRT-Systeme dargestellt. Es sind die Befunde des Zahnarztes und des Radiologen in einer Kreuztabelle zusammengefasst beschrieben.

2.5 Statistische Analyse der erhobenen Daten

Für die statistische Datenanalyse wurde der Auswertungsbogen in Excel[®] erfasst und mit den Statistikprogrammen SPSS[®] (Statistical Package for the Social Sciences, Version 12.01, SPSS Inc., Chicago, Illinois, USA) und SAS (Statistical Analysis System, SAS Institutes Inc., Cary, North Carolina, USA) ausgewertet.

Für die graphische Darstellung der zentralen statistischen Tendenzen wurden Tukey's Boxplots gewählt. Sie eignen sich besonders gut für die Präsentation im Hinblick auf die Fragestellung zur zentralen Tendenz und geben einen Überblick über seine Verteilung. Sie wurden zusammen mit den Kreuztabellen ebenfalls mit SPSS[®] erstellt.

Die Bewertungsergebnisse der einzelnen anatomischen Strukturen wurden in 28 Hauptgruppen zusammengefasst. Tabelle 9 stellt die Zusammenfassung der anatomischen Hauptgruppen mit entsprechender Durchnummerierung dar.

Tab. 8: Numerische Reihenfolge und Zusammenfassung der anatomischen Strukturen in Hauptgruppen

| Hauptgruppen | Ruhe- schwebelage Sagittale Projektion | Ruhe- schwebelage Coronare Projektion | Maximale Mundöffnung Sagittale Projektion | Maximale Mundöffnung Coronare Projektion | Anatomische Strukturen |
|---|---|--|--|---|--|
| Knöcherne Struktur | 01 | 09 | 15 | 23 | Tuberculum articulare Kortikalislamelle, Spongiosa |
| | | | | | Fossa mandibularis Kortikalislamelle, Spongiosa |
| | | | | | Processus condylaris Kortikalislamelle, Spongiosa |
| Discus articularis | 02 | 10 | 16 | 24 | Discus articularis anteriorer Diskuspol |
| | | | | | Discus articularis (Intermediärzone) |
| | | | | | Discus articularis posteriorer Diskuspol |
| Bilaminäre Zone | 03 | | 17 | | Bilaminäre Zone |
| | | | | | Bilaminäre Zone, oberes Blatt |
| | | | | | Bilaminäre Zone, unteres Blatt |
| Capsula | 04 | | 18 | | Capsula articularis anteriore Begrenzung |
| Muskuläre Struktur | 05 | | 19 | | M. pteryg. lat. Caput superior |
| | | | | | M. pteryg. lat. Caput inferior |
| Gelenkknorpel | 06 | 11 | 20 | 25 | Temporale Gelenkfläche (Faserknorpel) |
| | | | | | Mandibuläre Gelenkfläche (Faserknorpel) |
| Gelenkkompartimente | 07 | 12 | 21 | 26 | Oberer Gelenkspalt Unterer Gelenkspalt |
| Retroartikuläres plastisches Polster | 08 | | 22 | | Retroartikuläres plastisches Polster |
| Ligamentäre Struktur | | 13 | | 27 | Ligamentum laterale Medialer Kapselanteil |
| Muskuläre Struktur | | 14 | | 28 | Musculus masseter |
| | | | | | M. pteryg. lat. Caput superior |
| | | | | | M. pteryg. lat. Caput inferior |

2.5.1 Grundstruktur der zweifaktoriellen nichtparametrischen Analyse für Daten mit Messwiederholungen

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden die einzelnen anatomischen Strukturen mehrfach unter unterschiedlichen Situationen bewertet: unterschiedliche Geräte (1,5-T-MRT, 3,0-T-MRT), unterschiedliche Bewerter (Zahnarzt, Radiologe) und unterschiedliche Unterkieferstellungen (Ruheschwebelage, maximale Mundöffnung). Deshalb wurde bei der statistischen Analyse auf Verfahren zurückgegriffen, die diese Messwiederholungen berücksichtigen.

Die Untersuchung der Bewertungsergebnisse des ersten, zweiten und dritten Auswertungsteils erfolgte im explorativen Sinne (d.h. ohne Adjustierung des Signifikanzniveaus) mit einer zweifaktoriellen nichtparametrischen Analyse für Daten mit Messwiederholungen, um den Effekt zweier Faktoren F1 und F2 und die Wechselwirkung zwischen diesen Faktoren auf jedes Bewertungsergebnis aufzudecken [47]. Dabei werden für jedes zu untersuchende Bewertungsmerkmal drei Nullhypothesen gegen die zugehörigen Alternativhypothesen geprüft:

H_{0F1} : Das Bewertungsmerkmal unterscheidet sich nicht in den Stufen des Faktors F1 – gemittelt über den Faktor F2.

H_{1F1} : Das Bewertungsmerkmal unterscheidet sich in den Stufen des Faktors F1 – gemittelt über den Faktor F2.

H_{0F2} : Das Bewertungsmerkmal unterscheidet sich nicht in den Stufen des Faktors F2 – gemittelt über den Faktor F1.

H_{1F2} : Das Bewertungsmerkmal unterscheidet sich in den Stufen des Faktors F2 – gemittelt über den Faktor F1.

$H_{0F1 \cdot F2}$: Es existieren bezüglich des Bewertungsmerkmals keine Wechselwirkungen zwischen den Faktoren F1 und F2.

$H_{1F1 \cdot F2}$: Es existieren bezüglich des Bewertungsmerkmals Wechselwirkungen zwischen den Faktoren F1 und F2.

Die Untersuchung der Wechselwirkungen beantwortet die Frage, ob die Veränderung eines Bewertungsmerkmals zwischen den Stufen des ersten Faktors F1 in den

Ausprägungen des zweiten Faktors F2 gleichmäßig sind, d.h., ob die Verläufe der Bewertungen zwischen Stufen des ersten Faktors in den Ausprägungen des zweiten Faktors parallel sind.

Es wurden für den ersten und zweiten Auswertungsteil zwei Analysen mit jeweils unterschiedlichen Faktoren durchgeführt.

1.) Die Faktoren der ersten Analyse: Untersucher = F1 (nachfolgend immer Rater genannt) und MRT-Geräte = F2 (nachfolgend immer Tesla genannt) separat für jede Unterkieferstellung.

2.) Die Faktoren der zweiten Analyse: Unterkieferstellung = F1 (nachfolgend immer Stellung genannt) und MRT-Geräte = F2 (nachfolgend immer Tesla genannt) separat für jeden Rater.

Für den dritten Auswertungsteil wurde eine Analyse nur mit Faktoren der zweiten Analyse durchgeführt.

Signifikanzniveau

Das Signifikanzniveau ist auf $\alpha = 0,05$ festgelegt. Das bedeutet, dass die Irrtumswahrscheinlichkeit bei 5 % liegt.

Entscheidung

Der ermittelte p-Wert wird mit dem Signifikanzniveau (α) verglichen:

1.) Bei $p < \alpha$ wird die Nullhypothese abgelehnt (gleichbedeutend damit ist die Alternativhypothese wird angenommen). Daraus folgt: es gibt einen signifikanten Unterschied.

2.) Bei $p \geq \alpha$ wird die Nullhypothese beibehalten, d.h., gefundene Unterschiede sind nicht signifikant oder rein zufällig.