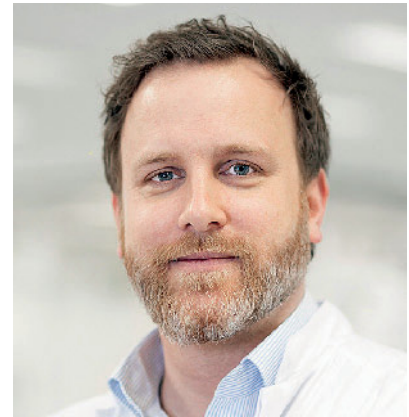


Ralf Bürgers¹, Sebastian Krohn¹, Nikolaus Gersdorff¹, Jens Frahm²

Darstellung der Kiefergelenksfunktion mittels Echtzeit-MRT

Visualisation of TMJ function using real-time MRI



Prof. Dr. Ralf Bürgers

Warum Sie diesen Beitrag lesen sollten? / Why you should read this article?

Die neue Technik der Echtzeit-MRT ermöglicht die detaillierte Darstellung der Kiefergelenks-Anatomie in der Dynamik und bietet damit einen erheblichen Mehrwert gegenüber konventionellen statischen MRT-Aufnahmen.

A novel real-time MRI techniques provides detailed insights into TMJ dynamics and therefore offers considerable benefits in comparison to conventional static MRI measurements.

Einführung: Die klassische (statische) MRT-Technik gilt in der Bildgebung des Kiefergelenks als Goldstandard, weil in der Kombination aus T1- und T2-Gewichtung Hart- und Weichgewebe des Kiefergelenks visualisiert werden können. Aufgrund der langen Daten-Akquisitionszeiten von mehreren Minuten pro Einzelaufnahme konnten die dynamischen Prozesse im Kiefergelenk bei Bewegungen des Unterkiefers bisher aber nicht abgebildet werden.

Methode: Die hier eingesetzte Technik der Echtzeit-MRT liefert 15 Einzelbilder pro Sekunde entsprechend einer Messzeit von 66,7 Millisekunden pro Einzelbild. Die Echtzeit-MRT-Aufnahmen wurden bei 3 Tesla (Magnetom Prisma Fit, Siemens Healthcare, Erlangen) unter Verwendung der Standard 64-Kanal Kopfspule durchgeführt. Die räumliche Auflösung der Aufnahmen betrug 0,75 mm in der Bildebene bei einer Schichtdicke von 5 mm. Die dynamischen Veränderungen im Kiefergelenk und die relevanten anatomischen Strukturen wurden mit zwei unterschiedlichen Kontrasten dargestellt, die einer (milden) T1-Gewichtung (spoiled FLASH) oder einer T2/T1-Gewichtung (refocused FLASH) entsprechen.

Ergebnisse und Schlussfolgerungen: Die neuartige Echtzeit-MRT erlaubt neben der präzisen Darstellung aller klinisch relevanten Gelenksstrukturen im Vergleich zur statischen MRT zusätzlich eine Bewertung der Lokalisation, morphologischen Beschreibung und Abgrenzung dieser Strukturen *in der natürlichen Dynamik* des Unterkiefers. Die Diagnostik von arthrogenen Dysfunktionen (insbesondere von Diskusverlagerungen) kann somit schneller, einfacher, präziser und verlässlicher erfolgen. (Dtsch Zahnärztl Z 2016; 71: 292–296)

Schlüsselwörter: Craniomandibuläre Dysfunktionen CMD; Echtzeit-MRT; Diskusverlagerung; Bildgebung; Kiefergelenk

Introduction: The conventional (static) MRI has been approved as golden standard in the imaging of the temporomandibular joint (TMJ), because soft and hard tissues of the TMJ may be displayed by a combination of T1 and T2 weighted images. The data acquisition in the conventional MRI takes several minutes for a single image. Therefore, the dynamic processes in the TMJ during mandibular movements could not be displayed so far.

Methods: The real-time MRI protocol used here yields 15 images per second which corresponds to an acquisition time of 66.7 milliseconds per frame. All images were recorded at 3 Tesla (Magnetom Prisma Fit, Siemens Healthcare, Erlangen) using the standard 64-channel head coil. The in-plane resolution was 0.75 mm with a section thickness of 5 mm. Dynamic changes in the TMJ region and of corresponding anatomical structures were depicted with both T1 contrast (spoiled FLASH) and T1/T2 contrast (refocused FLASH).

Results and Discussion: The novel real-time MRI technique provides a precise visualization of all clinically relevant anatomical structures of the TMJ and – in comparison to conventional static MRI measurements – additionally allows for the localization, morphological description, and differentiation of these structures during *natural movements* of the mandible. Therefore, the diagnosis of arthrogenic TMDs (in particular disc displacements) may be faster, less error-prone, more precise and even more reliable.

Keywords: temporomandibular disorders TMD; real-time MRI; disc displacement; imaging; temporomandibular joint TMJ

¹ Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik, UMG Universitätsmedizin Göttingen

² Biomedizinische NMR Forschungs GmbH am Max-Planck-Institut für biophysikalische Chemie

Peer-reviewed article: eingereicht: 26.05.2015, revidierte Fassung akzeptiert: 03.06.2015

DOI 10.3238/dzz.2016.0292–0296

Einleitung (und Stand der Technik)

Im Bereich der Diagnostik von craniomandibulären Dysfunktionen spielt die Bildgebung des Kiefergelenks bei unklaren oder arthrogenen Symptomen eine wichtige Rolle. Hierbei sollten sowohl Weich- als auch Hartgewebe darstellbar sein, um mögliche pathologische Veränderungen oder Normvariationen sicher und reproduzierbar diagnostizieren zu können. Hierzu wurden in der Vergangenheit auch invasive Verfahren, z.B. die chirurgische Arthroskopie oder die strahlenbelastende Arthrographie eingesetzt [1, 6, 18]. Mittlerweile ist aber die Magnetresonanztomographie (MRT) als Goldstandard etabliert, weil sich alle therapie relevanten Strukturen des Kiefergelenks und angrenzender Bereiche ohne ionisierende Strahlung und ohne Verwendung von Kontrastmitteln nichtinvasiv darstellen lassen [4].

Ein wesentlicher Vorteil der MRT-Technik liegt in der variablen Kontrastdarstellung; während anatomische Hart- und Weichgewebsstrukturen besonders gut unter Verwendung von T1-gewichteten Aufnahmen beurteilt werden können, ermöglichen T2-gewichtete MRT-Bilder die Darstellung von Synovialflüssigkeit und Gelenkergüssen [12, 15]. Im klinischen Alltag werden zur Beurteilung der Kiefergelenksstrukturen und deren Lagebeziehung statische MRT-Aufnahmen (sMRT) mit T1- und T2-Gewichtung angefertigt, bei denen der Unterkiefer eine oder beide Grenzpositionen der Mundöffnung einnimmt, d.h. die maximale Interkuspidation und/oder die maximale Kieferöffnung [7]. Diese konventionellen sMRT-Techniken sind jedoch mit erheblichen praktischen Defiziten verbunden, weil die meisten kiefergelenksbezogenen Symptome erst im dynamischen Prozess der verschiedenen Unterkieferbewegungen zum Tragen kommen. Aufgrund der langen Daten-Akquisitionszeiten von mehreren Minuten pro Einzelaufnahme fehlt die zeitliche Auflösung, um die entscheidende dynamische Komponente (beispielsweise die tatsächliche Bewegung des Discus articularis) überhaupt darzustellen [3]. Bei der sMRT-Aufnahme mit maximaler Mundöffnung ist die Verwendung eines mechanischen

Mundsperrers zur passiven Mundöffnung erforderlich, damit die Bildqualität nicht durch Bewegungsartefakte beeinträchtigt wird. Diese statisch-passive Mundöffnung entspricht jedoch nicht der physiologischen, aktiv muskelgeführten Unterkieferposition und ist für die meisten betroffenen Patienten mit erheblichen Schmerzen und dem Risiko einer zusätzlichen Traumatisierung der bereits geschädigten Strukturen verbunden [2].

Die echte kinematische Untersuchung des Kiefergelenks während der dynamischen Unterkieferbewegung ist daher durch die technische Begrenzung der sMRT-Technik bisher nicht möglich [1, 3, 10, 13]. Gleiches gilt für die CINE-Mode-MRT-Technik, bei der statische MRT-Einzelaufnahmen in unterschiedlichen Kieferpositionen retrospektiv zu einer Filmsequenz zusammengefügt werden und so pseudodynamische Informationen des Kiefergelenks liefern [2, 3]. Da auch bei diesem Verfahren ein Mundsperrer zur Fixierung der Mundöffnung verwendet wird, handelt es sich ebenfalls nicht um die Darstellung einer muskelgeführten Bewegung [8, 11]. Klinisch anwendbare Messsysteme zur Aufzeichnung der Unterkieferbewegungen, z.B. die digitale Echtzeitaxiographie, ermöglichen hingegen keine direkten Beobachtungen der dynamischen Veränderungen der Kiefergelenksstrukturen während der Bewegung. Die hier vorgestellte Echtzeit-MRT kombiniert die präzise Darstellung der Kiefergelenkanatomie aus dem statischen



Abbildung 1 QR-Code zum Abruf der Echtzeit-MRT-Videosequenzen, alternativ auch über URL:http://www.biomednrm.mpg.de/index.php?option=com_content&task=view&id=132&Itemid=39

Figure 1 QR-Code to retrieve the real-time MRI video sequences, or alternatively via URL:http://www.biomednrm.mpg.de/index.php?option=com_content&task=view&id=132&Itemid=39

MRT mit der Visualisierung der dynamischen Komponente entsprechend der Echtzeitaxiographie und bietet damit in verschiedenen Indikationen einen erheblichen diagnostischen Mehrwert gegenüber allen existierenden Bildgebungsverfahren [9].

Echtzeit-MRT des Kiefergelenks

Mit der Einführung neuer MRT-Techniken am Max-Planck-Institut in Göttin-

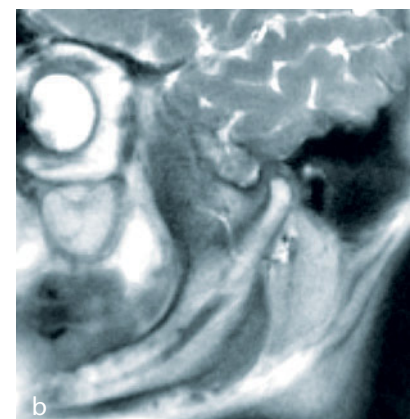


Abbildung 2 Darstellung des linken Kiefergelenks in Einzelaufnahmen aus 2 Echtzeit-MRT-Sequenzen in sagittaler Schichtführung: **(2a)** T1-Kontrast und **(2b)** T2/T1-Kontrast.

Figure 2 Representation of the left joint in single shots of 2 real-time MRI sequences in sagittal orientation: **(2a)** T1 contrast and **(2b)** T2/T1 contrast.

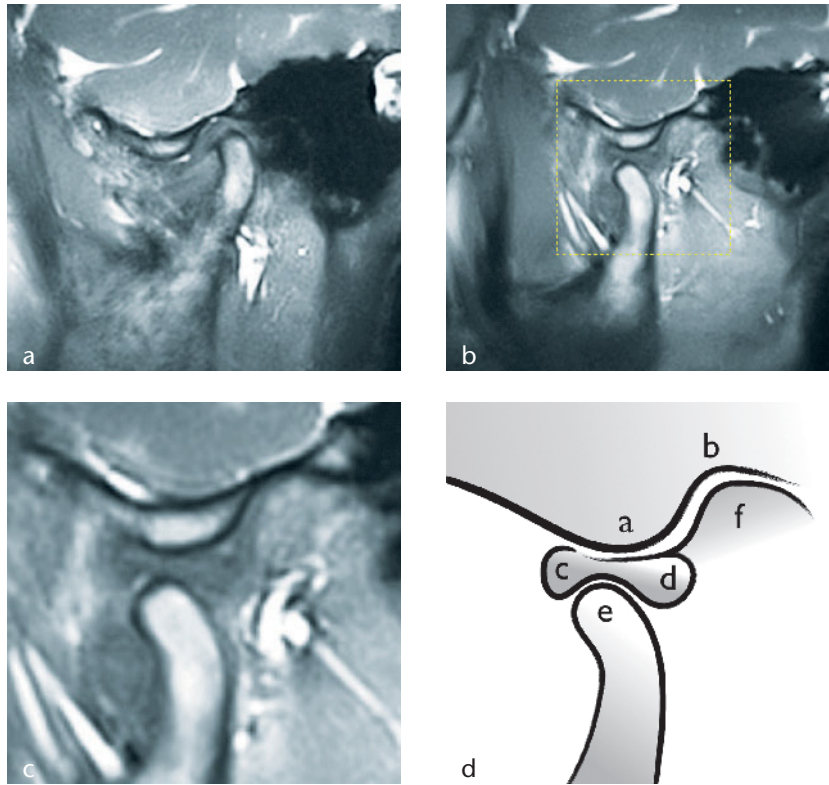


Abbildung 3 Darstellung des Kiefergelenks in 2 statischen MRT-Aufnahmen (T2-Kontrast) in sagittaler Schichtführung: **(3a)** maximale Interkuspitation, **(3b)** maximale aktive Mundöffnung, **(3c)** Detailsicht aus (3b), **(3d)** schematische Darstellung: (a) Tuberculum articulare, (b) Fossa mandibularis, (c) anteriorer Pol des Discus articularis, (d) posteriorer Pol des Discus articularis, (e) Caput mandibulae, (f) bilaminäre Zone.

Figure 3 Presentation of TMJ in 2 static MRI (T2 contrast) in sagittal orientation: **(3a)** maximum intercuspitation, **(3b)** maximum active mouth opening; **(3c)** detailed view of (3b), **(3d)** schematic representation of: (a) tuberculum articulare, (b) fossa mandibularis, (c) anterior pole of the discus articularis, (d) posterior pole of the discus articularis, (e) caput mandibulae, (f) bilaminar zone.

(Abb. 1-3: R. Bürgers)

gen konnten insbesondere höhere zeitliche Auflösungen realisiert werden [17], wodurch erstmals dynamische physiologische Prozesse mit hoher Bildqualität in Echtzeit dargestellt werden konnten. Die Echtzeit-MRT wurde zunächst vor allem zur Untersuchung der Herzfunktion und des Blutflusses eingesetzt, kann aber auch in der Zahnmedizin zur Visualisierung der Bewegungen im Kiefergelenk genutzt werden [8, 19, 20]. Exemplarische Videos können auf der Internetpräsenz des Max-Planck-Instituts angesehen werden (siehe QR-Code, Abb. 1).

In technischer Hinsicht kombiniert das Verfahren eine serielle Datenaufnahme mittels extrem unterabgetasteter, radial ortskodierter Gradientenechosequenzen mit einer iterativen Bildrekonstruktion durch zeitlich regularisierte, nichtlineare Inversion

[16, 19]. MRT-Aufnahmen der Kiefergelenksdynamik in Echtzeit wurden mit einem 3 Tesla MRT-System (Magnetom Prisma Fit, Siemens Healthcare, Erlangen) unter Verwendung der Standard 64-Kanal Kopfspule durchgeführt. Eine unmittelbare, vollautomatische und schnelle Berechnung und Darstellung der Bilder konnte durch Integration eines für den Untersucher „unsichtbaren“ Grafikkartenrechners in das kommerzielle MRT-System sichergestellt werden. Die räumliche Auflösung der Aufnahmen betrug 0,75 mm in der Bildebene bei einer Schichtdicke von 5 mm. Die zeitliche Auflösung wurde auf 15 Bilder pro Sekunde eingestellt, was einer Messzeit von 66,7 Millisekunden pro Einzelbild entspricht. Dabei kann die Bewegung des Diskus mit zwei unterschiedlichen Kontrasten dargestellt werden, die ent-

weder einer (milden) T1-Gewichtung (spoiled FLASH) oder einer T2/T1-Gewichtung (refocused FLASH) entsprechen (Abb. 2) [5].

Die Patienten werden in Rückenlage untersucht, wobei sich eine schräg sagittale Schichtführung senkrecht zur langen Achse des Kondylus bewährt hat. Für die Darstellung der Diskusverlagerung reicht in der Regel eine einzige Maximalöffnung und Rückkehr des Kiefergelenks, sodass die jeweilige Echtzeitaufnahme zu einem MRT-Film von 20 sec Länge führt (entsprechend 300 Bilder). Die Gesamtuntersuchungszeit beträgt nur 15 min einschließlich der Positionierung, aller MRT-Einstellungen und der Aufnahme von 12 MRT-Filmen in drei benachbarten Schichtpositionen mit beiden Kontrasten auf beiden Kiefergelenken.

Klinischer Nutzen des Echtzeit-MRT: Erste Erfahrungen

Mit der Echtzeit-MRT können erstmals alle entscheidenden anatomischen Anteile des Kiefergelenks in ihrem dynamischen Zusammenspiel dargestellt werden. Damit können physiologische Lageveränderungen des Diskus, des Kondylus, der betroffenen Bänder und aktiver Muskeln bei Bewegungen des Unterkiefers definiert werden und von pathologischen Zuständen differenziert werden. Die sichere und reproduzierbare Diagnostik von Diskusverlagerungen und von degenerativen Erkrankungen und deren Auswirkung auf die Mobilität des Unterkiefers ist möglich. Beispielsweise können verschiedene Arten der Diskusverlagerungen (reversibel vs. irreversibel, anterior vs. posterior, total vs. partiell) sicher und einfach voneinander und von möglichen Differenzialdiagnosen abgegrenzt werden. Im Vergleich zu statischen MRT-Aufnahmen (siehe Abb. 3) ermöglicht auch die Echtzeit-MRT eine präzise und kontrastreiche Lokalisation und Abgrenzung aller relevanten anatomischen Strukturen des Kiefergelenks, d.h. von Tuberculum mandibularis, Fossa mandibularis, Discus articularis, dem dorsalen Bandapparat, der Gelenkkammern und des Caput mandibulae sowohl in Statik und Dynamik (siehe Videosequenzen über Abb. 1)

[19]. Je besser die Qualität und Auflösung von MRT-Aufnahmen des Kiefergelenks ist, desto genauer und reproduzierbarer wird beispielsweise die Diskuslage von verschiedenen Untersuchern beurteilt [14]. Die beschriebene Echtzeit-MRT kann diesen Effekt, und damit eine präzisere und vom Untersucher unabhängige Diagnostik, verstärken, weil der Diskus und seine Lokalisation im Gelenkspalt in jeder Phase der tatsächlichen Mundöffnung abgebildet werden kann.

Neben der Darstellung zweier Grenzpositionen (maximale Interkuspitation, maximale Mundöffnung) können beliebige dynamische Prozesse (Mundöffnung, Laterotrusion, Protrusion, Retrusion, Kaubewegungen, Knirschen, etc.) in ihrer Gesamtheit mit bis zu 15 Bildern pro Sekunde in Echtzeit visualisiert und den betroffenen anatomischen Strukturen zugeordnet werden. Der direkte Effekt von Okklusionsschienen bei entsprechenden Unterkieferbewegungen auf die Gelenkstrukturen kann ebenfalls in Echtzeit dargestellt werden. Vorgenommene Modifikationen an Okklusionsschienen (beispielsweise das Aufbringen eines Hypomochlions im Seitenzahngelände) und deren therapeutische Wirkung (beispielsweise die Distraction des Kiefergelenks) können sofort und in Echtzeit überprüft werden. Diese neuartige Bildgebung des Temporomandibulargelenks könnte damit für individuellere und patientenorientierte Therapien genutzt werden.

Darüber hinaus geht die Anwendung der Echtzeit-MRT mit einer erheblichen Reduzierung der Belastung für betroffene Patienten einher. Statt der minutenlangen Aufzeichnungen verschiedener provozierter und unna-

türlicher Grenzpositionen im konventionellen sMRT erfolgt die Aufzeichnung – entsprechend einer Videoaufnahme – in Echtzeit, d.h. der Patient öffnet und schließt den Mund habituell nach Aufforderung. Das traumatisierende Aufspreizen bzw. Fixieren des Unterkiefers mittels Mundsperrern ist dabei nicht mehr erforderlich.

Die Darstellung des Kiefergelenks mittels Echtzeit-MRT hat nach Ansicht der Autoren das Potenzial zum tatsächlichen Goldstandard in der Bildgebung (arthrogener) craniomandibulärer Dysfunktionen zu werden. Echtzeit-MRT-Aufnahmen des Temporomandibulargelenks machen konventionelle statische Aufnahmen und Cine-Modus-Untersuchungen in den meisten klinischen Indikationen entbehrlich, weil sie die Patienten deutlich weniger belasten und dem Untersucher mehr Informationen liefern. Die Echtzeit-MRT kann in Kombination mit einer standardisierten klinischen Untersuchung (bei arthrogenen Erkrankungen) zu einer sicheren Diagnose und therapeutischen Verlaufskontrollen genutzt werden. Die präzise Darstellung sämtlicher relevanter Strukturen des Kiefergelenks mit der Echtzeit-MRT sollte aber nicht dazu verleiten, die klinische Untersuchung und die Anamnese zu vernachlässigen oder den multifaktoriellen Charakter craniomandibulärer Dysfunktionen nicht zu berücksichtigen. Die präzise Lokalisation verschiedener Gelenkstrukturen in jeder Phase der Unterkieferbewegung darf auch nicht dazu führen, dass symptomfreie Normvariationen als pathologische Zustände missinterpretiert werden, die eine therapeutische Intervention nötig machen.

Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass die MRT bei bestimmten klinischen Indikationen in der Bildgebung des Kiefergelenks den Goldstandard darstellt. Die neuartige Echtzeit-MRT erlaubt neben der präzisen Darstellung aller klinisch relevanten Gelenksstrukturen im Vergleich zur konventionellen statischen MRT zusätzlich die Lokalisation, morphologische Beschreibung und Abgrenzung dieser hart- und weichgewebigen Anteile des *Kiefergelenks in der Dynamik* des Unterkiefers mit 15 Aufnahmen pro Sekunde [19, 20]. Damit wird die Diagnostik, vor allem bei arthrogenen Dysfunktionen schneller, einfacher und verlässlicher. Erste Studien und die klinische Erfahrung der Autoren zeigen, dass die Echtzeit-MRT als signifikante Weiterentwicklung der bisherigen statischen MRT einen deutlichen Mehrwert an Informationen im Vergleich zu den konventionellen Kiefergelenksaufnahmen bietet [8, 19]. Hierbei ist hinsichtlich des Kontrastes sowohl eine T1- als auch eine T2/T1-Gewichtung sinnvoll, um die jeweiligen Vorteile der beiden unterschiedlichen Kontraste zu nutzen [5]. DZZ

Interessenkonflikte: Die Autoren erklären, dass kein Interessenkonflikt im Sinne der Richtlinien des International Committee of Medical Journal Editors besteht.

Korrespondenzadresse

Prof. Dr. Ralf Bürgers
Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik
UMG Universitätsmedizin Göttingen
Robert-Koch-Str.40, 37075 Göttingen
ralf.buegers@med.uni-goettingen.de

Literatur

1. Beer A, Kolk A, Neff A, Hof N, Treumann T, Rummeny EJ: Cine-MRT des Kiefergelenks im Vergleich zur konventionellen MRT und Achsiographie. *Fortschr Röntgenstr* 2004; 176: 506–512
2. Behr M, Held P, Leibrock A, Fellner C, Handel G: Diagnostic potential of pseudo-dynamic MRI (CINE mode) for evaluation of internal derangement of the TMJ. *Eur J Radiol* 1996; 23: 212–215
3. Bell KA, Miller KD, Jones JP: Cine magnetic resonance imaging of the temporomandibular joint. *Cranio* 1992; 10: 313–317
4. Bertram S, Rudisch A, Innerhofer K, Pumpel E, Grubwieser G, Emshoff R: Diagnosing TMJ internal derangement and osteoarthritis with magnetic resonance imaging. *J Am Dent Assoc* 2001; 132: 753–761
5. Frahm J, Hänicke W: Rapid scan techniques. In: Stark DD, Bradley WG (Hrsg): *Magnetic resonance imaging*. Mosby, St. Louis, 1999
6. Gynther GW, Tronje G: Comparison of arthroscopy and radiography in patients with temporomandibular joint symptoms and generalized arthritis. *Dentomaxillofac Radiol* 1998; 27: 107–112
7. Held P, Moritz M, Fellner C, Behr M, Gmeinwieser J: Magnetic resonance of the disk of the temporomandibular joint. MR imaging protocol. *Clin Imaging* 1996; 20: 204–211
8. Kling O, Roediger M, Zhang S, Frahm J, Gersdorff N: Real-time MRI as a new

- technique for the functional assessment of the temporomandibular joint. *J Craniomandib Func* 2013; 5: 9–18
9. Kober C, Berg BI, Berg S et al.: Do we need real-time MRI for diagnosis of temporomandibular joint disorders? *Int J Comput Dent* 2011; 14: 111–118
 10. Kordass B: The temporomandibular joint in video motion--noninvasive image techniques to present the functional anatomy. *Ann Anat* 1999; 181: 33–36
 11. Kress B, Schmitter M: Temporomandibulargelenk: MRT-Diagnostik. *Radio- loge* 2005; 45: 790, 792–796
 12. Larheim TA, Westesson PL, Sano T: MR grading of temporomandibular joint fluid: association with disk displacement categories, condyle marrow abnormalities and pain. *Int J Oral Maxillofac Surg* 2001; 30: 104–112
 13. Rao VM, Liem MD, Farole A, Razek AA: Elusive “stuck” disk in the temporomandibular joint: diagnosis with MR imaging. *Radiology* 1993; 189: 823–827
 14. Schmitter M, Kress B, Hahnel S, Rammelsberg P: The effect of quality of temporomandibular joint MR images on interrater agreement. *Dentomaxillofac Radiol* 2004; 33: 253–258
 15. Tomas X, Pomes J, Berenguer J et al.: MR imaging of temporomandibular joint dysfunction: a pictorial review. *Radiographics* 2006; 26: 765–781
 16. Uecker M, Zhang S, Frahm J: Nonlinear inverse reconstruction for real-time MRI of the human heart using under-sampled radial FLASH. *Magn Reson Med* 2010; 63: 1456–1462
 17. Uecker M, Zhang S, Voit D, Karaus A, Merboldt KD, Frahm J: Real-time MRI at a resolution of 20 ms. *NMR Biomed* 2010; 23: 986–994
 18. Vogl TJ, Abolmaali N: MRT des Temporomandibulargelenkes: Untersuchungstechnik, Ergebnisse, Indikationsstellung. *Fortschr Röntgenstr* 2001; 173: 969–979
 19. Zhang S, Gersdorff G, Frahm J: Real-time magnetic resonance imaging of the temporomandibular joint dynamics. *The Open Medical Imaging Journal* 2011; 1–9
 20. Zhang S, Joseph AA, Voit D et al.: Real-time magnetic resonance imaging of cardiac function and flow – recent progress. *Quant Imaging Med Surg* 2014; 4: 313–329