

Aus der Klinik für Kieferorthopädie,
Universitätsklinikum des Saarlandes, Homburg/Saar
Direktor: Univ.-Prof. Dr. Jörg Lisson

Einfluss verschiedener kieferorthopädischer Brackets auf die diagnostische Qualität in der 1,5 Tesla Magnetresonanztomographie

Dissertation zur Erlangung des Grades eines Doktors der Zahnheilkunde

der Medizinischen Fakultät

der UNIVERSITÄT DES SAARLANDES

2021

vorgelegt von:

Sophie Catherine Krause

geb. am: 17. Oktober 1995 in Trier

Tag der Promotion: 27. April2022

Dekan: Univ.-Prof. Dr. med. Michael D. Menger

Berichterstatter: PD Dr. Björn Ludwig

Prof. Dr. Matthias Karl

Für meine Familie

Inhaltsverzeichnis

1	ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS.....	1
2	ZUSAMMENFASSUNG	2
2.1	Deutsche Zusammenfassung	2
2.2	Abstract.....	4
3	EINLEITUNG	6
3.1	Ziel der Arbeit / Fragestellung.....	7
4	LITERATURÜBERSICHT	9
4.1	Materialien kieferorthopädischer Brackets.....	9
4.2	Magnetresonanztomographie.....	9
4.2.1	Funktionsweise eines Magnetresonanztomographen.....	9
4.2.2	Artefakte in der Magnetresonanztomographie.....	10
4.2.3	Wichtung.....	14
4.2.4	Pulssequenzen	14
4.2.5	Radiofrequenzinduzierte Erwärmung	15
4.2.6	Radiofrequenzinduzierte Beschleunigung	15
5	MATERIAL UND METHODE	16
5.1	Probandin.....	16
5.2	Intraoralscan	16
5.3	Programm zur Vorbereitung des 3D Drucks	18
5.4	3D Drucker	20
	Funktionsweise Harz 3D Drucker	20

5.5	Herstellung der Schienen	23
5.6	Brackets	24
5.7	MRT-Untersuchung in der durchgeführten Studie	31
5.8	Artefaktbestimmung	34
5.9	Bestimmung der Erwärmung	36
5.10	Bestimmung der Beschleunigung	37
6	ERGEBNISSE	38
6.1	Artefakte	38
6.1.1	Sichtbarkeit der anatomischen Strukturen	38
6.1.2	Durch Artefakte eingeschränkte Beurteilbarkeit	46
6.2	Erwärmung der Attachments	50
6.3	Beschleunigung der Attachments	51
7	DISKUSSION	52
7.1	Kritische Betrachtung der eigenen Untersuchung	52
7.1.1	Probandin	52
7.1.2	Tiefziehschiene	52
7.1.3	Magnetresonanztomographie	53
7.1.4	Attachments	53
7.1.5	Auswertung	54
7.2	Vergleich der eigenen Ergebnisse mit denen aus der Literatur	54
7.2.1	Artefakte	55
7.2.2	Erwärmung	61
7.2.3	Beschleunigung	63

7.3	Schlussfolgerungen / Konklusionen	64
8	LITERATURVERZEICHNIS	65
9	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	70
10	TABELLENVERZEICHNIS	72
11	DANKSAGUNG	73
12	LEBENS LAUF	74
13	ANHANG	75
13.1	KFO-Werkstoffliste.....	75

1 Abkürzungsverzeichnis

®	Registered Trade Mark
2D	Zweidimensional
3D	Dreidimensional
Abb.	Abbildung
DICOM	Digital Imaging and Communications in Medicine
DVT	Digitale Volumentomographie
<i>et al.</i>	<i>et alii</i> (lat.: und andere)
FSE	Fast-Spin-Echo
MRT	Magnetresonanztomographie
Nr.	Nummer
PETG	Polyethylenterephthalat-Glycol
POM	Polyoxymethylene
STL	STereoLithography, Standard Tessellation Language
Tab.	Tabelle
TE	Echozeit
TR	Repetitionszeit

2 Zusammenfassung

2.1 Deutsche Zusammenfassung

Einleitung:

Festsitzende kieferorthopädische Apparaturen werden häufig prophylaktisch vor Magnetresonanztomographien (MRT) entfernt, um die Möglichkeit einer eingeschränkten Diagnostizierbarkeit der Zielregion durch Artefakte oder Gefahren für den Patienten zu minimieren. Das Ziel dieser Studie ist es, herauszufinden, welche Brackets der Marke FORESTADENT (Pforzheim, Deutschland) Artefakte verursachen, die die diagnostische Aussagekraft beeinträchtigen. Außerdem gilt es zu klären, ob diese Brackets eine Erwärmung oder Beschleunigung erfahren und somit ein potentielles Verletzungsrisiko darstellen.

Material und Methode:

Zunächst erfolgte die Herstellung von acht Trägerschienen. Sieben dieser Trägerschienen wurden mit jeweils verschiedenen Sets Brackets der Marke FORESTADENT (Pforzheim, Deutschland) bestückt und in vivo im 1,5 Tesla MRT untersucht. Zusätzlich wurden Untersuchungen mit unbestückter Trägerschiene und ohne Trägerschiene vorgenommen. Das Ausmaß der Artefakte und die damit verbundene Beeinflussung wurde durch einen erfahrenen Radiologen an den entstandenen Dateien untersucht. Die Probandin gab nach jeder Untersuchung Auskunft über eine mögliche Erwärmung der Attachments. Vor und nach jeder MRT-Untersuchung wurden die Attachments auf ihren Sitz überprüft.

Ergebnisse:

Bezüglich der gezeigten Artefakte ergaben sich Unterschiede in ihrer Ausdehnung. Um Attachments aus Kunststoff zeigten sich die geringsten Artefakte, gefolgt von Attachments aus Vollkeramik und Lingualbrackets. Um Keramikbrackets mit Metallslot entstanden moderate Artefakte. Die signifikantesten Artefakte induzierten vestibuläre Stahlbrackets. Dabei konnte ein Zusammenhang zwischen Größe der Stahlbrackets und Artefakten ermittelt werden. Alle Artefakte beschränkten sich auf den Bereich der Mundhöhle. Es wurde weder eine Bewegung noch eine subjektiv wahrnehmbare Erwärmung der Attachments verzeichnet.

Schlussfolgerung:

Eine prophylaktische Entfernung der Brackets vor dem Hintergrund der Artefaktentstehung ist für MRT-Untersuchungen mit Zielregionen jenseits der Kopf-Hals-Region nicht indiziert. Die gezeigten Artefakte beschränkten sich auf die Mundhöhle. Eine die Entfernung indizierende Erwärmung oder Beschleunigung ist nicht zu befürchten.

2.2 Abstract

Influence of different orthodontic brackets on the diagnostic quality in 1.5 Tesla magnetic resonance imaging

Introduction:

Fixed orthodontic appliances are often removed prophylactically prior to magnetic resonance imaging (MRI) scans to minimize the possibility of limited diagnosability of the target region due to artifacts or hazards to the patient caused by the appliances. The goal of this study was to determine which FORESTADENT (Pforzheim, Deutschland) brackets cause artifacts that compromise diagnostic performance and to which extend. In addition, it was necessary to clarify whether the brackets experience heating or magnetic acceleration during the scan and thus represent a potential risk of injury.

Material and method:

At first, eight transparent splints were fitted to the probands upper teeth. Seven of those splints were then equipped with different sets of FORESTADENT (Pforzheim, Deutschland) brackets and examined in vivo in an 1.5 Tesla MRI. For reference values additional examinations were performed with the remaining blank splint and without a splint. The extent of the artifacts and the associated influence on the diagnosability of surrounding anatomic structures were examined by an experienced radiologist on the resulting imaging data. After each examination, the proband provided information about possible heating of the brackets. The attachments on the splints were checked for fit before and after each MRI examination.

Results:

There were differences in the extent of the artifacts created. The smallest artifacts occurred around acrylic brackets, followed by all-ceramic brackets and lingual orthodontic brackets. Moderate artifacts occurred around ceramic brackets with a metal slot. The most significant artifacts occurred around vestibular steel brackets. A correlation between the size of the steel brackets and the artifacts created was determined. All artifacts were limited to the area of the oral cavity. Neither acceleration nor subjectively perceptible heating of the attachments was recorded during and after the imaging process.

Conclusion:

Prophylactic removal of brackets to prevent the generation of artifacts is not recommended for MRI examinations with target regions beyond the head and neck region. The artifacts generated were strictly limited to the oral cavity. Heating or acceleration of either type of brackets indicating removal could not be witnessed.

3 Einleitung

Die Magnetresonanztomographie stellt sowohl in der Medizin als auch in der Zahnmedizin ein unverzichtbares Diagnoseverfahren dar (39). Sie bietet sehr viele Anwendungsmöglichkeiten und scheint nach Jahren des Einsatzes immer noch nicht ausgereizt zu sein. Gerade im Vergleich zur konventionellen Röntgendiagnostik bietet die Magnetresonanztomographie den großen Vorteil der nicht vorhandenen Strahlenbelastung, da diese im Gegensatz zur Röntgendiagnostik auf ionisierender Strahlung basiert (17). In der Kieferorthopädie sind die Panoramaschichtaufnahme (OPG) und die Fernröntgenseitenanalyse (FRS) zur Standarddiagnostik nach wie vor Mittel der Wahl, obwohl die gelieferten Bildinformationen lückenhaft sind. Eine Umgehung dieses Problems stellt dabei die Anwendung der digitalen Volumentomographie (DVT) dar, die ein dreidimensionales Bild bietet. Da es sich jedoch bei den meisten Patienten der Kieferorthopädie um junge Patienten handelt, deren Weichgewebe besonders empfindlich gegenüber Strahlung ist, sollte zur Verlaufskontrolle eine regelmäßige Verwendung ionisierender und damit auch gewebsschädigender Strahlung vermieden werden (17). Eine Strahlenbelastung für den Patienten bedeutet immer, dass diese strengen Indikationen unterliegt und nicht unbegrenzt eingesetzt werden darf (36, 38). Eine gute Alternative stellt dazu auch für den zahnmedizinischen Bereich die Magnetresonanztomographie dar (17).

Die prophylaktische Entfernung kieferorthopädischer Attachments vor Anfertigung einer Magnetresonanztomographie stellt in der täglichen Praxis keine Seltenheit dar (33). Die Anzahl der Patienten mit kieferorthopädischen Attachments, die eine MRT-Untersuchung benötigen ist in den letzten Jahren deutlich angewachsen (35). Daher ist es wichtig zu klären, wann und ob eine kieferorthopädische Apparatur tatsächlich entfernt werden sollte (35). Oftmals geht diese Entscheidung mit einer simplen Nutzen-Risiken-Abwägung einher. Obwohl es sich bei der Magnetresonanztomographie um ein unverzichtbares Diagnoseverfahren mit vielen Vorteilen gegenüber der konventionellen Röntgendiagnostik handelt, ist dieses nur brauchbar und aussagekräftig, wenn die erzeugten Bilder interpretierbar sind. Das heißt, dass sie frei von Bildverzerrungen, Signalauslöschungen und anderen Störungen sind.

Die Entfernung und anschließende Wiederbefestigung kieferorthopädischer Attachments, das De- und Rebonding, stellt sowohl für den Behandler als auch den Patienten einen nicht geringen Aufwand dar (33). Dabei geht dieses Prozedere sowohl mit einem erheblichen Zeitaufwand, anfallenden Kosten und einer möglichen Schädigung der Zahnhartsubstanz einher (9). Die geplante Behandlungszeit kann sich folglich verlängern (33).

Mit der routinemäßigen Entfernung der festsitzenden kieferorthopädischen Attachments sollen die mit ihnen einhergehenden Risiken umgangen werden. Zu diesen zählen die negative Beeinflussung der diagnostischen Aussagekraft der MRT-Untersuchung durch Artefakte, die Verletzungsgefahr des Patienten durch Erwärmung der Apparatur mit Gefahr des negativen Einflusses auf Pulpa und Mukosa und die Beschleunigung der Attachments mit anschließender Aspirationsgefahr (33).

Die Entscheidung der Entfernung von Attachments durch den Kieferorthopäden vor Anfertigung einer MRT-Untersuchung ist von den folgenden drei Fragen abhängig:

1. Ob und wie stark die apparaturenabhängige Artefaktbildung ist und inwieweit diese die diagnostische Aussagekraft der MRT-Bildgebung beeinflusst (33).
2. Ob und wie stark sich die kieferorthopädische Apparatur im Mund erwärmen kann und ob dies mit einer Verletzung einhergehen kann (33).
3. Ob und wie stark sich die Apparatur beschleunigt und eine Gewebeschädigung durch beispielsweise eine nachfolgende Aspiration hervorrufen kann (33).

3.1 Ziel der Arbeit / Fragestellung

Ziel der vorliegenden Studie ist es, die Auswirkungen von kieferorthopädischen Attachments der Marke FORESTADENT (Pforzheim, Deutschland) auf die diagnostische Qualität von 1,5 Tesla MRT-Untersuchungen von vier kraniofazialen Regionen zu untersuchen. Die Unterschiede der diagnostischen Qualität bei Verwendung der Attachments verschiedenster Materialien sollen dabei in vivo bewertet werden. Zudem wird eine mögliche Beschleunigung und Erwärmung der Attachments untersucht. Ziel soll es sein, sowohl dem Radiologen als auch dem Kieferorthopäden eine Richtlinie an die Hand zu geben, wann die Entfernung von festsitzenden kieferorthopädischen Attachments vor einer MRT-Untersuchung empfohlen werden sollte und wann die Apparatur belassen werden kann.

Es gilt die folgenden Hypothesen zu klären:

1. Kieferorthopädische Attachments der Marke FORESTADENT (Pforzheim, Deutschland) führen zur negativen Beeinflussung der diagnostischen Aussagekraft einer MRT-Untersuchung des Kopf-Hals-Bereiches.
2. Kieferorthopädische Attachments der Marke FORESTADENT (Pforzheim, Deutschland) rufen während und nach einer MRT-Untersuchung keine klinisch spürbare radiofrequenzinduzierte Erwärmung hervor.
3. Es kommt zu keiner Verletzungsgefahr durch Beschleunigung der Attachments der Marke FORESTADENT (Pforzheim, Deutschland) während der MRT-Untersuchung.

4 Literaturübersicht

4.1 Materialien kieferorthopädischer Brackets

Immer mehr Patienten wollen das bestmögliche ästhetische Ergebnis ihrer Zahnstellung erzielen. In der Kieferorthopädie wird dies unter anderem mit festsitzenden Apparaturen erreicht. Diese bestehen in der Regel aus einer Kombination aus Brackets, Bändern, Bögen, Drähten und anderen Komponenten. Bögen und Drähte lassen sich beispielsweise notfalls schnell und problemlos entfernen, Bänder und Brackets hingegen nicht. Diese sind in der Regel durch Zement oder adhäsiven Verbund an den Zahnoberflächen befestigt. Die Entfernung der Bänder und Brackets geht häufig mit hohem Zeitaufwand und Kosten einher. Zudem kann der Schmelz während des Prozesses des De- und Rebondings in Mitleidenschaft geraten (33, 8). Ursprünglich wurden Brackets aus verschiedenen Edelstahllegierungen hergestellt. Mittlerweile gibt es unterschiedliche Materialien auf dem Markt. Neben Edelstahl existieren auch Metallbrackets anderer Materialien wie Kobalt-Chrom-Legierungen, Gold-Legierungen, Titan und dessen Legierungen. Die Nachfrage nach einer ästhetischeren Alternative führte zur Entwicklung von hochästhetischen Brackets aus Kunststoff, Vollkeramik und Keramik mit Metallslots (30).

4.2 Magnetresonanztomographie

4.2.1 Funktionsweise eines Magnetresonanztomographen

Die Magnetresonanztomographie beruht darauf, dass ein Signal mittels Empfangsspule sichtbar gemacht wird. Es ist eine Darstellung der Dichte von Kernspins als Funktion des Ortes (19). Um die Energiezustände des Kernspins aufzuspalten, kommen folgende wesentliche Komponenten des MRT zum Tragen:

- ein Magnet, der ein statisches Magnetfeld erzeugen kann,
- ein Hochfrequenz-System, welches aus Sender und Empfänger besteht und
- ein Hochleistungsrechnersystem, das der Steuerung und dem Auslesen der Daten dient.

Im ersten Schritt wird durch den Kernspintomographen ein Magnetfeld erzeugt, das etwa 10.000 bis 30.000mal stärker als das Magnetfeld der Erde ist (18). Das in der Studie verwendete Gerät ist in der Lage, eine Feldstärke von 1,5 Tesla zu erzeugen. Die Feldstärke beschreibt die Kraftwirkung, die das Magnetfeld auf den Körper ausübt (19). Bei dem Verfahren wird jeder Atomkern mit ungerader Massezahl, zu denen körpereigene Wasserstoffatome zählen, durch das Zusammenwirken von Magnetfeldern phasensynchron angeregt (19, 12). Die Atome besitzen die Eigenschaft des Kernspins. Dieser gibt den Drehimpuls eines Atomkerns um die eigene Achse an (19). Die Anregung wird durch scheibenförmige Magnete erreicht, die einen Magnettunnel bilden der den Körper umgibt (12). Dann sendet der Kernspintomograph kurze Radiowellen-Impulse, wodurch eine Gewebemagnetisierung stattfindet (19). Die Wasserstoffatome werden kurzzeitig aus ihrer phasensynchronen Position gebracht. Dies geschieht mit allen Stoffen, die in einem Magnetfeld positioniert werden. Die Gewebemagnetisierung weist eine stoffeigene Empfindlichkeit auf und bildet somit die Grundlage für die Sichtbarkeit verschiedener Strukturen (12). Nach jedem Radiowellen-Impuls kehren die Atome in ihren Ausgangszustand zurück. Bei dieser Rückkehr, die als Relaxation bezeichnet wird, geben die angeregten Atome Energie in Form von Impulsen ab, die von der Empfängerspule erfasst werden können (12). Unterschiedliche Abklingzeiten resultieren aus der unterschiedlichen Charakteristik, die die unterschiedlichen Gewebearten besitzen (12). Da Wasserstoffatome zu den mit am Häufigsten vorkommenden Atomen der verschiedenen Körpergewebe zählen, sind die Empfängerspulen so programmiert, dass sie vor allem die Relaxation dieser Atome in Form von Echos detektieren (19). Die verschiedenen Gewebe des Körpers weisen unterschiedliche Wassergehalte auf, woraus unterschiedliche Impulse und somit auch die unterschiedlichen Kontraste in der Bildgebung resultieren (17).

Einer der größten Vorteile der Magnetresonanztomographie ist die nicht vorhandene Strahlenbelastung bei dieser Art der dreidimensionalen Bildgebung (17). Zudem lassen sich im Gegensatz zu anderen Bildgebungen die unterschiedlichen Gewebearten gut darstellen.

4.2.2 Artefakte in der Magnetresonanztomographie

Artefakte können zu Signalverlusten und Bildverzerrungen führen, die die diagnostische Aussagekraft der Aufnahme einschränken, bzw. unmöglich machen können (12). Andererseits können MRT-Untersuchungen trotz Artefaktbildung brauchbar sein, da beispielsweise die

Bereiche, die von Artefakten betroffen sind, nicht im Fokus der Untersuchung stehen. Artefakte beeinflussen demnach nicht immer die diagnostische Aussagekraft einer Untersuchung negativ. Es gilt zu klären, welche Strukturen durch unterschiedliche kieferorthopädische Attachments diagnostizierbar sind und welche durch Artefakte nicht diagnostizierbar sind.

Einige Studien kommen zu dem Ergebnis, dass Stahlprodukte vor Anfertigung einer Magnetresonanztomographie aus der Mundhöhle entfernt werden sollen. Wylezinka *et al.* testeten einige Stahlprodukte, wie Drähte und Attachments, und kamen zu der Schlussfolgerung, dass diese im Vorfeld entfernt werden sollen (44). Auch Elison *et al.* beschäftigten sich unter anderem mit Brackets aus zwei verschiedenen Stahlsorten (9). Obwohl die erzielten Ergebnisse für die zwei getesteten Stahlsorten sehr unterschiedlich waren, kam auch diese Arbeitsgruppe zu der Schlussfolgerung, dass Brackets aus Stahl grundsätzlich vor Anfertigung einer MRT-Untersuchung zu entfernen sind, da die kranialen Strukturen nicht diagnostizierbar seien (9). Andererseits fanden Sadowsky *et al.* und Hinshaw *et al.* heraus, dass Stahlbrackets und -drähte zwar zur Artefaktbildung im Kopf-Hals-Bereich führen, die entstandenen Bilder jedoch trotzdem diagnostizierbar waren (47). In der Studie von Elison *et al.* wurden neben Stahlbrackets auch andere Materialien am Phantom untersucht. Dabei kam man zu dem Ergebnis, dass Brackets aus Keramik, Kunststoff und Titan keine signifikante Verzerrung verursachen (5). Zhylich *et al.* beschäftigten sich mit Keramikbrackets und kamen ebenfalls zu dem Ergebnis, dass es zu keiner signifikanten Verzerrung durch diese Brackets kam (47). Poorsattar-Bejeh Mir trug Richtwerte für regelmäßig in der Kieferorthopädie verwendete Materialien zusammen (33). Stahlbrackets sollen demnach immer vor Anfertigung einer MRT-Untersuchung des Kopf-Hals-Bereiches entfernt werden. Keramikbrackets mit Metallslot und Titanbrackets sollen vor einer MRT-Untersuchung, die die Mundhöhle betrifft, entfernt werden und Keramik- und Kunststoffbrackets sollten belassen werden (33). Zudem soll eine Korrelation zwischen der Größe des Brackets und der Artefaktbildung bestehen (33).

Nach den bisher durchgeführten Studien besteht ein Konsens dahingehend, dass die Einschränkung durch Artefakte mit der Zunahme der Distanz zwischen Bracket und zu beurteilender Region verringert wird (33). Brackets sollen nur entfernt werden, wenn geklärt ist, dass die zu beurteilende anatomische Struktur durch mögliche Artefakte undiagnostizierbar dargestellt wird (33).

Der Frage nach möglicher Artefaktbildung durch verschiedene Brackets der Marke FORESTADENT (Pforzheim, Deutschland) wurde bisher nicht ausreichend nachgegangen. In der vorliegenden Studie wurden sieben Attachmentsserien aus verschiedenen Materialien und unterschiedlichen Größen in vivo untersucht, um einen direkten Schluss auf die klinische Situation ziehen zu können. Relevante, möglicherweise durch Artefakte eingeschränkt diagnostizierbare Strukturen, sind unter anderem die Topologie, Morphologie und Anzahl der Zähne sowie Zahnkeime, Pulpa, Dentin, Schmelz, Kiefergelenke und sogar die Schädelbasis. In der Zahnmedizin dient die Magnetresonanztomographie regelmäßig der Kiefergelenksuntersuchung oder der Abklärung von Nebenbefunden, die sich im Laufe der Therapie zeigen, wie beispielsweise tumoröse Geschehen (17). Viele Studien belegten bereits die Tauglichkeit der Magnetresonanztomographie als bildgebendes Verfahren in der Zahnmedizin (17).

Im Folgenden werden einige Arten von Artefakten bei der Bildgebung in der Magnetresonanztomographie erläutert:

Artefakte lassen sich grob in Gruppen einteilen. Diese sind patientenbedingte, messmethodische und systembedingte Artefakte (31).

Zu den patientenbedingten Artefakten zählen beispielsweise:

- Bewegungsartefakte: Diese werden durch unwillkürliche oder autonome Bewegungen des Patienten hervorgerufen (31). Darunter fallen beispielsweise Atmung, Herzbewegung, Peristaltik, Augenbewegungen und Schlucken (31).
- Flussartefakte: Diese entstehen durch den Blutfluss und den zerebrospinalen Liquorfluss (25).

Sowohl Bewegung als auch Fluss können zu Artefakten in Richtung der Phasenkodierung führen. Bei pulsatilen Flüssen können die Phasenänderungen im Laufe der Messung periodisch sein (31).

- Metallische Fremdkörper- und Suszeptibilitätsartefakte: Suszeptibilitätsartefakte entstehen durch die Eigenschaft von Metallen, die zur Verstärkung oder Abschwächung des Magnetfeldes führen (19). Dabei spricht man von „Diamagnetismus“ bei Abschwächung des Magnetfeldes (19). Bei leichter

Verstärkung (1%) des Magnetfeldes spricht man von „Paramagnetismus“ und bei weiterer Verstärkung von „Ferromagnetismus“ (19, 31).

Zu den Hauptproblemen der Magnetresonanztomographie gehören die Wechselwirkungen mit medizinischen Implantaten. Dabei lassen sich nicht-ferromagnetische und ferromagnetische Metalle unterscheiden (12). Zu den nicht-ferromagnetischen Metallen zählen Titan, Gold, Silber und Kupfer. Bei diesen Materialien kommt es nachgewiesen zu keinen Wechselwirkungen mit dem statischen Magnetfeld der Magnetresonanztomographie (12). Bei den ferromagnetischen Metallen, zu denen Eisen, Nickel und Cobalt zählen, kommt es hingegen zu Wechselwirkungen mit dem statischen Magnetfeld (12). Dies kann zu einer erhöhten Verletzungsgefahr durch Materialerwärmung oder -bewegung führen. Derartige Metalle können Anwendung in kieferorthopädischen Attachments, Herzschrittmachern oder Innenohr-Implantaten finden (26). So können metallische Fremdkörper und Veränderungen in der magnetischen Suszeptibilität zu einer Magnetfeldverzerrung führen. Diese nimmt Einfluss auf das Anregungsprofil und auf die räumliche Kodierung des Kernspinsignals mit der Folge eines hypointensen Areals (31).

- „Magic Angle“-Effekt: Eine eingeschränkte Beweglichkeit der Atome führt zu einer Verkürzung der T2-Relaxationszeit (31). Beispielsweise zu nennen sind die Wassermoleküle in den Kollagenfasern der Sehnen. Dabei kann es je nach Lage der Kollagenfasern zum Magnetfeld zu einer Signalanhebung und somit zu einer verlängerten T2-Relaxationszeit kommen (31). Ein solches Artefakt kann als entzündlicher Prozess fehlgedeutet werden (31).

Zu den methodisch bedingten Artefakten zählen beispielsweise:

- „Abbruchartefakte“: Diese sind Folge einer unvollständigen Datenaufnahme, bei der die Kanten nicht gemessen wurden (31). Es zeigen sich Intensitätssoszillationen (31).
- Chemische Verschiebungsartefakte: Diese entstehen an der Grenzfläche zwischen Fett und Wasser durch die gegeneinander verschobene Abbildung (25). Auf der Seite der Verschiebung zeigt sich das Artefakt als Überlagerung. Es entsteht an der Grenzfläche ein hyperintenses Bild. Auf der anderen Seite zeigt sich ein Artefakt im Sinne eines signalfreien „Spalts“, der sich hypointens darstellt (31).

- Einfaltungsartefakte: Diese entstehen, wenn sich Objekte außerhalb des Untersuchungsfeldes, jedoch innerhalb der Empfängerspule befinden (31).

Zu den systembedingten Artefakten zählen beispielsweise:

- Spikes: Dabei handelt es sich um eine Störung im k-Raum, einer Matrix, in der die Rohdaten abgespeichert werden (23).
- Geometrische Verzeichnung: Durch den starken Abfall des Magnetfeldes im Randbereich kommt es zu Feldinhomogenitäten. Dies kann mit einer Signalauslöschung im Randbereich einhergehen (31).

Im Verlauf der Studie liegt das Augenmerk auf den patientenbedingten Artefakten und dabei im Besonderen auf dem Ausmaß der Artefakte, die durch verschiedene Materialien hervorgerufen werden.

4.2.3 Wichtung

Wie beschrieben, führt das Abschalten der Radiowellen-Impulse zur Relaxation. Dies führt wiederum zur longitudinalen als auch transversalen Relaxation. Der Zeitpunkt, an dem 63% der Protonen in Längsrichtung relaxiert sind, bezeichnet man als „T1-Zeit“ (19, 20). Der Zeitpunkt, an dem 63% der Protonen in Querrichtung relaxiert sind, bezeichnet man als „T2-Zeit“ (19, 21). Die T1-Zeit beträgt 0,5-5 Sekunden, die T2-Zeit 100-300 Millisekunden. Die Querausrichtung nimmt demnach schneller ab als die Längsausrichtung. Beide Prozesse laufen parallel, jedoch unabhängig voneinander ab (19). In der T1-Gewichtung erscheinen fettreiche Körpergewebe heller und Wassereinlagerungen dunkler (27, 20). Die T2-Gewichtung ist sehr empfindlich gegenüber krankhaften Prozessen, da diese oft im Zusammenhang mit der Vermehrung von Gewebwasser einhergehen (19, 21).

4.2.4 Pulssequenzen

Die von dem Kernspintomographen abgegebenen Radiowellenimpulse bezeichnet man als „Sequenzen“ (12). Dabei stellen verschiedene Sequenzen Gewebe unterschiedlich dar. Zu den regelmäßig verwendeten Sequenzen zählen die Spin-Echo-Sequenz, die Gradientenechosequenz, die Fluid attenuated inversion recovery und die fast Spin-Echo-Sequenz (12).

4.2.5 Radiofrequenzinduzierte Erwärmung

Im Rahmen dieser Studie wurde die radiofrequenzinduzierte Erwärmung im 1,5 Tesla Magnetresonanztomographen beurteilt. Allgemein ist bereits bekannt, dass die Möglichkeit einer ausgeprägten Erwärmung mit Erhöhung der Magnetfeldstärke steigt (35). Durchgeführte Studien zeigen, dass die meisten Apparaturen keine klinisch relevante Erwärmung verursachen (45) beziehungsweise, dass die Temperaturerhöhung klinisch nicht signifikant ist (47). Eine Untersuchung der Brackets der Marke FORESTADENT (Pforzheim, Deutschland) vor dem Hintergrund der Erwärmung ist bisher nicht bekannt.

4.2.6 Radiofrequenzinduzierte Beschleunigung

In einer Studie von Regier *et al.* konnte gezeigt werden, dass einige „metallische Bestandteile von Brackets einer erheblichen Beschleunigung innerhalb des Magnetfeldes ausgesetzt werden“ (35).

Bei fachgerechter Befestigung kann die Verletzungsgefahr durch Lösen der Brackets fast ausgeschlossen werden (47). Das bedeutet, dass eine Überprüfung der intakten Befestigung der kieferorthopädischen Brackets vor Beginn einer MRT-Untersuchung sinnvoll ist, um das Verletzungsrisiko zu minimieren (35). Dies gilt es auch für Brackets der Marke FORESTADENT (Pforzheim, Deutschland) zu klären.

5 Material und Methode

Im Rahmen dieser Arbeit waren folgende Materialien und Methoden identisch:

Intraoralscanner, Programm zur Bearbeitung des Scans, 3D Drucker, Tiefziehgerät samt Tiefziehfolie, Kernspintomograph, Methode der Artefaktbestimmung.

5.1 Probandin

Eine gesunde Probandin, mit dem Einschlusskriterium eines naturgesunden Gebisses stand freiwillig zur Untersuchung bereit. Ausschlusskriterien waren: Minderjährigkeit, Schwangerschaft, metallische Gegenstände im Körper, wie beispielsweise Aneurysma-Clips, Herzschrittmacher, kieferorthopädische Geräte, Kronen, metallische Inlays, Brücken, Implantate, Amalgamrestaurationen und kosmetische Tätowierungen. Zudem waren Personen von der Studie ausgeschlossen, die für die MRT-Untersuchung eine Sedierung benötigen. Bei der Versuchsperson handelte es sich um eine 24-jährige Frau (Abb. 5.1).

5.2 Intraoralscan

Zur Durchführung der Studie wurde ein Scan der Probandin angefertigt. Bei dem verwendeten Intraoralscanner handelte es sich um den Trios 3 (3Shape, Kopenhagen, Dänemark) (Abb. 5.1 und 5.2). Dem folgte die Bearbeitung des digitalen Modells durch das Programm OnyxCeph³ (Image Instruments GmbH, Chemnitz, Deutschland) (Abb. 5.3) und dessen Betrachtung (Abb. 5.4).



Abbildung 5.1 Intraoralscan mit sofortiger Betrachtung des Scans am Bildschirm



Abbildung 5.2 Trios 3 (3Shape)

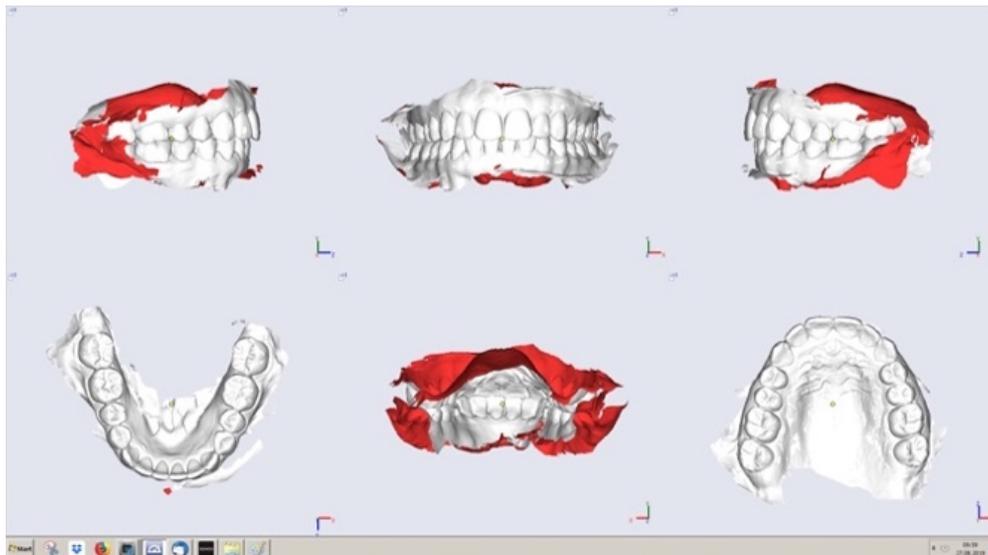


Abbildung 5.3 Betrachtung der Scandatensätze

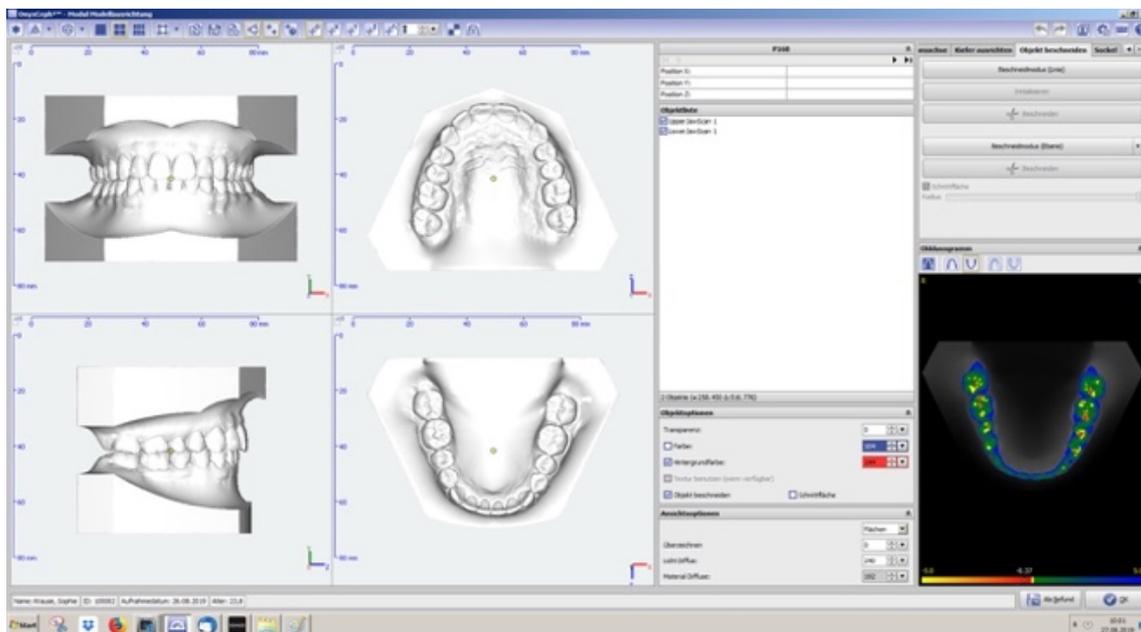


Abbildung 5.4 Betrachtung des generierten Modells

5.3 Programm zur Vorbereitung des 3D Drucks

Das digitale Modell wurde mittels der Software PreForm von Formlabs (Somerville, Vereinigte Staaten) konstruiert und in einem 3D-Druck geeigneten Dateiformat .stl exportiert (Abb. 5.5 und 5.6). Die Software dient der Konfiguration der Druckeinstellungen und einer Aufteilung des Modells in Schichten. Die eingestellten Daten wurden durch die

Druckvorbereitungssoftware per WLAN an den Drucker weitergeleitet. Bei dem verwendeten Programm handelt es sich um OnyxCeph³.

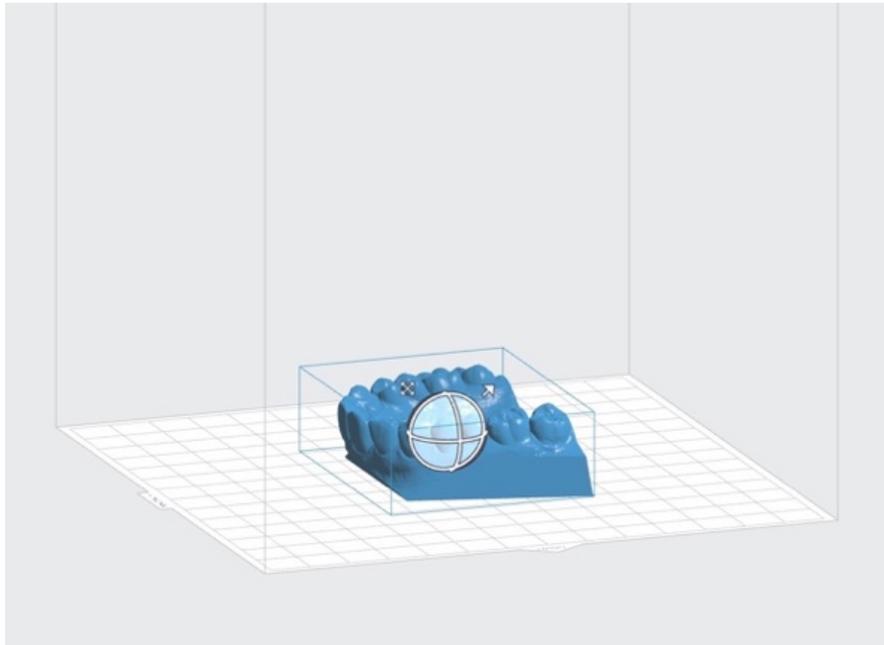


Abbildung 5.5 Aufbereitung für den 3D Druck

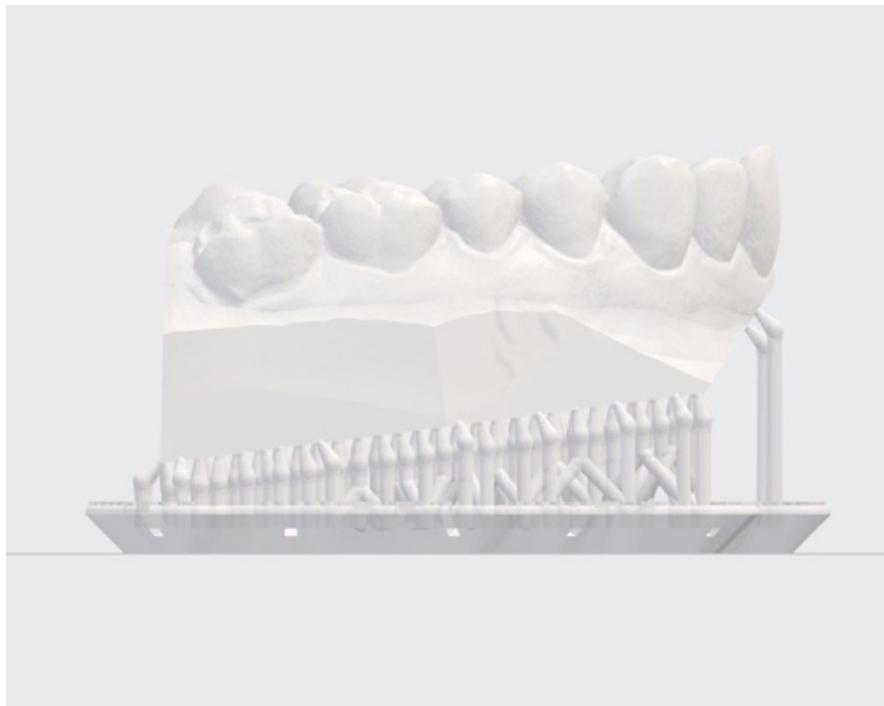


Abbildung 5.6 Genaue Betrachtung des geplanten Oberkiefermodells samt Stützen

5.4 3D Drucker

Funktionsweise Harz 3D Drucker

Bei einem 3D-Harz-Drucker wird flüssiges Harz und Laserlicht verwendet, um feste Teile zu produzieren. Diese Kombination stellt eine präzise 3D-Drucktechnologie dar (22). Durch genaue Lenkung des Laserstrahls werden Schritt für Schritt bestimmte Bereiche gehärtet, bis das fertige 3D-Modell entsteht (24). Bei dem verwendeten Formlabs Drucker handelt es sich um eine sogenannte „Bottichpolymerisation“. Die verwendete Technologie ist die Stereolithographie (24).

Die Modelle wurden mit Hilfe des Formlabs-SLA-3D-Druckers (Formlabs, Somerville, Vereinigte Staaten) (Abb. 5.7) gedruckt. Es handelt sich um einen hochpräzisen Stereolithografie-Technologie Drucker. Das verwendete Resin ist White Resin der Marke Formlabs.



Abbildung 5.7 Formlabs Form 3 SLA 3D-Drucker

Nach Bestätigung der korrekten Einstellungen begann der Druckvorgang. Dieser Druckvorgang belief sich ungefähr auf eineinhalb Stunden. Der Vollständigkeit halber wurde sowohl ein Oberkiefer- als auch ein Unterkieferzahnkranz gedruckt (Abb. 5.8). Das Gerät konnte bis zum Abschluss des Druckvorgangs unbeaufsichtigt laufen. Zur Nachbereitung der Druckteile mussten diese nach Abschluss des Druckvorgangs in Isopropanylalkohol (IPA) 90% der Marke MORPHISTO (MORPHISTO GmbH, Offenbach am Main, Deutschland) gespült werden. Dabei wurden alle unausgehärteten Harzablagerungen von der Oberfläche entfernt (Abb. 5.9). Dem folgte ein Trocknungsvorgang. Eine Nachhärtung des Materials führte zur höchstmöglichen Festigkeit und Stabilität.

Abschließend wurden die Stützen entfernt und die verbleibenden scharfkantigen Stützspuren verschliffen.

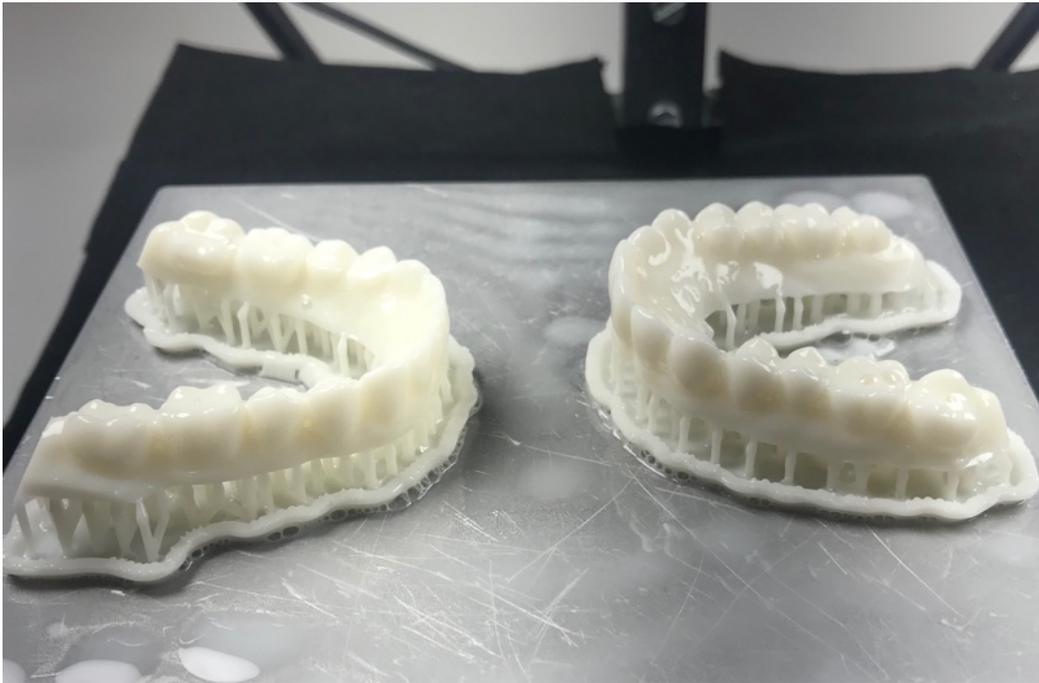


Abbildung 5.8 Ober- und Unterkieferkranz, unbearbeitet nach dem Druck



Abbildung 5.9 Oberkieferkranz nach Beseitigung der unausgehärteten Harzablagerungen, vor Entfernung der Stützen

5.5 Herstellung der Schienen

Es wurden acht herausnehmbare, temporäre Kunststoffschienen angefertigt. Dazu wurde das Modell im Gerät Track-V der Marke FORESTADENT (Pforzheim, Deutschland) positioniert (Abb. 5.10). Um die korrekte Herstellung der Trägerschienen zu gewährleisten, wurde der gedruckte Zahnkranz auf einer Gipsplatte platziert. Die Gipsplatte wurde bündig in magnetischem Edelstahlgranulat mit abgerundeten Kanten der Marke FORESTADENT (Pforzheim, Deutschland) versenkt. Nach dem Einstellen der Temperaturführung entsprechend den Herstellerangaben wurde die eingelegte Folie erwärmt und mittels Unterdrucks tiefgezogen. Im Anschluss an den Tiefziehvorgang und einer kurzen Abkühlzeit wurden die Schienen bearbeitet. Bei der verwendeten Tiefziehfolie handelte es sich um Track A (1,0mm) aus PETG (Abb. 5.11). Jede hergestellte Schiene wurde an der Probandin auf Komfort und Halt geprüft.



Abbildung 5.10 Oberkieferkranz platziert im Tiefziehgerät Track-V



Abbildung 5.11 Die genutzte Tiefziehfolie vor Entfernung der Schutzfolie

5.6 Brackets

Insgesamt wurden sieben verschiedene Attachments untersucht. Sieben der hergestellten Schienen wurden mit Brackets der Marke FORESTADENT (Pforzheim, Deutschland) bestückt. Diese Brackets unterschieden sich in Größe, Form und Material (Abb. 5.12). Dabei wurde ein möglichst großes Spektrum an Variabilität angestrebt. Bei den Attachments handelte es sich um Brackets, die normalerweise durch den Kieferorthopäden am Zahn befestigt und vom Patienten nicht entfernt werden können. Dies wurde in der vorhandenen Studie durch das Platzieren dieser Brackets auf den zuvor hergestellten Trägerschienen simuliert. Zum Bestücken der Schienen wurden diese auf dem Modell positioniert, welches ebenfalls zu ihrer Herstellung diente. Durch vorsichtiges Erhitzen der Brackets über einer Flamme konnten diese in die Schiene gedrückt werden, um einen möglichst geringen Spalt zwischen Zahnoberfläche des Modells und Brackets zu erreichen.

Bei den getesteten Attachments handelt es sich um folgende Brackets der Marke FORESTADENT (Pforzheim, Deutschland):

1. BioQuick® - selbstligierende Brackets aus Edelstahl und edelmetallfreien Legierungen (Abb. 5.13)
2. Brilliant® - Kunststoff Brackets (Abb. 5.14)
3. TruKlear® - metallfreie Keramikbrackets (Abb. 5.15)
4. QuicKlear® III – Brackets mit Keramikkorpus und Slot aus edelmetallfreien Legierungen (Abb. 5.16)
5. Micro Sprint® - kleine Brackets aus nickelfreiem Edelstahl (Abb. 5.17)
6. Sprint® II - Brackets aus nickelfreiem Edelstahl (Abb. 5.18)
7. 2D® Lingual – Brackets aus Edelstahl (Abb. 5.19)



Abbildung 5.12 Alle acht Schienen im Überblick, darunter eine unbestückte Trägerschiene (unten rechts) und sieben bestückte Trägerschienen mit den verschiedenen Brackets



Abbildung 5.13 Trägerschiene mit BioQuick® Brackets



Abbildung 5.14 Trägerschiene mit Brilliant® Brackets



Abbildung 5.15 Trägerschiene mit TruKlear® Brackets



Abbildung 5.16 Trägerschiene mit QuicKlear® III Brackets



Abbildung 5.17 Trägerschiene mit Micro Sprint® Brackets



Abbildung 5.18 Trägerschiene mit Sprint® II Brackets



Abbildung 5.19 Trägerschiene mit 2D® Lingual Brackets

Sieben der acht Schienen wurden vom zweiten Prämolaren des ersten Quadranten bis zum zweiten Prämolaren des zweiten Quadranten mit einem Satz der genannten Brackets bestückt. Die ersten Molaren wurden in allen Fällen außer dem der 2D® Lingual Brackets mit Bukkalröhrchen bestückt. Im Falle der 2D® Lingual Brackets wurde das Lingualröhrchen dieser Serie gewählt (Tab. 5.1).

Im Anhang finden sich exakte Listen der Materialzusammensetzung.

Tabelle 5.1 Übersicht der verwendeten Brackets

Bracket	Position	Bild ¹	Identifikationsnummer	Material
BioQuick® McLaugh/ Benn/Trev .022“	5-5		1.006 / 3.001	Stahl und EMF Legierungen
Brilliant® Roth .022“	5-5		POM	Polyoxymethylen
TruKlear® McLaugh/ Benn/Trev .022“	5-5		5.000 / 4.901 / 4.902	Aluminiumoxid, Polytherzeton, Polyphtalamid
QuicKlear® III McLaugh/ Benn/Trev .022“	5-5		5.000 / 3.001	Aluminiumoxid und Slot aus EMF Legierung
Micro Sprint® McLaugh/ Benn/Trev .022“	5-5		1.006	Stahl
Sprint® II McLaugh/ Benn/Trev .022“	5-5		1.006	Stahl
2D® Lingual mit langem, gingivalem Haken und Lingualröhrchen	6-6		1.000 / 1.002	Stahl
Bukkalröhrchen Edgew./Ricketts .022“	6+6		1.002 / 1.00 / 1.004 / 2.200	Stahl, Kupfer und EM Legierungen

¹ Die Abbildungen stammen aus dem Forestadent Katalog Nummer 35

5.7 MRT-Untersuchung in der durchgeführten Studie

Die in der Studie durchgeführten in vivo Versuche wurden im selben 1,5 Tesla (1,5-T) Magnetresonanztomographen (SIGNA Voyager der Marke GE Healthcare) durchgeführt. Bei der Magnetfeldstärke von 1,5 Tesla handelt es sich um eine in der Regel genutzte Feldstärke. Ein Kontrastmittel wurde nicht genutzt. Es wurden insgesamt neun MRT-Untersuchungen durchgeführt. Darunter zu Vergleichszwecken eine Untersuchung ohne Schiene und eine Untersuchung mit unbestückter Trägerschiene. Die Untersuchungen wurden bei gleichbleibenden und stetig reproduzierbaren Einstellungen neunmal wiederholt. Der Kopf der Probandin wurde dabei mit Schaumstoffkeilen fixiert. Damit sollten Bewegungen während der Untersuchung verhindert werden. Zur Bilddatenakquisition diente eine Kopf-Hals-Spule (Tab. 5.2). Die maximale Gradientenamplitude betrug 10 mT/m und die maximale Anstiegsrate 29,9 T/m/sec.

Tabelle 5.2 Übersicht über die Bildakquisition

	Phasenkodierrichtung	Frequenzkodierrichtung
Sagittale Bildakquisition	Anterior-posterior	Anterior-posterior
Koronare Bildakquisition	Links-rechts	Fuß-Kopf
Axiale Bildakquisition	Links-rechts	Anterior-posterior

Tabelle 5.3 zeigt die gewählten Geräteeinstellungen. Bei den Einstellungen handelt es sich um exemplarische Einstellungen, die routinemäßig zur Beurteilung der Kopf-Hals-Region genutzt werden. Diese stehen repräsentativ für die unterschiedlichen Artefaktanfälligkeiten.

Tabelle 5.3 Zusammenfassung der MRT-Geräteeinstellungen / Scanparameter, die im Rahmen der Studie verwendet wurden

	Sagittal T1	Sagittal T2	Axial T1
Sequenz	FSE	FSE	FSE
Schichtstärke (mm)	2	2	2
Voxel/ Pixelgröße	0,9 x 1,2	0,7 x 0,9	0,6 x 1,1
Pixel	183,8	186	133,63
Repetitionszeit (TR) (ms)	689,0 – 795,0	6856,0 – 7848,0	476,1 – 680,0
Echozeit (TE) (ms)	9,4 – 9,6	105,9 – 113,8	9,3 – 11,3
Flipwinkel (°)	160	160	160
Bandbreite	31,25	35,71	27,78
Turbo-/ Epifaktor	3	24	3

Die gewonnenen Scans wurden als Dicom-Format gespeichert und auf DVD gebrannt.

Im Weiteren wird die folgende Nummerierung der Scans, wie in Tabelle 5.4 beschrieben, beibehalten:

Tabelle 5.4 Nummerierung der Scans

Nummer des Scans	Untersuchte Apparatur
1	BioQuick®
2	Unbestückte Trägerschiene
3	Brilliant®
4	2D® Lingual
5	Keine Apparatur
6	QuicKlear® III
7	Micro Sprint®
8	Sprint® II
9	TruKlear®

Bei Untersuchung Nummer 5 (Abb. 5.20) handelt es sich um eine sogenannte „Nulllinien-Magnetresonanztomographie“. Bei dieser Aufnahme war keine Trägerschiene in situ. Um außerdem eine mögliche Artefaktbeeinflussung durch die genutzte Kunststoffschiene beurteilen zu können, wurde in Untersuchung Nummer 2 eine unbestückte Tiefziehschiene herangezogen. Dem Radiologen standen zur Auswertung lediglich durchnummerierte Schnitte zur Verfügung.

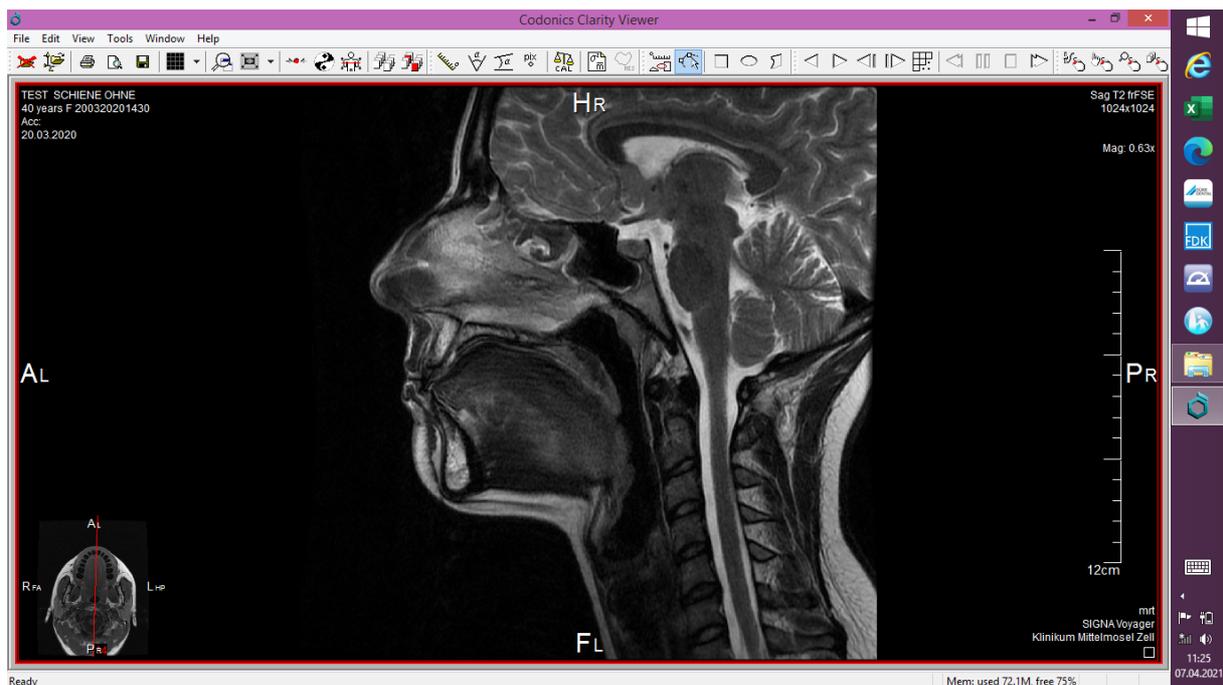


Abbildung 5.20 Screenshot der Untersuchung ohne Trägerschiene

5.8 Artefaktbestimmung

Als Grundlage dieser Arbeit dienten neun Datensätze. Abgesehen von den unterschiedlichen Attachments gab es keine nennenswerten Unterschiede, die die Ergebnisse hätten beeinflussen können.

Die Auswertung nahm ein Radiologe mit langjähriger klinischer Erfahrung vor. Ihm wurden zweidimensionale Einzelbilder der Scans (Tab. 5.5), die die gewählten anatomischen Strukturen zeigen, zur Auswertung bereitgestellt. Diese waren, wie oben beschrieben, durchnummeriert. Damit wurde sichergestellt, dass der Radiologe keine Kenntnis davon hatte, um welche festsitzenden Brackets es sich bei den einzelnen Aufnahmen handelte, bzw. bei welchen Aufnahmen keine oder eine unbestückte Trägerschiene untersucht wurde.

Folgende anatomische Strukturen waren Bestandteil der Auswertung:

Bei **Slice A** handelt es um einen T1-gewichteten Schnitt in der Sagittalebene durch das Kiefergelenk. Dieses ist aus zahnmedizinischer Sicht häufig Mittelpunkt der MRT-Untersuchung.

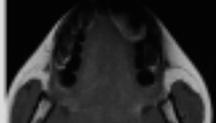
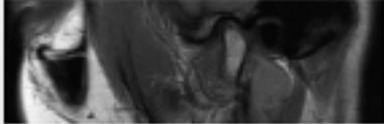
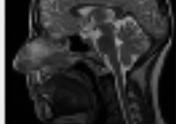
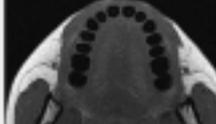
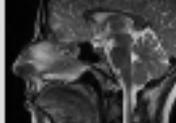
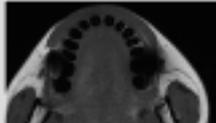
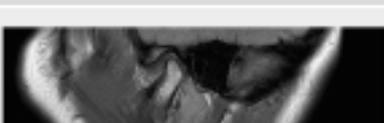
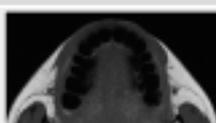
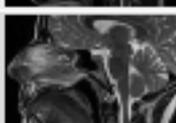
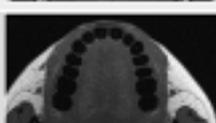
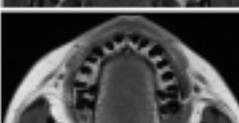
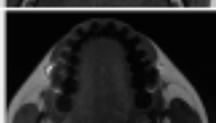
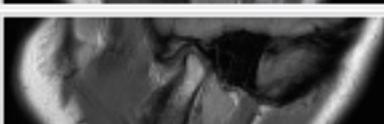
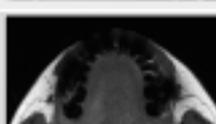
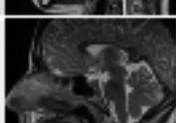
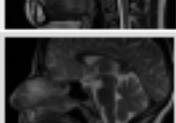
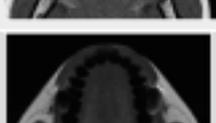
Slice B zeigt einen T2-gewichteten Schnitt in der Sagittalebene durch die Sella turcica. Es handelt sich um einen Medianschnitt. Der Schnitt soll stellvertretend für die Schädelbasis stehen. Er ist insofern relevant für den Kieferorthopäden, da sich bei Fernröntgenseitenanalysen eine Veränderung im Bereich der Sella turcica womöglich schon früh erkennen lässt (13). Bei Sichtung eines solchen Nebenbefundes sollte eine MRT-Untersuchung angefordert werden.

Slice A und B werden im Folgenden als „Regionen peripher der Mundhöhle“ bezeichnet.

Bei **Slice C** handelt es sich um einen T1-gewichteten Schnitt in der Axialebene durch die Oberkieferwurzeln in Höhe des Foramen incisivum. Es handelt sich um einen kranial der Brackets gelegenen Bereich, der sich in deren näher räumlicher Umgebung befindet. Slice C wird im Folgenden als „nähere Umgebung“ bezeichnet.

Slice D zeigt ebenfalls einen T1-gewichteten Schnitt in der Axialebene. Er liegt in unmittelbarer Umgebung der untersuchten Brackets. Sowohl auf Slice C als auch Slice D sind die Oberkieferzähne zu sehen. Slice D wird im Folgenden als „unmittelbarer Nahbereich“ bezeichnet.

Tabelle 5.5 Übersicht der Screenshots, die dem Radiologen zur Auswertung zur Verfügung standen

	SLICE A	SLICE B	SLICE C	SLICE D
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				

Die Diagnostizierbarkeit innerhalb dieser Regionen wurde anhand der Sichtbarkeit der anatomischen Struktur (Tab. 5.6) und der Einschränkung durch Artefakte (Tab. 5.7) beurteilt.

Tabelle 5.6 Systematik der Diagnostik anhand der Sichtbarkeit der gewählten anatomischen Struktur

Kategorie	Sichtbarkeit der anatomischen Struktur
1	Sehr gut
2	Gut
3	Befriedigend
4	Schlecht
5	Sehr schlecht

Tabelle 5.7 Systematik der Diagnostik anhand der möglichen Einschränkungen der Beurteilbarkeit der Anatomie

	Durch Artefakte eingeschränkte Beurteilbarkeit
JA	
NEIN	

Dabei gelten MRT-Untersuchungen, die mit einem Score 1 und 2 versehen wurden, als diagnostizierbar. MRT-Untersuchungen mit Score 3 wurden als moderat diagnostizierbar und alle MRT-Untersuchungen mit einem Score von 4 oder 5 als nicht diagnostizierbar angesehen.

5.9 Bestimmung der Erwärmung

Nach jeder der neun durchgeführten MRT-Aufnahmen notierte die Probandin ihre subjektiven Eindrücke bezogen auf die Erwärmung der Brackets. Dabei ging die Probandin zum einen auf das Empfinden während und zum anderen unmittelbar nach der MRT-Untersuchung ein.

5.10 Bestimmung der Beschleunigung

Zudem wurden nach jeder Aufnahme der Halt der Brackets geprüft, um ein mögliches Lösen oder eine Bewegung derselben festzuhalten.

6 Ergebnisse

Die gesammelten Daten wurden in Diagrammen, die mit Hilfe von Microsoft Excel erstellt wurden, veranschaulicht. Hierbei blieb die zuvor festgelegte Nummerierung der Scans weiterhin erhalten.

6.1 Artefakte

6.1.1 Sichtbarkeit der anatomischen Strukturen

a. Kiefergelenk in Slice A

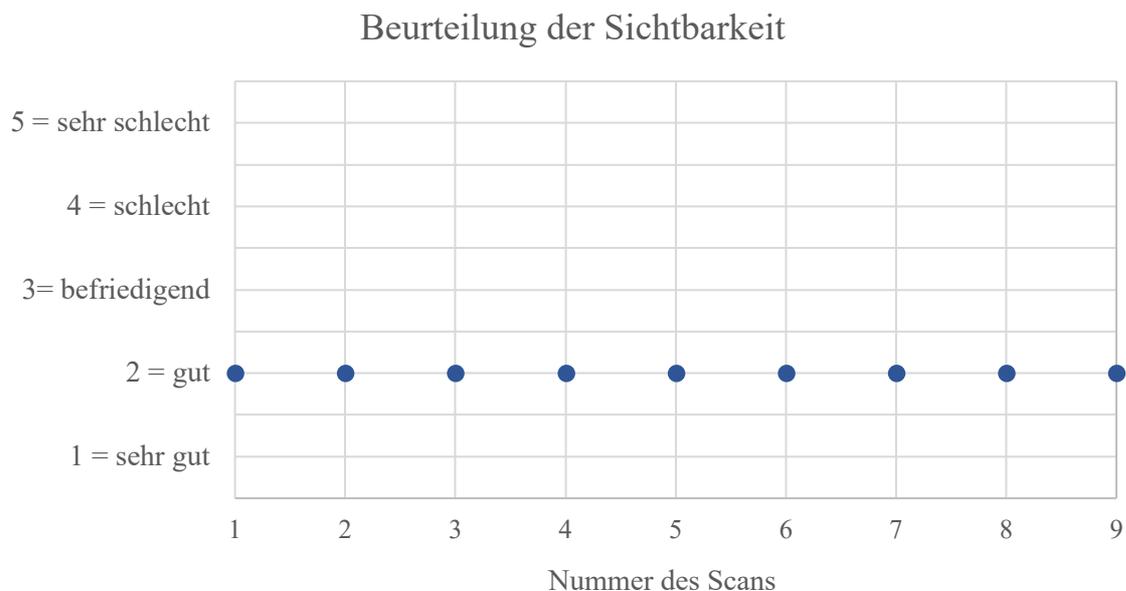


Abbildung 6.1 Ergebnisse der Sichtbarkeit des Kiefergelenks

Alle Scans wurden als gleich gut beurteilt (Abb. 6.1). Die Artefakte, die sich bei einigen MRT-Untersuchungen ergeben, haben keinen Einfluss auf die anatomische Struktur des Kiefergelenks (Abb. 6.2).



Abbildung 6.2 Übersicht der neun MRT-Untersuchungen in Slice A

b. Sella turcica in Slice B

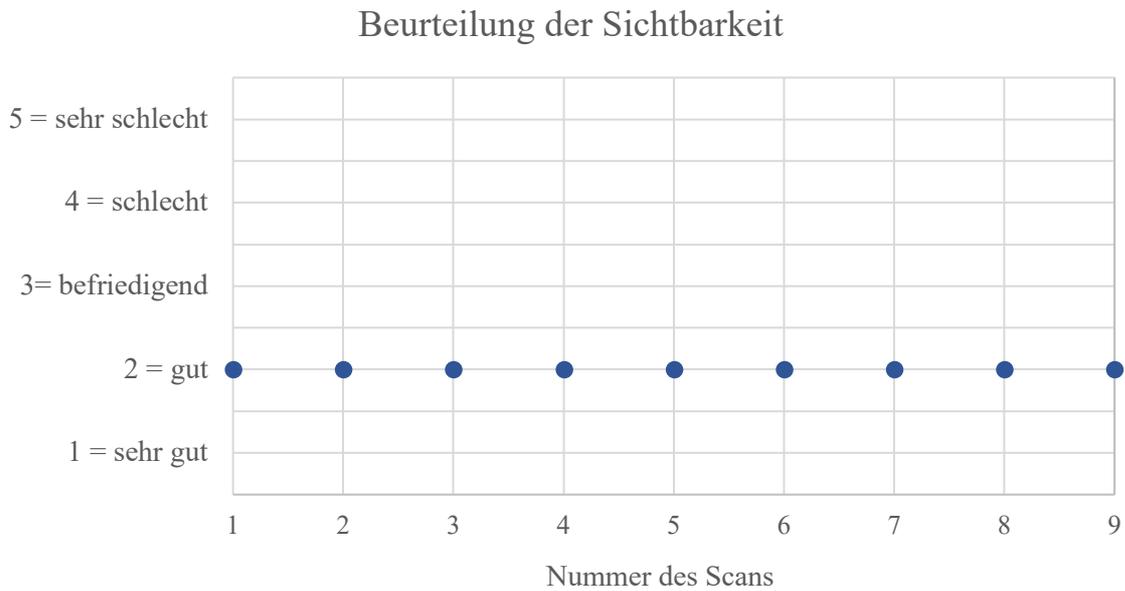


Abbildung 6.3 Ergebnisse der Sichtbarkeit der Sella turcica

Wie bei der anatomischen Struktur des Kiefergelenks ergibt sich, dass auch die Sella turcica, die stellvertretend für die Schädelbasis herangezogen wird, in allen MRT-Untersuchungen gleich gut zu beurteilen ist (Abb. 6.4). Eine Beeinflussung der Sichtbarkeit durch Artefakte ist nicht festzustellen. Die anatomische Struktur zeigt sich in allen Untersuchungen gut dargestellt (Abb. 6.3).

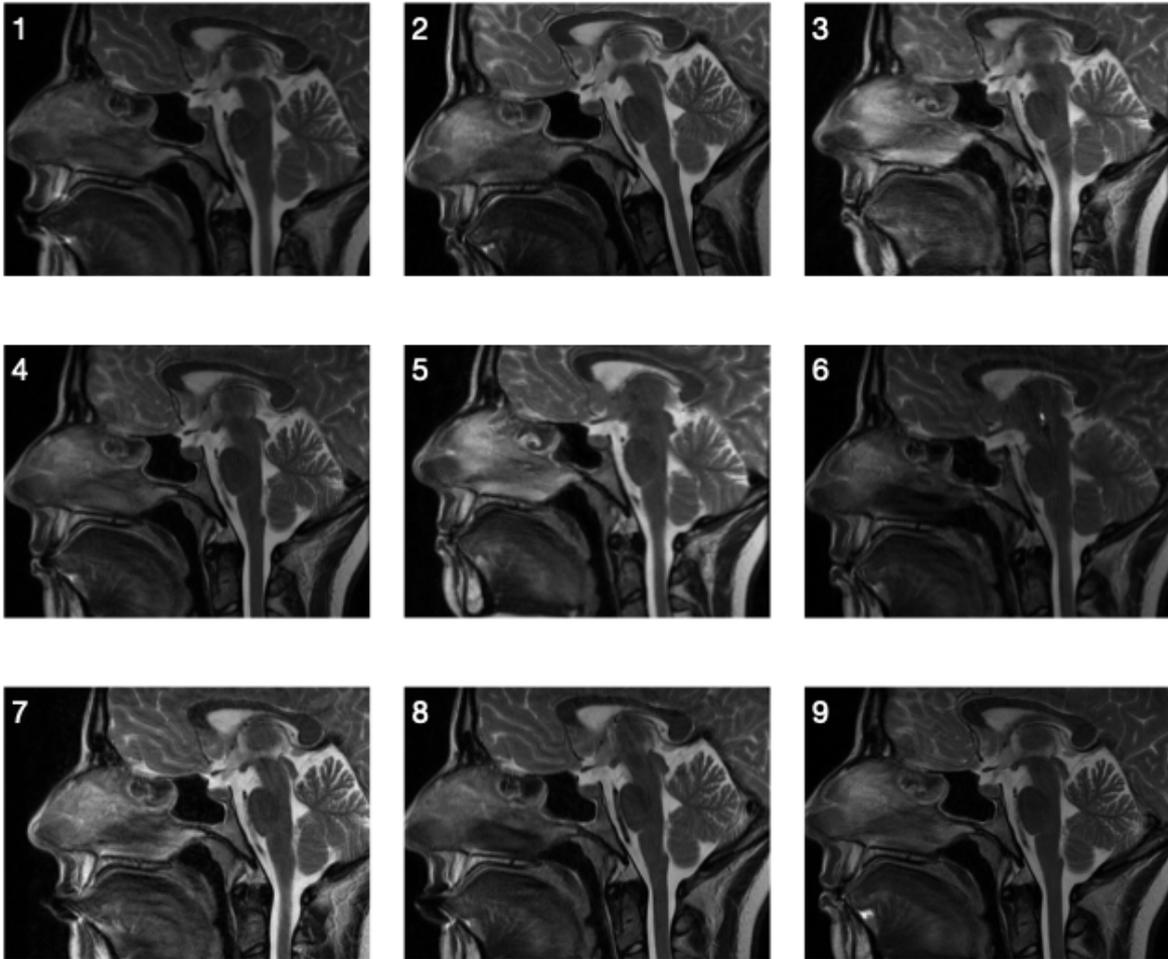


Abbildung 6.4 Übersicht der neun MRT-Untersuchungen in Slice B

c. Oberkieferwurzeln im Bereich von Eckzahn zu Eckzahn in Slice C

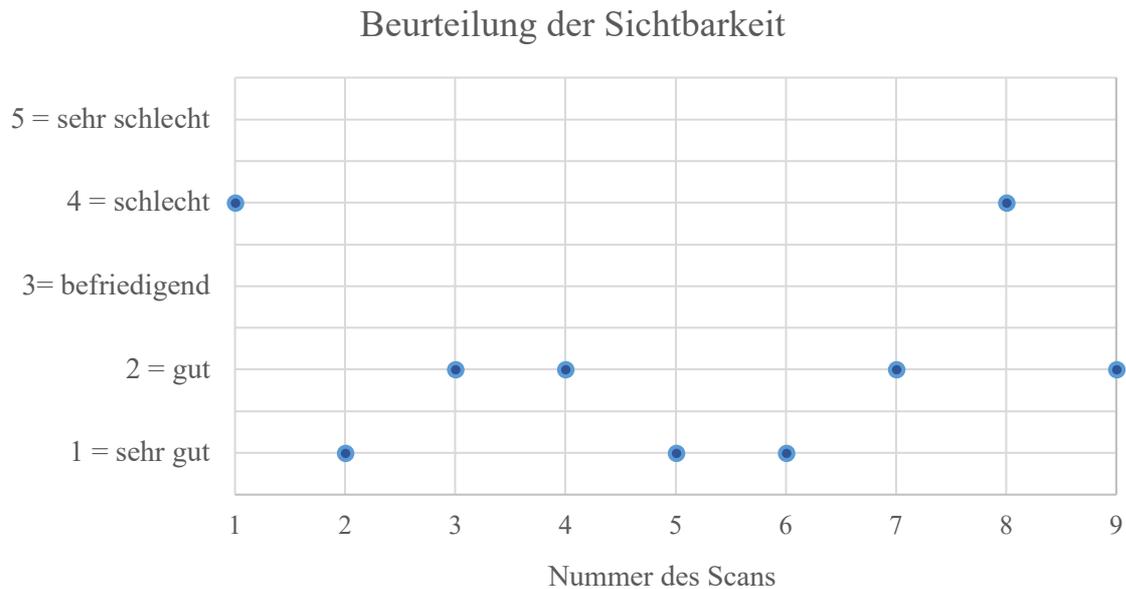


Abbildung 6.5 Ergebnisse der Sichtbarkeit der Oberkieferwurzeln auf Höhe des Foramen incisivum

Die Ergebnisse, die diese Region betreffen, sind in Abbildung 6.5 graphisch dargestellt.

Bei der gewählten anatomischen Struktur, die in Slice C (Abb. 6.6) zu beurteilen ist, handelt es sich um die als „nähere Umgebung“ zu den untersuchten Attachments definierte Region. Im Bereich zwischen den Eckzähnen erzielen die MRT-Untersuchungen Nummern 2, 5 und 6 sehr gute Sichtbarkeiten dieser anatomischen Region. Es handelt sich um die Untersuchungen ohne Schiene, mit unbestückter Trägerschiene und mit keramischen Brackets, die einen edelmetallfreien Slot aufweisen. Etwas schlechter schneiden die Untersuchungen 3, 4, 7 und 9 ab. Es handelt sich um Brackets aus Kunststoff, aus Stahl, welche lingual angebracht wurden, aus nickelfreiem Stahl und aus Keramik. Die schlechte Bewertung erzielen die Untersuchungen 1 und 8. Bei Untersuchung 1 und 8 handelt es sich um Brackets aus Stahl und um nickelfreie Stahlbrackets.

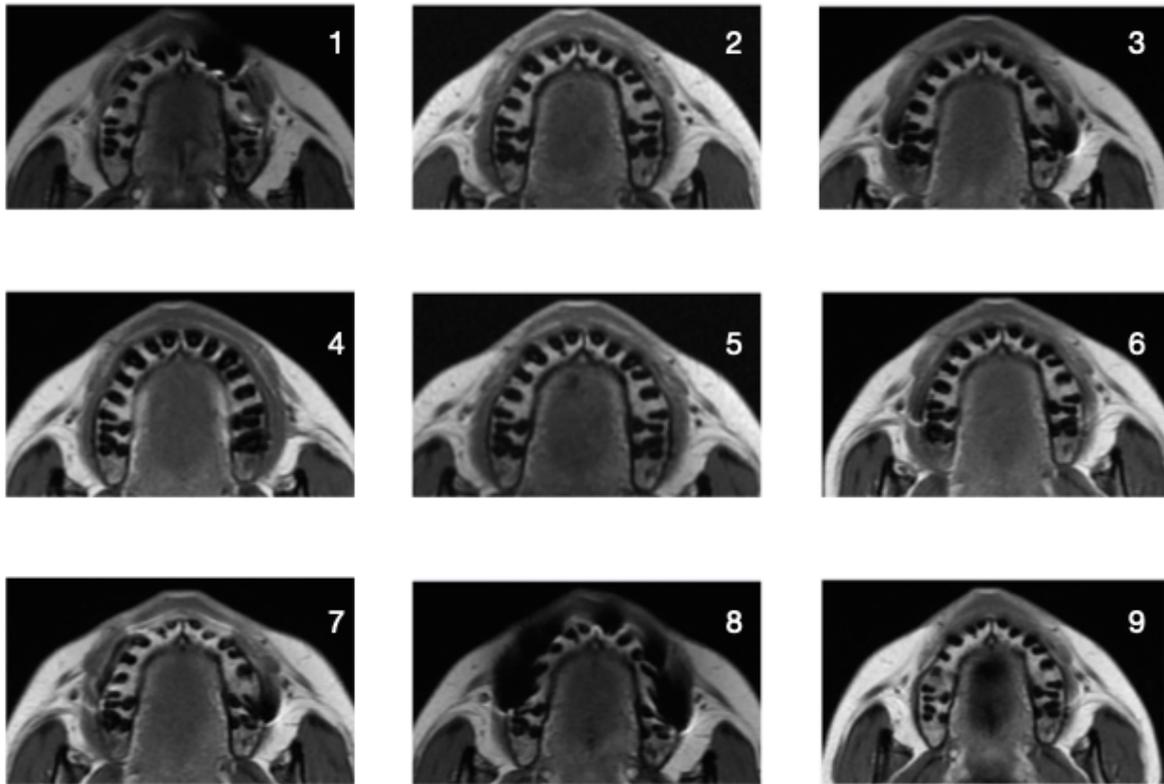


Abbildung 6.6 Übersicht der neun MRT-Untersuchungen in Slice C

d. Oberkieferzähne im Bereich von Eckzahn zu Eckzahn in Slice D

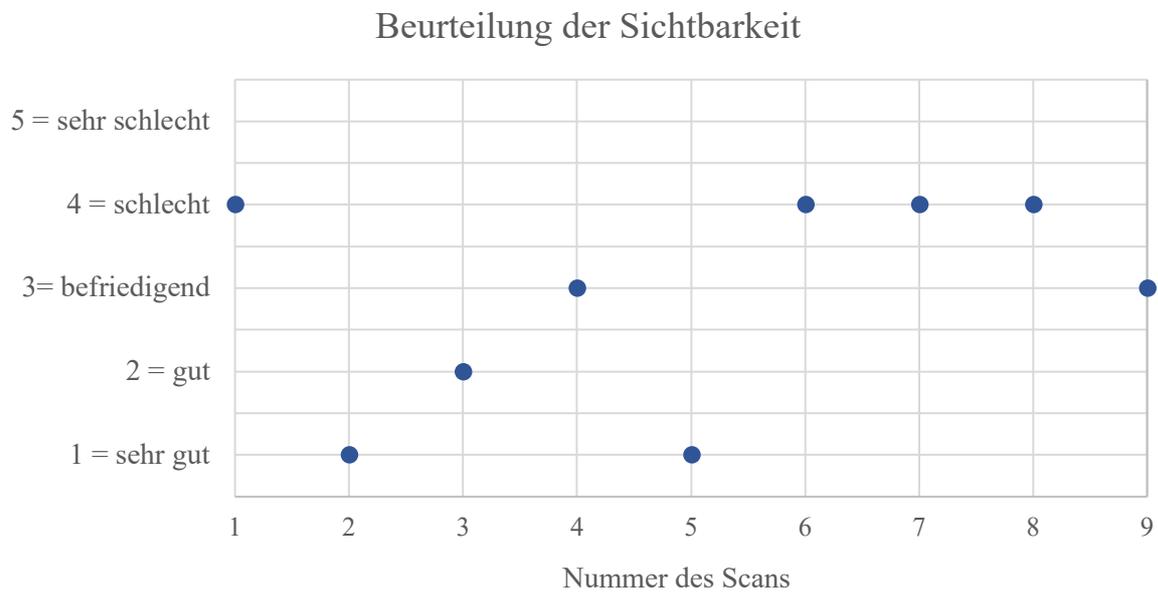


Abbildung 6.7 Ergebnisse der Sichtbarkeit der Oberkieferzähne

Diese anatomische Struktur, welche in Slice D (Abb. 6.8) dargestellt ist, wurde zuvor als „unmittelbarer Nahbereich“ definiert. Die Ergebnisse, die diese Region betreffen, sind in Abbildung 6.7 graphisch dargestellt.

Es ergeben sich signifikante Unterschiede in der Sichtbarkeit dieser Struktur. Die Untersuchungen 2 und 5 erzielen die beste Bewertung. Dabei handelt es sich um die Untersuchungen mit unbestückter und ohne Schiene. Eine gute Sichtbarkeit erzielt die Untersuchung 3 der Kunststoffbrackets. Befriedigende Sichtbarkeit erreicht Untersuchung 9 der Keramikbrackets und Untersuchung 4 der stählernen Lingualbrackets. Die Untersuchungen 7 und 8, mit Brackets der gleichen Reihe, die sich lediglich in ihrer Größe unterscheiden, erzielen beide eine „4=schlecht“ in der Sichtbarkeit. Dies gilt auch für die Untersuchung 6 der keramischen Brackets mit Metallslot und für die Untersuchung 1 der stählernen Brackets mit edelmetallfreien Legierungen.

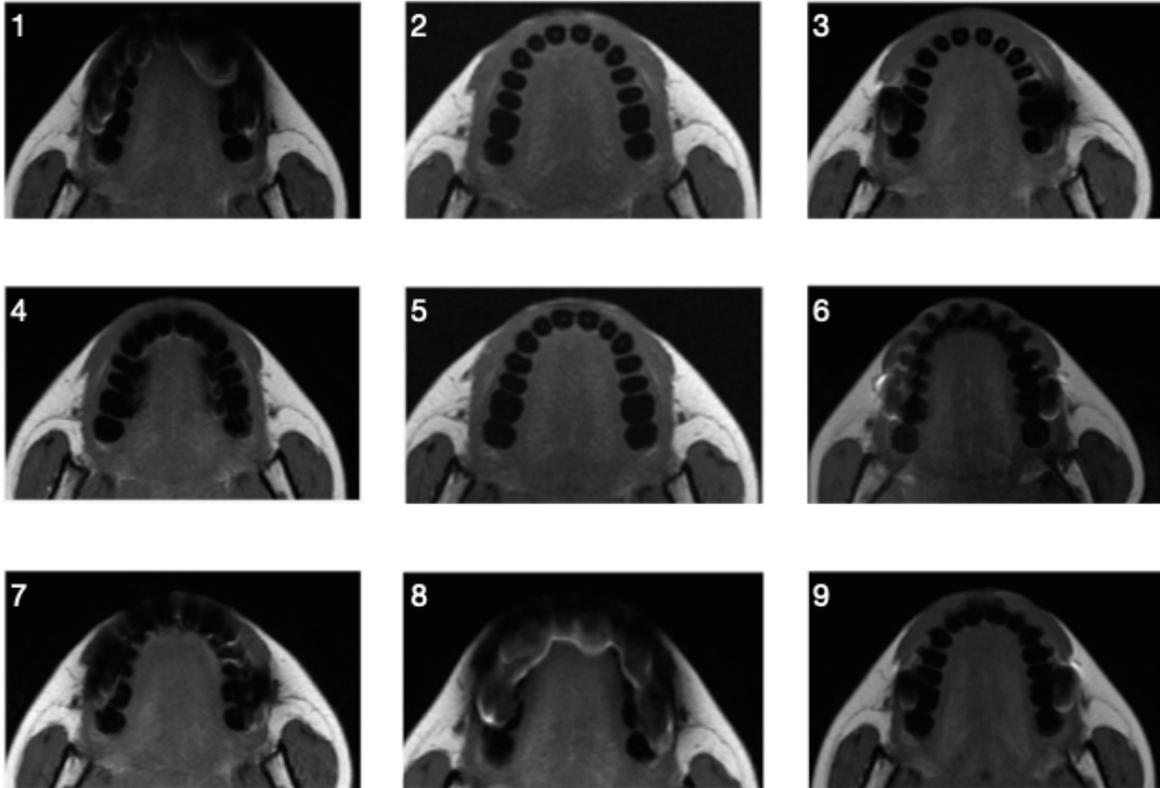


Abbildung 6.8 Übersicht der neun MRT-Untersuchungen in Slice D

6.1.2 Durch Artefakte eingeschränkte Beurteilbarkeit

a. Kiefergelenk in Slice A



Abbildung 6.9 Mögliche Einschränkungen der Beurteilbarkeit durch Artefakte im Bereich des Kiefergelenks

Alle Scans zeigen eine konsensuale Wertung dahingehend, dass im Bereich des Kiefergelenkes keine eingeschränkte Beurteilbarkeit vorliegt (Abb. 6.9). Das Kiefergelenk ist auch unter Verwendung der Attachments gut diagnostisch beurteilbar.

b. Sella turcica in Slice B

Einschränkung durch Artefakte

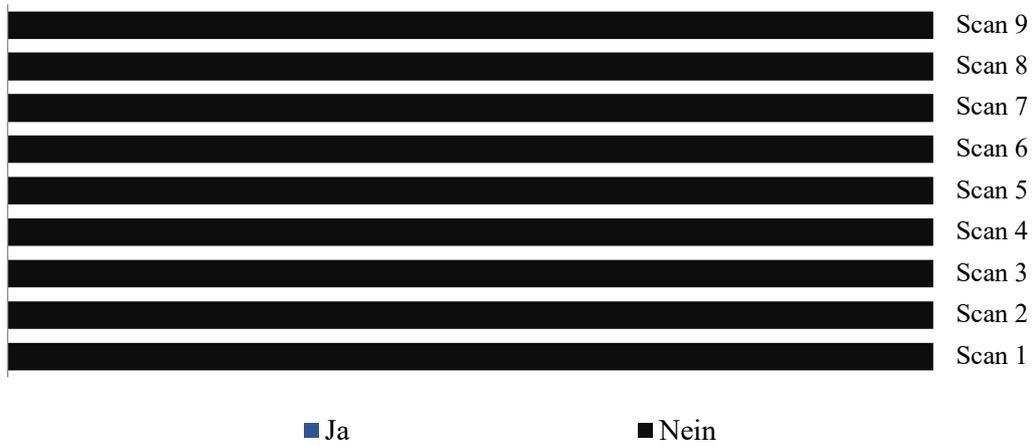


Abbildung 6.10 Mögliche Einschränkungen der Beurteilbarkeit durch Artefakte im Bereich der Sella turcica

Das Diagramm in Abbildung 6.10 zeigt, dass keine Einschränkungen der Beurteilbarkeit der Sella turcica vorliegen. Diese anatomische Struktur ist auch mit den verwendeten Attachments gut diagnostisch beurteilbar.

c. Oberkieferwurzeln im Bereich von Eckzahn zu Eckzahn in Slice C

Einschränkung durch Artefakte

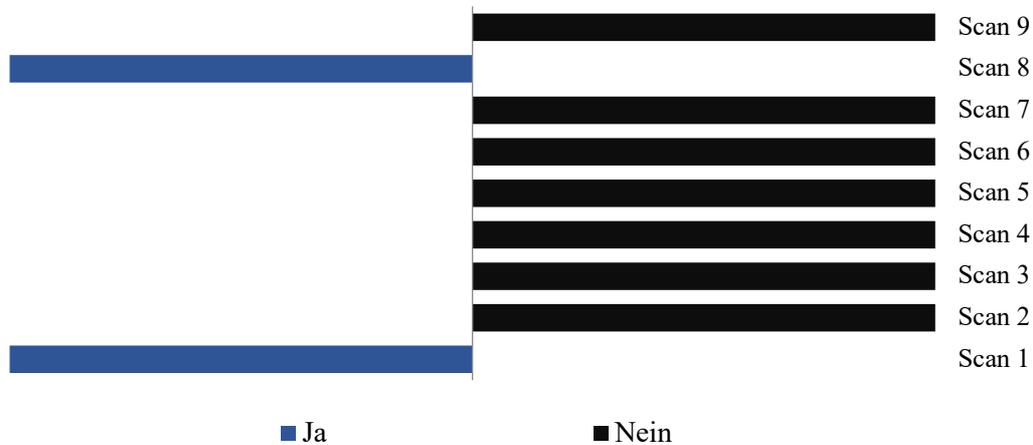


Abbildung 6.11 Mögliche Einschränkungen der Beurteilbarkeit durch Artefakte im Bereich der Oberkieferwurzeln auf Höhe des Foramen incisivum

Auf Höhe des Foramen incisivum ergibt sich, dass es in den Untersuchungen 1 und 8 zu einer durch Artefakte eingeschränkten Beurteilbarkeit dieser anatomischen Struktur kommt. Dabei handelt es sich um die selbstligierenden Stahlbrackets und die nickelfreien Stahlbrackets. Alle anderen Untersuchungen zeigen eine uneingeschränkte Beurteilbarkeit und damit auch ausreichende Diagnostizierbarkeit dieser Region (Abb. 6.11).

d. Oberkieferzähne im Bereich von Eckzahn zu Eckzahn in Slice D

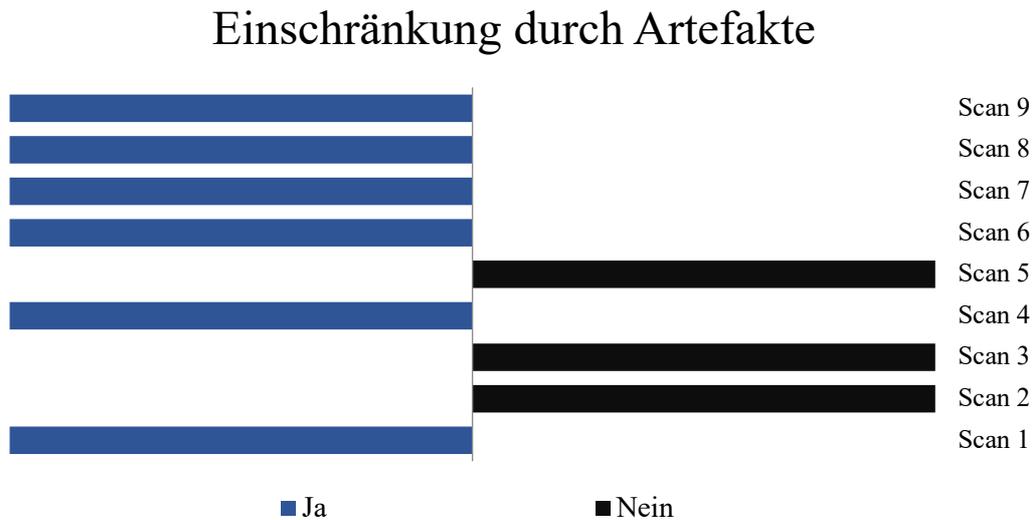


Abbildung 6.12 Mögliche Einschränkungen der Beurteilbarkeit durch Artefakte im Bereich der Oberkieferzähne

Im Diagramm in Abbildung 6.12 sind mögliche Einschränkungen der Beurteilbarkeit der Oberkieferzähne in unmittelbarer Umgebung zu den untersuchten Brackets durch die entstandenen Artefakte dargestellt.

Eine durch Artefakte eingeschränkte Beurteilbarkeit ergibt sich in den MRT-Untersuchungen 1, 4, 6, 7, 8 und 9. Lediglich die Untersuchungen mit unbestückter Schiene [2], ohne Schiene [5] und mit Kunststoffbrackets [3] scheinen uneingeschränkt durch Artefakte beurteilt werden zu können.

Zur Prüfung, ob und wie weit die Trägerschiene zur Artefaktentstehung beiträgt, wurde nicht nur eine MRT-Untersuchung zu Vergleichszwecken ohne Schiene, sondern auch eine mit einer unbestückten Trägerschiene angefertigt. Erwartungsgemäß stellte sich heraus, dass bei diesen MRT-Untersuchungen 2 und 5 keine Artefakte entstanden. Damit ist gezeigt, dass auch eine unbestückte Schiene nicht zur Artefaktentstehung beiträgt und somit auch nicht die Auswertbarkeit der anderen Scans beeinflusst. Demzufolge ist anzunehmen, dass die Artefakte der anderen MRT-Untersuchungen durch das jeweilige verwendete Attachment hervorgerufen wurden.

Aus den Diagrammen geht hervor, dass alle Attachments, welche Artefakte hervorrufen, einen Radius aufweisen, der so klein ist, dass er weder bis zur anatomischen Struktur der Sella turcica noch bis zu der des Kiefergelenks reicht.

6.2 Erwärmung der Attachments

Tabelle 6.1 Ergebnisse der subjektiv wahrgenommenen Erwärmung während und nach den MRT-Untersuchungen

Nummer des Scans	Erwärmung während der MRT-Untersuchung	Erwärmung direkt nach der MRT-Untersuchung
1	Ø	Ø
2	Ø	Ø
3	Ø	Ø
4	Ø	Ø
5	Ø	Ø
6	Ø	Ø
7	Ø	Ø
8	Ø	Ø
9	Ø	Ø

Für sämtliche getesteten Attachments ergab sich nach Berichten der Probandin kein merklicher Temperaturanstieg (Tab. 6.1). Dabei handelt es sich um einen subjektiv wahrgenommenen Eindruck während und direkt nach der jeweiligen MRT-Untersuchung.

6.3 Beschleunigung der Attachments

Tabelle 6.2 Ergebnisse der möglichen Ablösung der Attachments nach der MRT-Untersuchung

Nummer des Scans	Ablösung des Attachments nach der MRT- Untersuchung
1	Ø
2	Ø
3	Ø
4	Ø
5	Ø
6	Ø
7	Ø
8	Ø
9	Ø

Vor jeder MRT-Untersuchung wurde die Adhäsion der Brackets geprüft. Auch nach der jeweiligen MRT-Untersuchung ergab sich für keine der untersuchten Attachments eine Ablösung (Tab. 6.2).

7 Diskussion

7.1 Kritische Betrachtung der eigenen Untersuchung

7.1.1 Probandin

Durch die zuvor festgelegten Ein- und Ausschlusskriterien (siehe Material und Methode) wurden mögliche Artefaktquellen reduziert.

Während der Magnetresonanztomographie wurde der Kopf der Probandin durch eine Kopfschale fixiert, um die Reproduzierbarkeit und Standardisierung der MRT-Untersuchung zu gewährleisten. Bewegungen der Probandin zwischen und während der Scans konnten dadurch minimiert werden.

Die Ergebnisse beziehen sich auf die Anatomie einer ausgewachsenen Frau. Es ist möglich, dass sich das Ausmaß der Artefakte bei verschiedenen Körpergrößen und Staturen unterscheidet. Aufgrund der Anatomie könnten bei Kindern entferntere Regionen von Artefakten betroffen sein. Andere Studien bringen an, dass das Ausmaß von Artefakten von Patient zu Patient unterschiedlich ausfallen kann (5, 44).

Bei den Angaben zur Erwärmung der Attachments unterliegen die Ergebnisse einer Subjektivität, da diese Angaben nicht nachgemessen werden können. Es handelt sich um das Empfinden der Probandin.

7.1.2 Tiefziehschiene

Im Rahmen der Studie wurde auch die mögliche artefaktbeeinflussende Wirkung der Trägerschiene der Prüfkörper untersucht. Sie war Gegenstand einer Versuchsreihe. Die Auswertungen aller MRT-Untersuchungen wurden durch einen Radiologen ohne Kenntnis der vorgegebenen Situation durchgeführt. Die MRT-Untersuchung mit Schiene erzielte die gleiche Wertung wie der Scan ohne Schiene. Diese Versuchsreihe belegt, dass die Schiene keinen negativen Einfluss auf die diagnostische Aussagekraft der MRT-Untersuchung hat. Andere Studien kamen ebenfalls zu dem Ergebnis, dass Tiefziehschienen die MRT-Untersuchungen in ihrer diagnostischen Aussagekraft nicht beeinträchtigen (5).

7.1.3 Magnetresonanztomographie

Alle Ergebnisse dieser Studie beziehen sich auf Magnetresonanztomographen mit einer Magnetfeldstärke von 1,5 Tesla, die in der Regel im klinischen Alltag Anwendung findet (3). Daher können die Ergebnisse und Daten, die im Rahmen dieser Studie gewonnen wurden, nicht auf höhere Magnetfeldstärken transferiert werden. Vielmehr müssten dazu die vorliegenden Untersuchungen auch bei entsprechend höheren Magnetfeldstärken durchgeführt werden. Attachments, die mit einer Magnetfeldstärke von 1,5 Tesla kompatibel sind, können mit einer höheren Magnetfeldstärke inkompatibel sein (29, 43).

Ähnliches gilt auch für die gewählten Geräteeinstellungen. Diese finden in der Regel Anwendung in der klinischen Untersuchung des Kopf-Hals-Bereiches. Durch andere Geräteparameter können Artefakte akzentuiert oder minimiert werden (30, 44). Die Ergebnisse dieser Studie können nicht auf alle Sequenzen und Geräte extrapoliert werden. Sie sollten in Folge dessen als Richtwerte und nicht als absolute Bewertung betrachtet werden.

7.1.4 Attachments

Bei den in der Studie verwendeten Attachments handelt es sich um eine Auswahl der Marke FORESTADENT (Pforzheim, Deutschland). Die gewonnenen Ergebnisse sind nicht auf Attachments anderer Marken übertragbar. Es kommt auf die genaue Materialzusammensetzung und Größe der jeweiligen Attachments an (44, 46, 47, 4). Ozawa *et al.* berichten über signifikante Größenunterschiede der Artefakte, die sie mit dem Gewicht der verwendeten Brackets in Verbindung bringen (32).

Nicht von jeder getesteten Bracketserie existiert ein dazugehöriges Bukkalröhrchen aus demselben Material. Daher wurden in sechs Fällen einheitliche Bukkalröhrchen (siehe Material und Methode) und im Fall der Lingualbrackets die dazugehörigen Lingualröhrchen genutzt. Um dem Einfluss der Molarenröhrchen zu umgehen, wurde bei der Auswertung die Region von Eckzahn zu Eckzahn betrachtet.

In der Studie wurden keine Auswirkungen leicht entfernbarer Apparaturen untersucht. Zu diesen zählen beispielsweise Herbst®-Scharniere, SUS-Federn und kieferorthopädische Bogendrähte und Ligaturen. Viele Autoren empfehlen die Entfernung herausnehmbarer metallischer Apparaturen vor Anfertigung einer MRT-Untersuchung (33).

7.1.5 Auswertung

Zur Auswertung wurden Screenshots der einzelnen Untersuchungen angefertigt. Durch mögliche Bewegungen der Probandin während und zwischen den einzelnen Untersuchungen können sich die Screenshots in ihrer Position minimal unterscheiden.

Wie schon von Zachriat *et al.* beschrieben, unterliegt die visuelle Auswertung des Radiologen einer gewissen Subjektivität, die bei der kritischen Betrachtung der Ergebnisse nicht zu vernachlässigen ist (46).

7.2 Vergleich der eigenen Ergebnisse mit denen aus der Literatur

Bei der Magnetresonanztomographie handelt es sich um ein wichtiges Bildgebungsverfahren ohne Strahlenexposition. Sie wird mehr und mehr zur Diagnostik von Pathologien im Kopf-Hals-Bereich herangezogen (36).

Viele Patienten profitieren von diesem Diagnostikverfahren. Dazu zählen beispielsweise Pathologien wie Multiple Sklerose, Alzheimer, Migräne, Clusterkopfschmerz, Aneurysmen, Tumore, Epilepsie, andere Anfallsleiden und Zerebralparese (9, 39). Außerdem wird das „dental MRI“ auch im Fachgebiet der Parodontologie, Endodontologie, Kariologie und Implantologie eingesetzt (36).

Zur kieferorthopädischen Standarddiagnostik zählen das Orthopantomogramm (OPG) als auch die Fernröntgenseitenaufnahme (FRS) (34). Der Kieferorthopäde trägt eine hohe Verantwortung, da er aufgrund dieser Diagnostikverfahren für den Patienten schwerwiegende Pathologien als Erster entdecken kann (13). Glasl *et al.* zitieren in ihrem Artikel Moffitt und Mitarbeiter, die anmerken, dass womöglich etwa die Hälfte der Kieferorthopäden eine signifikante, potenziell lebensbedrohliche Pathologie auf einem Fernröntgenseitenbild entdecken (13). In der Fernröntgenseitenaufnahme können sich beispielsweise Pathologien im Bereich der Sella turcica zeigen. Differentialdiagnostisch sind dabei in erster Linie Hypophysentumore zu nennen (13). Eine Vergrößerung der Sella turcica und Arrosionen ihrer Begrenzung können dabei röntgenologische Hinweise sein (13). Bei Verdacht auf einen Tumor im Bereich der Sella turcica kann eine Magnetresonanztomographie zur Diagnosestellung beitragen (44, 13). Die Abklärung dieser Befunde mittels Magnetresonanztomographie sollte auch mit kieferorthopädischen Attachments möglich sein,

um eine definitive Diagnose stellen zu können. Daher war in der vorliegenden Studie eine genaue Untersuchung der Sella turcica von Relevanz.

7.2.1 Artefakte

Artefakte können dazu führen, dass wichtige klinische Informationen zerstört werden. Dadurch kann es zu diagnostischen Fehlinterpretationen kommen (44). Einigkeit herrscht dahingehend, dass ein beeinträchtigter Scan nicht zur Diagnostik herangezogen werden sollte und daher wiederholt werden muss (5, 44). Das Wiederholen der MRT-Untersuchung stellt dabei ein kostspieliges Prozedere dar und kann dazu führen, dass Diagnosen erst mit erheblicher zeitlicher Verzögerung gestellt werden können (9). Artefakte können viele Ursachen haben. Eine davon stellen kieferorthopädische Apparaturen dar, die die diagnostische Aussagekraft von MRT-Untersuchungen des Kopf-Hals-Bereiches – vor allem der Mundhöhle und angrenzender Regionen – einschränken können (15).

Die in dieser Studie festgestellten Artefakte beschränken sich, wenn vorhanden, auf den Bereich der Mundhöhle. Peripher gelegene Regionen, wie das Kiefergelenk und die Sella turcica bleiben unbeeinflusst. Sadowsky *et al.* kamen schon 1988 zu dem Schluss, dass Regionen, die nahe dem artefaktverursachenden Objekt liegen, am signifikantesten eingeschränkt sind. Die Regionen, die sich weiter entfernt befinden, waren weniger eingeschränkt (37). Andere Studien bestätigen diese Annahme (9, 5).

Je größer der Abstand zwischen der Apparatur und der gewünschten Region, desto geringer sind die dadurch bedingten Verzerrungen und Signalverluste (33, 16, 44). Daher sollte die Entscheidung, ob ein kieferorthopädisches Attachment belassen werden kann, vor dem Hintergrund der anatomischen Zielregion getroffen werden (33, 46). Schließlich stören Artefakte nicht per se die Regionen, die von Interesse sind (3). Einige Autoren raten sogar dazu, Patienten prophylaktisch nur mit kieferorthopädischen Attachments zu versorgen, die keine Signalverluste und Verzerrungen zur Folge haben. Aus medizinischer Sicht ist es jedoch nicht möglich, eine Vorhersage über mögliche zukünftige Probleme des Patienten zu stellen, die eine MRT-Untersuchung mit sich ziehen könnten. Dennoch besteht die Möglichkeit, Patienten, die regelmäßig eine MRT-Untersuchung benötigen, von vorne herein mit Brackets zu versorgen, die keine Einschränkungen der MRT-Bildgebung verursachen (33).

In der vorliegenden Studie wurden Attachments verschiedener Materialien der Marke FORESTADENT (Pforzheim, Deutschland) untersucht. Diese lassen sich in vier

Hauptgruppen unterteilen, die im Folgenden mit den Erkenntnissen der vorliegenden Literatur diskutiert werden.

a. Kunststoffbrackets

Die aktuelle Studie zeigt, dass Kunststoffbrackets der Marke FORESTADENT (Pforzheim, Deutschland) den geringsten Einfluss auf die diagnostische Aussagekraft der MRT-Untersuchungen von allen sieben getesteten Brackets hervorrufen. Sowohl die nähere Umgebung, als auch der unmittelbare Nahbereich werden nicht negativ beeinflusst. Demnach sind auch Strukturen der Mundhöhle und der Zähne diagnostizierbar. Auch Elison *et al.* testeten Kunststoffbrackets im 1,5 Tesla Magnetresonanztomographen und kamen zu einem ähnlichen Ergebnis, da auch sie den Einfluss dieser Brackets auf die diagnostische Aussagekraft als vernachlässigbar einstufen (9).

Demnach können Kunststoffbrackets auch für Untersuchungen des Kopf-Hals-Bereichs *in situ* belassen werden. Eine prophylaktische Entfernung ist nicht zu empfehlen.

b. Vollkeramikbrackets

Vollkeramikbrackets der Marke FORESTADENT (Pforzheim, Deutschland) beeinflussen die diagnostische Aussagekraft der MRT-Untersuchungen nur geringfügig. Dabei beschränken sich die entstandenen Artefakte auf den unmittelbaren Nahbereich. Andere Arbeitsgruppen kommen ebenfalls zu dem Ergebnis, dass Vollkeramikbrackets für MRT-Untersuchungen des Kopf-Hals-Bereiches belassen werden können, da sie nur wenig Einfluss auf die diagnostische Aussagekraft haben (9). Beau *et al.* untersuchten den Einfluss vollkeramischer Brackets im 1,5 Tesla Magnetresonanztomographen. Die entstandenen Artefakte betrafen – wie in der aktuellen Studie – die Mundhöhle (3). Auch Untersuchungen vollkeramischer Brackets im 3 Tesla Magnetresonanztomographen kamen zu dem Schluss, dass diese keine starken Bildverzerrungen verursachen (7). Es handelte sich auch dabei um lokalisierte Artefakte, die die diagnostische Aussagekraft des umliegenden Gewebes nicht beeinträchtigten (7).

Daher können Vollkeramikbrackets der Marke FORESTADENT (Pforzheim, Deutschland) für Untersuchungen belassen werden, deren Zielregion sich nicht im unmittelbaren Nahbereich befindet.

c. Keramikbrackets mit Metallslot

Keramikbrackets mit Metallslot der Marke FORESTADENT (Pforzheim, Deutschland) rufen signifikante Artefakte im unmittelbaren Nahbereich hervor. Dadurch ist die diagnostische Aussagekraft in diesem Bereich stark beeinträchtigt. Die entstandenen Artefakte beschränken sich auf den unmittelbaren Nahbereich, so dass die nähere Umgebung nicht beeinträchtigt ist. Das Ergebnis stimmt mit dem der Arbeitsgruppe Cox *et al.* überein (7). Es wurden ebenfalls starke lokalisierte Bildverzerrungen beobachtet, die aber die diagnostische Aussagekraft des umliegenden Gewebes nicht beeinträchtigten (7).

Im Vergleich der Keramikbrackets mit Metallslots und der Vollkeramikbrackets zeigt sich der Einfluss von metallischen Slots, der im Magnetresonanztomographen nicht zu vernachlässigen ist. In der aktuellen Studie wird deutlich, dass Keramikbrackets mit metallischen Slots der Marke FORESTADENT (Pforzheim, Deutschland) zu signifikanten Artefakten im unmittelbaren Nahbereich führen. Diese beeinträchtigen die diagnostische Aussagekraft im 1,5 Tesla Magnetresonanztomographen nur bedingt, da es sich bei den Artefakten um sehr kleine, stark auf den Bereich um die Attachments beschränkten, Bildverzerrungen handelt. Der Artefaktradius ist demnach eng begrenzt.

Eine prophylaktische Entfernung ist jedenfalls nicht empfohlen, wenn es sich bei der Zielregion um eine Region jenseits der Mundhöhle handelt.

d. Stahlbrackets

Stahlbrackets der Marke FORESTADENT (Pforzheim, Deutschland) verursachen in der aktuellen Studie signifikante Artefakte. Aber auch dabei lassen sich Unterschiede zwischen den getesteten Brackets erkennen. Alle entstandenen Artefakte beschränken sich dabei wieder auf die Mundhöhle. Lokalisierte Artefakte, die die nähere Umgebung nicht beeinflussen, rufen lingual angebrachte Edelstahlbrackets und kleine nickelfreie Brackets hervor. Größere nickelfreie Brackets und selbstligierende Stahlbrackets beeinflussen auch die nähere Umgebung. Andere Studien beschäftigten sich bereits mit Stahlbrackets und fanden dabei einige Zusammenhänge heraus. Diese werden im Folgenden, auch vor dem Hintergrund der Ergebnisse dieser Studie, diskutiert.

aa. Größe:

Allgemein ist bekannt, dass ein Zusammenhang zwischen Artefakten und dem artefaktverursachenden Objekten und dessen Größe, Form, Materialzusammensetzung und Gewicht besteht (10, 33, 32). Auch in der vorliegende Studie bestätigt sich der Zusammenhang zwischen Objektgröße und entstandenen Artefakten. Je größer der Durchmesser des artefaktverursachenden Objektes, desto größer die resultierende Verzerrung oder der Signalverlust. In der vorliegenden Studie lässt sich dieser Zusammenhang anhand der nickelfreien Stahlbrackets feststellen. Dabei handelt es sich um materialgleiche Brackets, die sich in ihrer Größe unterscheiden. Die kleineren Brackets rufen Artefakte hervor, die sich auf den unmittelbaren Nahbereich beschränken, während die größeren Brackets dieser Serie auch die nähere Umgebung negativ beeinflussen.

bb. Materialzusammensetzung und magnetische Permeabilität:

Das Ausmaß der durch Stahlbrackets ausgelösten Artefakte unterscheidet sich in der durchgeführten Studie von denen anderer Arbeitsgruppen wie beispielsweise der um Elison *et al.* und Beau *et al.*. Elison *et al.* untersuchten Attachments aus 17-4er und 18-8er Stahl (9). Sie forderten eine Entfernung jeglicher Stahlattachments vor Anfertigung einer MRT-Untersuchung des Kopfes bei 1,5 Tesla, obwohl sie bei den zwei getesteten Stahlsorten sehr unterschiedliche Ergebnisse erhielten (9). Dabei führte 17-4er Stahl zu deutlich mehr Artefakten als 18-8er Stahl (9). Beau *et al.* beobachteten Artefakte, die Mund-, Kieferhöhle, Kiefergelenk und hintere Schädelgrube nicht diagnostizierbar darstellten (3). Allgemein sind die Ergebnisse zum Thema Stahlbrackets in der vorliegenden Literatur sehr unterschiedlich. Dies zeigt unter anderem eine Studie, bei der die Artefaktradien um Stahlbrackets bestimmt wurden. Dabei ergaben sich im 1,5 Tesla Magnetresonanztomographen Artefaktradien um Stahlprodukte zwischen 10,29mm und 73,62mm (46).

Die unterschiedlichen Ergebnisse – die auch die aktuelle Studie im Vergleich zu vorangegangenen betrifft – können damit erklärt werden, dass die Produktgruppe „Stahl“ sehr inhomogen ist, da auch die Kenntnis des Gefüges keine eindeutige Vorhersage zulässt (46). Dies beruht auf der Umwandlung der Stähle durch Kaltverformung (46).

In der durchgeführten Studie verzeichnen sich unterschiedlich weitreichende Artefakte, die durch die verwendeten Stahlbrackets bedingt sind. Alle Stahlbrackets rufen Artefakte im unmittelbaren Nahbereich hervor, aber nicht jede Sorte der Brackets beeinflusst auch die

nähere Umgebung negativ. Bei den Brackets mit den weitreichendsten Artefakten handelt es sich um selbstligierende Stahlbrackets und nickelfreie Stahlbrackets. Die Unterschiede zu den Studien von Elison *et al.* und Beau *et al.* können damit erklärt werden, dass es sich bei den verwendeten Brackets um solche unterschiedlicher Materialzusammensetzungen und verschiedener magnetischer Permeabilität handelte. Laut Blankenstein *et al.* wird die magnetische Permeabilität nicht durch die Hersteller deklariert (4). Nach Bestimmung der magnetischen Permeabilität eines fraglichen Attachments kann eine Vorhersage über die Maximalgröße des Artefakts bestimmt werden (46).

cc. Magnetfeldstärke und Sequenz:

Die Tatsache, dass ein Zusammenhang zwischen Magnetfeldstärke, der gewählten Sequenz und dem Ausmaß der Artefakte besteht, ist bekannt (11, 46, 29). Andere Studien beschäftigten sich bei höheren Magnetfeldstärken mit Stahlbrackets. So befürwortete die Arbeitsgruppe um Cassetta *et al.* die Entfernung kieferorthopädischer Brackets aus Edelstahl bei Patienten vor einer 3 Tesla MRT-Untersuchung zur Beurteilung der Nasennebenhöhlen, der Kopf-Hals-Region und der Halswirbelsäule (5). Dabei unterscheiden sich die Ausmaße der von Cassetta *et al.* verzeichneten Artefakte zu denen der aktuellen Studie deutlich. Das könnte mit der höheren Feldstärke zusammenhängen (11). Eine Klärung dieses Zusammenhangs könnte mit der Untersuchung der getesteten Brackets der Marke FORESTADENT (Pforzheim, Deutschland) bei höheren Magnetfeldstärken erfolgen.

In Bezug auf das Ausmaß von Artefakten und Sequenzen ist folgendes bekannt: Spin-Echo-Sequenzen mit kurzer Echozeit (TE-Zeit) gelten am wenigsten empfindlich hinsichtlich der Entstehung von Artefakten bzw. sie sollen den Signalverlust verringern (33, 6, 44).

dd. Ausmaß:

Die Ergebnisse der aktuellen Studie zum Thema Stahlbrackets der Marke FORESTADENT (Pforzheim, Deutschland) zeigen, dass diese die signifikantesten Artefakte hervorrufen. Andere Studien bestätigen dieses Ergebnis. Zachriat *et al.* vergleichen Artefaktradien um Keramik- und Stahlbrackets (46). Dabei war das Ausmaß der Artefakte um Stahlbrackets signifikant größer als das um Vollkeramikbrackets (46).

Die Artefakte, verursacht durch Stahlbrackets, stellen sich in der aktuellen Studie umschrieben dar. Die gesammelten Daten stimmen insofern nicht mit denen der aktuellen Literatur überein, in der die überwiegende Zahl jüngster Studien die grundsätzliche Entfernung von Stahlprodukten vor einer Magnetresonanztomographie fordert (46).

Die Entscheidung, ob Brackets zu entfernen sind, sollte daher je nach Zielregion getroffen werden. Von der Entfernung vor Anfertigung einer Magnetresonanztomographie zur Beurteilung des Kiefergelenks, der Sella turcica und Regionen jenseits des Kopf-Hals-Bereichs, kann bei Verwendung der in dieser Studie untersuchten Brackets abgesehen werden.

Zusammenfassend sprechen die Ergebnisse der vorliegenden Studie dafür, dass Brackets aus Kunststoff die diagnostische Aussagekraft des umliegenden Gewebes am wenigsten beeinflussen. Im Fall der Vollkeramikbrackets kommt es zu einer moderaten Beeinflussung. Diese könnten daher auch bei Patienten eingesetzt werden, die sich regelmäßigen MRT-Untersuchungen unterziehen müssen. Keramikbrackets mit Metallslot verursachen Artefakte, die die Sichtbarkeit des unmittelbaren Nahbereichs beeinflussen.

Alle vier getesteten Stahlbrackets verursachten Artefakte im unmittelbaren Nahbereich. Einen negativen Einfluss, der sich in Artefakten äußerte, wurde in näherer Umgebung der selbstligierenden Stahlbrackets und der großen Variante der nickelfreien Stahlbrackets beobachtet. Jenseits der Kopf-Hals-Region ist bei den in der vorliegenden Studie getesteten Brackets nicht mit Artefakten zu rechnen. Dieses Ergebnis deckt sich mit den Ergebnissen anderer Studien (46).

7.2.2 Erwärmung

Ein weiterer zu berücksichtigender Aspekt ergibt sich hinsichtlich der möglichen Erwärmung von kieferorthopädischen Apparaturen und damit die verbundene MRT-Sicherheit (44). Allgemein gilt die Magnetresonanztomographie als eine sichere Untersuchung. Trotzdem liegen Berichte von Zwischenfällen bei Patienten mit metallischen Objekten vor (35). Regier *et al.* zitieren in ihrem Artikel Shellock und Crues, die zu dem Ergebnis kamen, dass „die Gefahr der Erwärmung insbesondere für leitende Materialien mit länglicher Form erhöht ist“, zu denen beispielsweise einige Katheter, Sonden und Elektroden gehören (35,41). Eine Studie beobachteten einen Temperaturanstieg von bis zu 63,1 °C an der Spitze einer Schrittmacherelektrode (1). Andere Studien stellen ebenfalls einen Zusammenhang zwischen Erwärmung und Form bzw. Größe der Objekte her (2). So konnte gezeigt werden, dass es zu keiner klinisch relevanten Erwärmung bei metallischen Gegenständen kommt, die ein Ausmaß von weniger als zwei Zentimetern aufweisen (2). Objekte, die einen kleinen Durchmesser aufweisen, begünstigen keine Leitfähigkeit für die elektromagnetische Kopplung eines Radiofrequenzfeldes (35). Zu diesen Objekten zählen kieferorthopädische Brackets, die dementsprechend zu einer nicht nennenswerten bzw. nicht vorhandenen Wärmeentwicklung führen (35).

Basierend auf den Berichten der Probandin der experimentellen Studie kann die radiofrequenzinduzierte Erwärmung der untersuchten Brackets im 1,5 Tesla Magnetfeld als gering bzw. nicht vorhanden eingestuft werden. Eine Messung der möglichen Temperaturerhöhung wurde nicht durchgeführt. Auch ohne Messung stimmt das subjektive Empfinden der Probandin mit der Literatur überein. Eine *in vitro* Studie von Görgülü *et al.* ergab einen maximalen Temperaturanstieg von weniger als 3,04 °C bei metallischen kieferorthopädischen Attachments und Nickel-Titan bzw. Stahlbogendrähten im 3 Tesla Magnetresonanztomographen (39). Auch im 1,5 Tesla Magnetresonanztomographen wird über keine nennenswerte Temperaturerhöhung berichtet (45). Beachtenswert ist, dass die mögliche radiofrequenzinduzierte Erwärmung mit der Erhöhung der Magnetfeldstärke zunimmt (35).

Sowohl die vorliegende Literatur als auch die aktuelle Studie zeigen, dass von keiner der verwendeten kieferorthopädischen Apparaturen eine Gefahr für den Patienten ausgeht. Die messbare Temperaturerhöhung lag in vorangegangenen Studien in einem Bereich, die keinen negativen Einfluss auf die Pulpa- oder Mundschleimhautgesundheit auswirken kann (14, 39,

40). Es sind keine Fallberichte von Verletzungen im Zusammenhang mit der Erwärmung durch kieferorthopädische Attachments bekannt (35, 44).

7.2.3 Beschleunigung

Darüber hinaus gilt es den Aspekt der MRT-Sicherheit zu berücksichtigen, da es durch mögliche Verschiebung oder Bewegung kieferorthopädischer Attachments zu Verletzungen kommen kann (44). Es herrscht Konsens darüber, dass ferromagnetische Gegenstände im starken Magnetfeld eine Gefahr darstellen können (28). Laut vorliegender Literatur steigt das Gefahrenpotential mit der Magnetfeldstärke an (28). Daher sollte mit Erhöhung der Magnetfeldstärke auch eine verstärkte Auffassung der Sicherheitsthematik einhergehen, um somit eine gefahrlose Untersuchung am Patienten zu sichern (28). Bei den untersuchten Brackets wurde in der durchgeführten Studie keine Beschleunigung, die sich in Ablösung geäußert hätte, festgestellt. Da das Risiko der Ablösung mit der Magnetfeldstärke zunimmt, sollten die Brackets demnach auch bei höheren Magnetfeldstärken geprüft werden.

Kemper *et al.* evaluierten die magnetischen Anziehungs- und Rotationskräfte adhäsiv befestigter kieferorthopädischer Brackets im 3 Tesla Magnetresonanztomographen mit dem Ziel der Abschätzung der MRT-Sicherheit bezüglich einer Dislokations- und Ablösungsgefahr. Bei den Materialien der untersuchten Brackets handelte es sich um Stahllegierungen, Kobalt-Chrom, Keramik, Keramik mit Stahleinsatz und Titan. Dabei kam unter anderem diese Arbeitsgruppe zu dem Ergebnis, dass Brackets mit korrektem Adhäsivverbund im statischen Magnetfeld von 3 Tesla nicht gelöst werden (28, 3). Das bedeutet, dass ein potentielles Sicherheitsrisiko vor allem von losen oder gelockerten Brackets ausgeht. Daher ist eine fachgerechte Prüfung der korrekten Adhäsion zwischen Zahnoberfläche und Bracket vor einer MRT-Untersuchung notwendig (28, 44). Auch in der aktuellen Studie bestätigt sich die Annahme, dass bei fachgerechter Adhäsion keine Ablösung oder Verschieben der Attachments zu erwarten ist (45, 42, 29).

Auch in Bezug auf die mögliche Beschleunigung besteht ein Zusammenhang zwischen der unterschiedlichen Form bzw. Größe des Objektes. Die Arbeitsgruppe um Kemper fand heraus, dass relevante Rotationskräfte vornehmlich bei länglichen bzw. nadelförmigen Objekten zu erwarten sind und nicht bei kleinen quadratischen Objekten, zu denen kieferorthopädische Brackets zählen (28).

7.3 Schlussfolgerungen / Konklusionen

Da die meisten MRT-Untersuchungen nicht aus kieferorthopädischen Gründen, sondern aus allgemeinmedizinischen Gründen angefertigt werden, ist die folgende Schlussfolgerung sowohl für Kieferorthopäden, Patienten, Radiologen und andere Mediziner von großer Relevanz:

1. Nicht alle der untersuchten kieferorthopädischen Attachments der Marke FORESTADENT (Pforzheim, Deutschland) führten zur negativen Beeinflussung der diagnostischen Aussagekraft in der MRT-Untersuchung des Kopf-Hals-Bereiches.
Auf Basis der gesammelten Ergebnisse können Radiologen, Kieferorthopäden und andere Mediziner je nach Zielregion entscheiden, ob die kieferorthopädischen Brackets der Marke FORESTADENT (Pforzheim, Deutschland) bei der Magnetresonanztomographie belassen werden können oder vorher entfernt werden sollten.
2. Es ergaben sich für die getesteten kieferorthopädischen Attachments der Marke FORESTADENT (Pforzheim, Deutschland) sowohl während als auch nach einer MRT-Untersuchung keine signifikanten radiofrequenzinduzierten Erwärmungen.
3. Es kommt zu keiner Verletzungsgefahr der Attachments der Marke FORESTADENT (Pforzheim, Deutschland) durch Beschleunigung in der MRT-Untersuchung.

8 Literaturverzeichnis

1. Achenbach S, Moshage W, Diem B (1997) *Effects of magnetic resonance imaging on cardiac pacemakers and electrodes*. Am Heart J **134**:467–473.
2. American Society for Testing and Materials (ASTM) Designation (2002): F 2182-02A. *Test method for measurement of radio frequency induced heating near passive implants during magnetic resonance imaging*. In: Annual Book of ASTM Standards. Section 13. Medical devices and services. Vol 13.01. Medical and surgical materials and devices; an- esthetic and respiratory equipment; pharmaceutical application of process analytical technology. West Conshohocken, PA, USA: ASTM
3. Beau A, Bossard D, Gebeile-Chauty. S (2014) *Magnetic resonance imaging artifacts and fixed orthodontic attachments*. Eur J Orthod. **37**:105-110
4. Blankenstein FH, Asbach P, Beuer F, Glienke J, Mayer S, Zachriat C (2017) *Magnetic permeability as a predictor of the artefact size caused by orthodontic appliances at 1.5 T magnetic resonance imaging*. Clin Oral Investig **21**(1):281–289 <https://doi.org/10.1007/s00784-016-1788-1>
5. Cassetta M, Pranno N, Stasolla A, Orsogna N, Fierro D, Cavallini C, Cantisani V (2017) *The effects of a common stainless steel orthodontic bracket on the diagnostic quality of cranial and cervical 3T-MR images: a prospective, case-control study*. Dentomaxillofac Radiol **46**, 20170051.
6. Costa AL, Appenzeller S, Yasuda CL, Pereira FR, Zanardi VA, Cendes F (2009) *Artifacts in brain magnetic resonance imaging due to metallic dental objects*. Med Oral Patol Oral Cir Bucal **14**(6):E278–E282
7. Cox RJ, Kau CH, Rasche V. (2012) *Three-dimensional ultrashort echo magnetic resonance imaging of orthodontic appliances in the natural dentition*. Am J Orthod Dentofacial Orthop. **142**:552–561.
8. Diedrich P (1981) *Enamel alterations from bracket bonding and debonding: a study with the scanning electron microscope*. Am J Orthod **79**:500-522

9. Elison JM, Leggitt VL, Thomson M, Oyoyo U, Wycliffe ND (2008) *Influence of common orthodontic appliances on the diagnostic quality of cranial magnetic resonance images*. Am J Orthod Dentofac Orthop **134**(4):563–572.
<https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2006.10.038>
10. Ernstberger T, Heidrich G, Buchhorn G. (2007) *Postimplantation MRI with cylindrical and cubic intervertebral test implants: evaluation of implant shape, material, and volume in MRI artifacting—an in vitro study*. Spine J. **2007**:7353–7359.
11. Farahani K, Sinha U, Sinha S, Chiu LC, Lufkin RB (1990) *Effect of field strength on susceptibility artifacts in magnetic resonance imaging*. Comput Med Imaging Graph **14**(6):409–413.
[https://doi.org/10.1016/0895-6111\(90\)90040-i](https://doi.org/10.1016/0895-6111(90)90040-i)
12. Gelißen B (2017) *Artefaktverhalten verschiedener dentaler Implantattypen in der Magnetresonanztomographie (MRT)*
13. Glasl B, Hourfar J, Björn L, Binger T (2014) *Die radiologische Verdachtsdiagnose*. Kieferorthopädie **28**(2):1-4
14. Görgülü S, Ayyildiz S, Kamburoglu K, Gökçe S, Ozen T. (2014) *Effect of orthodontic brackets and different wires on radiofrequency heating and magnetic field interactions during 3-T MRI*. Dentomaxillofac Radiol. **43**:20130356.
15. Hasanin M, Kaplan SEF, Hohlen B, Lai C, Nagshabandi R, Zhu X, Al-Jewair T (2019) *Effects of orthodontic appliances on the diagnostic capability of magnetic resonance imaging in the head and neck region: a systematic review*. Int Orthod **17**(3):403–414
<https://doi.org/10.1016/j.ortho.2019.06.001>
16. Hinshaw D, Holshouser B, Engstrom H, Tjan A, Christiansen E, Catelli W (1988) *Dental material artefacts on MR images*. Radiology **166**, 777–9.
17. Hopfgartner A (2015) *Magnetresonanztomographie in der Zahnheilkunde - Hochauflösende zahnmedizinische Anwendungen in der MRT mit einer Entwicklung zur Bewegungskorrektur*
18. <http://www.deutsche-medizinerakunft.de/index.php?id=585> (17.06.2021)
19. <https://docplayer.org/34836781-9-kernspintomographie-mri.html> (25.06.2021)

20. <https://flexikon-mobile.doccheck.com/de/T1-Gewichtung> (05.07.2021)
21. <https://flexikon-mobile.doccheck.com/de/T2-Gewichtung> (05.07.2021)
22. <https://formlabs.com/de/> (17. 06.2021)
23. https://nmr.uni-duesseldorf.de/main/mtheorie_2.html#kspace (17.06.2021)
24. <https://the3dprinterbee.com/de/> (17.06.2021)
25. <https://vetsuisse.com/vet-impl/lernmodule/> (17.06.2021)
26. <https://www.amboss.com/de/wissen/Magnetresonanztomographie> (17.06.2021)
27. <https://www.spektrum.de/lexikon/neurowissenschaft/t1-wichtung/13334> (05.06.2021)
28. Kemper J, Klocke A, Kahl-Niecke B, Adam G (2005) *Kieferorthopädische Brackets in der Hochfeld-Magnetresonanztomographie: Experimentelle Beurteilung magnetischer Anziehungs- und Rotationskräfte bei 3 Tesla*. Fortschr Röntgenstr **177**: 1691-1698
29. Kemper J, Priest AN, Schultze D, Kahl-Niecke B, Adam G, Klocke A (2007) *Orthodontic springs and auxiliary appliances: assessment of magnetic field interactions associated with 1.5 T and 3 T magnetic resonance system*. European Radiology, **17**:533–540.
30. Linetskiy I, Starčuková J, Hubáľková H, Starčuk JZ, Özcan M (2019). *Evaluation of magnetic resonance imaging issues of titanium and stainless steel brackets*. ScienceAsia, **45**(2):145-153
31. Nitz W (2012) *MRT-Guide für MTRA/RT (Edition Radiopraxis) (1. Auflage)*. Georg Thieme Verlag KG Stuttgart
32. Ozawa E, Honda EI, Parakonthun KN, Ohmori H, Shimazaki K, Kurabayashi T, Ono T (2018) *Influence of orthodontic appliance- derived artifacts on 3-T MRI movies*. Prog Orthod **19**(1):7
33. Poorsattar-Bejeh Mir A, Rahmati-Kamel M (2016) *Should the orthodontic brackets always be removed prior to magnetic resonance imaging (MRI)?* J Oral Biol Craniofac Res **6**, 142–52.

34. Proffit W, Fields H, Sarver D (2007) *Contemporary Orthodontics (5. Auflage)*
Oxford: Elsevier
35. Regier M, Kemper J, Kaul MG, Feddersen M, Adam G, Kahl-Nieke B, Klocke A
(2009) *Radiofrequencyinduced heating near fixed orthodontic appliances in high field
MRI systems at 3.0 Tesla*. J Orofac Orthop **70**, 485–94.
36. Roser C, Hilgenfeld T, Sen S, Badrow T, Zingler S, Heiland S, Bendszus M, Lux CJ,
Juerchott A (2020) *Evaluation of magnetic resonance imaging artifacts caused by
fixed orthodontic CAD/CAM retainers – an in vitro study*. Clin Oral Investig **25**:1423-
1431. <https://doi.org/10.1007/s00784-020-03450-x>
37. Sadowsky P, Bernreuter W, Lakshminarayanan A, Kenney P. (1988) *Orthodontic
appliances and magnetic resonance imaging of the brain and temporomandibular
joint*. Angle Orthod **58**:9-20.
38. Schulze R (2011) *DVT-Diagnostik in der Implantologie: Grundlagen–Fallstricke*.
Zahnheilkunde, Management und Kultur **27**: 6-13
39. Shalish M, Dykstein N, Friedlander-Barenboim S, Ben-David E, Gomori JM, Chaushu
S (2015) *Influence of common fixed retainers on the diagnostic quality of cranial
magnetic resonance images*. Am J Orthod Dentofac Orthop **147**(5):604–609.
<https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2014.11.022>
40. Shellock FG (2011) *Reference Manual MRI Safety, Implants and Devices*. Biomedical
Research Publishing Group, Los Angeles, CA, 254–255.
41. Shellock FG, Crues JV. (2004) *MR procedures: biologic effects, safety, and patient
care*. Radiology **232**:635–652
42. Shellock FG, Kanal E (1996) *Magnetic Resonance: Bioeffects, Safety and Patient
Management*, Lippincott-Raven Press, Philadelphia, PA.
43. Starcukova J, Starcuk Z Jr, Hubalkova H, Linetskiy I. (2008) *Magnetic susceptibility
and electrical conductivity of metallic dental materials and their impact on MR
imaging artifacts*. Dent Mater **24**:715-23.
44. Wylezinska M, Pinkstone M, Hay N, Scott AD, Birch MJ, Miquel ME (2015) *Impact
of orthodontic appliances on the quality of craniofacial anatomical magnetic*

resonance imaging and real-time speech imaging. Eur J Orthod **37**(6):610–617.
<https://doi.org/10.1093/ejo/cju103>

45. Yassi K, Ziane F, Bardinet E, Moinard M, Veyret B, Chateil JF (2007) *Evaluation of the risk of overheating and displacement of orthodontic devices in magnetic resonance imaging.* J Radiol. **288**(2):263-268.
46. Zachriat C (2016) *Suszeptibilitätsartefakte durch kieferorthopädische Attachments in der 1,5 Tesla Magnetresonanztomographie*
47. Zhylich D, Krishnan P, Muthusami P, Rayner T, Shroff M, Doria A, Tompson B, Lou W (2017) *Effects of orthodontic appliances on the diagnostic quality of magnetic resonance images of the head.* Am J Orthod Dentofacial Orthop **151**:484–49

9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 5.1 Intraoralscan mit sofortiger Betrachtung des Scans am Bildschirm	17
Abbildung 5.2 Trios 3 (3Shape).....	17
Abbildung 5.3 Betrachtung der Scandatensätze.....	18
Abbildung 5.4 Betrachtung des generierten Modells.....	18
Abbildung 5.5 Aufbereitung für den 3D Druck	19
Abbildung 5.6 Genaue Betrachtung des geplanten Oberkiefermodells samt Stützen.....	19
Abbildung 5.7 Formlabs Form 3 SLA 3D-Drucker	21
Abbildung 5.8 Ober- und Unterkieferkranz, unbearbeitet nach dem Druck	22
Abbildung 5.9 Oberkieferkranz nach Beseitigung der unausgehärteten Harzablagerungen, vor Entfernung der Stützen.....	22
Abbildung 5.10 Oberkieferkranz platziert im Tiefziehgerät Track-V	23
Abbildung 5.11 Die genutzte Tiefziehfolie vor Entfernung der Schutzfolie	24
Abbildung 5.12 Alle acht Schienen im Überblick, darunter eine unbestückte Trägerschiene (unten rechts) und sieben bestückte Trägerschienen mit den verschiedenen Brackets.....	25
Abbildung 5.13 Trägerschiene mit BioQuick® Brackets	26
Abbildung 5.14 Trägerschiene mit Brilliant® Brackets.....	26
Abbildung 5.15 Trägerschiene mit TruKlear® Brackets	27
Abbildung 5.16 Trägerschiene mit QuicKlear® III Brackets	27
Abbildung 5.17 Trägerschiene mit Micro Sprint® Brackets	28
Abbildung 5.18 Trägerschiene mit Sprint® II Brackets	28
Abbildung 5.19 Trägerschiene mit 2D® Lingual Brackets	29
Abbildung 5.20 Screenshot der Untersuchung ohne Trägerschiene	33

Abbildung 6.1 Ergebnisse der Sichtbarkeit des Kiefergelenks	38
Abbildung 6.2 Übersicht der neun MRT-Untersuchungen in Slice A	39
Abbildung 6.3 Ergebnisse der Sichtbarkeit der Sella turcica.....	40
Abbildung 6.4 Übersicht der neun MRT-Untersuchungen in Slice B	41
Abbildung 6.5 Ergebnisse der Sichtbarkeit der Oberkieferwurzeln auf Höhe des Foramen incisivum	42
Abbildung 6.6 Übersicht der neun MRT-Untersuchungen in Slice C	43
Abbildung 6.7 Ergebnisse der Sichtbarkeit der Oberkieferwurzeln	44
Abbildung 6.8 Übersicht der neun MRT-Untersuchungen in Slice D	45
Abbildung 6.9 Mögliche Einschränkungen der Beurteilbarkeit durch Artefakte im Bereich des Kiefergelenks	46
Abbildung 6.10 Mögliche Einschränkungen der Beurteilbarkeit durch Artefakte im Bereich der Sella turcica.....	47
Abbildung 6.11 Mögliche Einschränkungen der Beurteilbarkeit durch Artefakte im Bereich der Oberkieferwurzeln auf Höhe des Foramen incisivum	48
Abbildung 6.12 Mögliche Einschränkungen der Beurteilbarkeit durch Artefakte im Bereich der Oberkieferwurzeln.....	49

10 Tabellenverzeichnis

Tabelle 5.1 Übersicht der verwendeten Brackets.....	30
Tabelle 5.2 Übersicht über die Bildakquisition.....	31
Tabelle 5.3 Zusammenfassung der MRT-Geräteeinstellungen / Scanparameter, die im Rahmen der Studie verwendet wurden.....	32
Tabelle 5.4 Nummerierung der Scans	33
Tabelle 5.5 Übersicht der Screenshots, die dem Radiologen zur Auswertung zur Verfügung standen.....	35
Tabelle 5.6 Systematik der Diagnostik anhand der Sichtbarkeit der gewählten anatomischen Struktur.....	36
Tabelle 5.7 Systematik der Diagnostik anhand der möglichen Einschränkungen der Beurteilbarkeit der Anatomie	36
Tabelle 6.1 Ergebnisse der subjektiv wahrgenommenen Erwärmung während und nach den MRT-Untersuchungen.....	50
Tabelle 6.2 Ergebnisse der möglichen Ablösung der Attachments nach der MRT-Untersuchung	51

11 Danksagung

Mein vorrangiger Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn PD Dr. Björn Ludwig. Dabei bedanke ich mich insbesondere für das Überlassen dieses Themas und für die stetige Betreuung. Außerdem möchte ich mich für die zuverlässige und hilfreiche Unterstützung bedanken.

Zudem danke ich dem gesamten Praxisteam von Frau Dr. Bettina Glasl und Herrn Dr. Björn Ludwig für die tolle Zusammenarbeit. Besonders bedanke ich mich für die stetige Erreichbarkeit und das Engagement von Herrn Christian Gehrke.

Ein großer Dank gilt zudem der röntgenologischen Abteilung des MVZ Mittelmosel in Zell und dem Radiologen, der sich dankenswerterweise freiwillig zur Auswertung bereit erklärte.

Ein herzlicher Dank gilt auch der Firma FORESTADENT (Pforzheim, Deutschland), die die untersuchten Brackets bereitstellten.

Der größte Dank gilt meiner Familie und meinen Freunden, die mich bei allem unterstützen und immer an mich glauben. Vor allem bedanke ich mich bei meinem Bruder für die Motivation und Unterstützung und bei meiner Schwester, die immer mit Rat und Tat zur Seite stand. Im Besonderen möchte ich mich bei meinen Großeltern bedanken, die für mich immer ein Anreiz sein werden, mein Bestes zu geben. Natürlich bedanke ich mich auch bei meinen Eltern, für die immerwährende emotionale Unterstützung und den bedingungslosen Rückhalt.

12 Lebenslauf

Aus datenschutzrechtlichen Gründen wird der Lebenslauf in der elektronischen Fassung der
Dissertation nicht veröffentlicht

13 Anhang

13.1 KFO-Werkstoffliste*

Stähle – steels

Lfd.-Nr. identification no.	Werkstoff material	Nummer number	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	P	S	Sonstige others	Fe
1.000	rostfreier Stahl stainless steel	1.4301	≤ 0.07	≤ 1.0	≤ 2.0	17.0-19.0	-	8.5-10.5	≤ 0.045	≤ 0.03	-	Rest rest
1.001		1.4303	≤ 0.07	≤ 1.0	≤ 2.0	17.0-19.0	-	11.0-13.0	≤ 0.045	≤ 0.03	-	
1.002		1.4305	≤ 0.12	≤ 1.0	≤ 2.0	17.0-19.0	-	8.0-10.0	≤ 0.06	0.15-0.35	-	
1.003		1.4310	≤ 0.12	≤ 1.5	≤ 2.0	16.0-18.0	≤ 0.8	6.0-9.0	≤ 0.045	≤ 0.03	-	
1.004		1.4401	≤ 0.07	≤ 1.0	≤ 2.0	16.5-18.5	2.0-2.5	10.5-13.5	≤ 0.045	≤ 0.03	-	
1.005		1.4404	≤ 0.03	≤ 1.0	≤ 2.0	16.5-18.5	2.0-2.5	11.0-14.0	≤ 0.045	≤ 0.03	-	
1.006		1.4456	≤ 0.1	≤ 1.0	10-15	16-20	1.8-3.5	≤ 0.3	≤ 0.05	≤ 0.05	V ≤ 0.2 N 0.7-1.0	
1.007		1.4460	≤ 0.05	≤ 1.0	≤ 2.0	25.0-28.0	1.3-2.0	4.5-6.0	≤ 0.045	≤ 0.03	N 0.05-0.20	
1.008		1.4541	≤ 0.08	≤ 1.0	≤ 2.0	17.0-19.0	-	9.0-12.0	≤ 0.045	≤ 0.03	Ti ≥ (5 x % C) ≤ 0,80	
1.009		1.4542	≤ 0.07	≤ 1.0	≤ 1.0	15.0-17.0	-	3.0-5.0	≤ 0.045	≤ 0.03	Cu 3.0-5.0 Nb 0.15-0.45	
1.010		1.4435	≤ 0.03	≤ 1.0	≤ 2.0	17.0-18.5	2.5-3.0	12.5-15.0	≤ 0.045	≤ 0.025	-	
1.011		1.4441	≤ 0.03	≤ 1.0	≤ 2.0	17.0-19.0	2.5-3.2	13.0-15.5	≤ 0.025	≤ 0.010	N ≤ 0.10 Cu ≤ 0.10	
1.012		AISI 316 L	≤ 0.03	≤ 1.0	≤ 2.0	16.0-18.0	2.0-3.0	10.0-14.0	≤ 0.045	≤ 0.030	-	
1.013	AISI 304	≤ 0.08	≤ 1.0	≤ 2.0	18.0-20.0	-	8.0-10.5	≤ 0.045	≤ 0.030	-		

Analyse in Gew. % / analysis in weight %

* Die unter dem Punkt 14.1 aufgeführten Abbildungen wurden von Forestadent Bernhard Förster GmbH zur Verfügung gestellt und stammen aus dem Katalog Nr. 35

Anhang

Kupfer- und Edelmetall-Legierungen / Copper and precious metal alloys

Lfd.-Nr. identification no.	Werkstoff material	Nummer number	Ag	Cu	Ni	Pb	Zn	Fe	Mn	Sn	Sb	Al	Sonstige others
2.001	Neusilber nickel silver	2.0780	-	56-58	11-13	0,3-1,5	26-33	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,3	-	-	≤ 0,1
2.100	Messing brass	2.0265	-	69,0 - 71,0	≤ 0,3	≤ 0,05	Rest	≤ 0,05	-	≤ 0,1	-	≤ 0,02	≤ 0,1
2.200	Silberlot silver solder	2.5153 L-Ag75	74-76	Rest/ resto	-	≤ 0,02	2,0-4,0	-	-	-	-	≤ 0,005	≤ 0,1
2.201		2.5147 L-Ag44	43-45	29-31	-	≤ 0,02	Rest/ rest	-	-	-	-	≤ 0,005	≤ 0,1
2.202		2.5159 L-Ag55Sn	54-57	20-23	-	≤ 0,02	Rest/ resto	-	-	2,0-5,0	-	≤ 0,005	≤ 0,1
2.203		2.5151 L-Ag72	71-73	Rest/ resto	-	≤ 0,02	-	-	-	-	-	≤ 0,005	≤ 0,1
2.204		-	43-46	18-22	-	-	6-10	-	-	2,0-6,0	-	-	≤ 0,3
2.205		-	57-61	15-18	-	-	Rest/ resto	-	-	-	-	-	≤ 0,3
2.206		-	20-70	3-45	-	-	1-35	-	-	0,5-30	-	-	-
2.300	Goldlot gold solder	38,5-39,5	Rest/ resto	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Au 33,0

Analyse in Gew. % / analysis in weight %

Sonstige edelmetalfreie Legierungen / Non precious metal alloys

Lfd.-Nr. identification no.	Werkstoff material	Nummer number	Ni	Fe	Mn	Cr	Mo	W	Ti	Si	C	Co	Al	S	O	H	N	Sonstige others
3.000	CoCr-Legierung CoCr alloy	-	19-23	Rest 4-6	≤ 1,0	18-22	3-5	3-5	0,1-2,5 0,1-2,0	≤ 0,5	≤ 0,30	Rest	-	< 0,01	-	-	-	-
3.001		-	14-16	Rest	1,0 - 3,0	15-30 19-21	6-8	-	-	-	≤ 0,30	38-42	-	-	-	-	-	Be 0,01- 0,09
3.002		-	-	27-31	≤ 1	28-32	4-6	-	-	≤ 1	≤ 0,35	31-35	-	-	-	-	-	-
3.100	Titan titanium	3.7025	-	≤ 0,20	-	-	-	-	Rest	-	≤ 0,08	-	-	-	≤ 0,10	≤ 0,013	≤ 0,05	-
3.101		3.7065	-	≤ 0,35	-	-	-	-	Rest	-	≤ 0,10	-	-	-	≤ 0,30	≤ 0,013	≤ 0,07	-
3.102	TiAl6V4	3.7165	-	≤ 0,30	-	-	-	-	Rest	-	≤ 0,08	-	5,5 6,3 6,75	-	≤ 0,20	≤ 0,025	≤ 0,05	V 3,50 - 4,50
3.103	TiMo 11,5 Zr6 SN 4,5 Beta Titanium	-	-	0,35	-	-	10-13	-	Rest	-	0,10	-	-	-	≤ 0,2	≤ 0,025	≤ 0,05	Zr 5-7 Sn 4-5
3.200	NiTi-Legierung NiTi alloy	-	50-60	< 0,5	-	-	-	-	Rest	-	< 0,1	-	< 0,1	-	< 0,1	< 0,01	< 0,01	-
3.201	NiTiCu-Legierung NiTiCu alloy	-	50-60	< 0,5	-	< 0,4	-	-	Rest	-	< 0,1	-	< 0,1	-	< 0,1	< 0,01	< 0,01	Cu < 6,5
3.202	NiTi-Legierung NiTi alloy	-	30-50	1-5	-	< 3	-	-	50-70	-	1-5	-	-	-	-	-	-	Nb 10 - 50 Cu 5 - 10

Analyse in Gew. % / analysis in weight %

Anhang

Kunststoffe – Plastics

Lfd.-Nr. identification no.	Werkstoff	material	Kurzzeichen abbreviation
4.000	Epoxid	epoxide	EP
4.001	Polyamid	polyamide	PA
4.002	Polycarbonat	polycarbonate	PC
4.003	Polyethylen hoher Dichte	polyethylene with high density	PE-HD
4.004	Polyethylen niedriger Dichte	polyethylene with low density	PE-LD
4.005	Polymethylmethacrylat	polymethyl-methacrylate	PMMA
4.006	Polypropylen	polypropylene	PP
4.007	Polystyrol	polystyrene	PS
4.008	Polytetrafluorethylen	polytetrafluor ethylene	PTFE
4.009	Polyurethan	polyurethane	PUR
4.010	Polyvinylchlorid	polyvinyl chloride	PVC
4.100	Acrylnitril-Butadien-Styrol	acrylonitrile-butadiene-styrene	ABS
4.101	Ethylen/Vinylacetat	ethylene/vinyl acetate	EVA
4.200	syn. Isopren-Kautschuk	synthetic isoprene rubber	IR
4.201	Naturkautschuk	natural rubber	NR
4.202	Silikon-Kautschuk	silicone rubber	Q
4.203	Silikon	silicone	SI
4.901	Polyetherzeton	Polyetheracetone	PEEK
4.902	Polyphthalamid	Plyphthalamide	PPA

Lfd.-Nr. identification no.	Werkstoff material	Nummer (DIN) number	Al ₂ O ₃	ZnO	MgO	Sonstige
5.000	Aluminiumoxid – aluminum oxide	–	99.99	–	–	≤ 0.01
5.001	Bänderzement – molar bands cement	–	–	80 – 86	6 – 10	≤ 10