

Aus dem Institut für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde
der Medizinischen Fakultät Charité - Universitätsmedizin Berlin
Abteilung für Zahnärztliche Prothetik, Alterszahnmedizin und Funktionslehre

DISSERTATION

**Suszeptibilitätsartefakte durch kieferorthopädische Attachments
in der 1,5 Tesla Magnetresonanztomographie**

zur Erlangung des akademischen Grades
Doctor medicinae dentariae (Dr. med. dent.)

vorgelegt der Medizinischen Fakultät
Charité - Universitätsmedizin Berlin

von

Christine Zachriat

aus Berlin

Datum der Promotion: 09.12.2016

Meinen Eltern

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung.....	5
1.1	Deutsches Abstract	5
1.2	Englisches Abstract	6
1.3	Einführung	7
1.4	Methodik.....	8
1.4.1	Kernspintomographie	8
1.4.2	Das Phantom	9
1.4.3	Der Magnettest	10
1.4.4	Artefaktbestimmung und Konkordanzanalyse	10
1.4.5	Die vergleichende Studie: In vitro und in vivo	12
1.4.6	Die Validierungsstudie: In-vitro- Untersuchung am Phantom.....	13
1.5	Ergebnisse.....	15
1.5.1	Messmethode Artefaktausdehnung und Konkordanz	15
1.5.2	Artefakt radien der vergleichenden Studie: in vitro	15
1.5.3	Artefakte der vergleichenden Studie: in vivo.....	16
1.5.4	Effekt einer artefaktreduzierenden Sequenz	17
1.5.5	Artefaktgröße der kieferorthopädischen Attachments der Validierungsstudie	17
1.5.6	Magnettest und Permeabilitätsmessung mit dem Ferromaster.....	18
1.5.7	Kurvenanalyse der standardisierten Prüfkörper der Validierungsstudie.....	18
1.6	Diskussion	20
1.6.1	Klinische Relevanz der am Phantom gemessenen Artefakte	20
1.6.2	Einordnung in die bestehende Literatur	20
1.6.3	Limitationen	22
1.6.4	Schlussfolgerung	23
1.7	Literaturverzeichnis	24
2	Eidesstattliche Versicherung und ausführliche Anteilserklärung	25

2.1	Eidesstattliche Versicherung	25
2.2	Anteilsklärung an den erfolgten Publikationen	26
3	Druckexemplare der ausgewählten Publikationen.....	28
4	Curriculum Vitae	64
5	Komplette Publikationsliste	65
6	Danksagung.....	67

1.1 Deutsches Abstract

Einleitung: Bei Patienten mit festsitzenden kieferorthopädischen Apparaturen existiert kein Konsens hinsichtlich der Frage, ob diese vor einer Magnetresonanztomographie (MRT) zu entfernen sind. Ziel der Untersuchungen ist die Etablierung einer Messmethode, mit der die Artefaktgröße zuverlässig vorhersagbar ist.

Methodik: In vitro wurden 21 Attachments bei akquirierter Turbospinecho- (TSE) und Gradientenecho-Sequenz (GRE) im 1,5-Tesla-System untersucht. Die Effektivität der artefaktreduzierenden Einstellung syngo[®] WARP (Siemens Healthcare, Erlangen / Deutschland) wurde eruiert. Um die klinische Relevanz zu prüfen, wurden die Artefakte an einer Probandin ermittelt. Als potentieller Prädiktor der Artefaktentstehung wurde die magnetische Permeabilität aller Attachments mit dem Ferromaster (Stefan Mayer Instruments, Dinslaken / Deutschland) bestimmt. Dieses Messgerät ist anerkannt für Proben einer Mindestgröße (d = 20 mm, h = 5 mm). Elf Miniaturprüfkörper bekannter Permeabilität zwischen 1,003 und 1,431 wurden zur Validierung auf ihre Artefaktentstehung untersucht. Aus den Wertepaaren (magnetische Permeabilität/Artefaktradius) wurde je eine Kurve approximiert. Die Messergebnisse der kieferorthopädischen Attachments wurden mit denen der standardisierten Prüfkörper verglichen. Es wurde geprüft, ob ein Magnettest als Screening der ferromagnetischen Eigenschaften geeignet ist.

Ergebnisse: Sämtliche Artefakte der Attachments liegen unterhalb der approximierten Kurven. Keramik und Nickel-Titan verursachen minimale Artefakte. Um Kobalt-Chrom entsteht ein Artefaktradius von maximal 18,78 mm und um die Attachments aus Stahl zeigen sich variable Artefakte mit Radien von 10,29 mm bis 73,62 mm. Auch bei negativem Magnettest muss mit Artefaktradien von bis zu 21,99 mm gerechnet werden. Bei TSE sind die Auslöschungen grundsätzlich kleiner als bei GRE. TSE: Die Artefakte beschränken sich auf die orale, periorale und nasale Region. GRE: Nahezu das gesamte Viszerocranium ist von Artefakten überlagert, Großteile des Neurocraniums sind beurteilbar. Die echoplanare Bildgebung (EPI) ist mit intraoraler Apparatur nicht nutzbar. Syngo[®] WARP führt in vitro zu einer durchschnittlichen Artefaktreduktion um 32,7 %. In vivo zeigt sich diese Einstellung weniger effektiv.

Schlussfolgerung: Die magnetische Permeabilität ist ein geeigneter Prädiktor, welcher auch bei filigranen kieferorthopädischen Attachments hinreichend genau bestimmbar ist. Oftmals können diese Apparaturen auch bei MRT der Kopf-Hals-Region intraoral verbleiben. Jenseits dieser Zielregion ist nicht mit Artefakten zu rechnen.

1.2 Englisches Abstract

Objectives: The question whether fixed orthodontic appliances should be removed prior to a magnetic resonance imaging (MRI) still remains open. The aim of this study is to establish a standardized measuring method for determining the magnetic permeability as a predictor of the artefact size.

Methods: In vitro investigations were performed on 21 different orthodontic attachments at 1.5 Tesla MRI applying turbo spin echo (TSE) and gradient echo sequences (GRE). In order to evaluate the benefit of an artefact minimizing sequence, a TSE-sequence with syngo® WARP (Siemens Healthcare, Erlangen/Germany) was selected. One test person was scanned with an intraoral multibracket appliance and the level of artefacts was evaluated. The instrument Ferromaster (Stefan Mayer Instruments, Dinslaken/Germany) was used for determination of the magnetic permeability of the orthodontic attachments. This device, however, is only approved for samples with a minimum size ($d = 20$ mm, $h = 5$ mm). For validation of this measurement, 11 small test specimens of known permeability between 1.003 and 1.431 were prepared and their artefacts were measured. A curve was fitted to the value pairs (permeability/artefact radius). The measurement results of the attachments were compared to the standardized test bodies. It was reviewed whether a magnetic test is suitable to identify the ferromagnetic properties.

Results: The artefacts of all attachments are below the approximated root functions of the standardized test specimens. Ceramic and nickel-titanium produce minimal artefacts. Cobalt-chromium causes artefact sizes up to 18.78 mm and steel attachments from 10.29 mm up to 73.62 mm, respectively. Likewise, artefact radii up to 21.99 mm have to be expected with a negative magnetic test. TSE produces smaller signal loss areas compared to GRE.

TSE: Artefacts are limited to the oral, perioral and nasal region. GRE: Large areas of the viscerocranium are extinguished. The neurocranium is mostly analyzable. The echo planar imaging appeared to be most susceptible to artefacts and was not analyzable. In vitro, WARP reduced these artefacts by an average of 32.7 %. This artefact minimizing setting showed a more significant effect in vitro than in vivo.

Conclusions: The magnetic permeability is an appropriate predictor which can be reliably assessed by conventional measurement devices. Orthodontic appliances may often remain intraorally when performing an MRI. Beyond the head and neck region no artefacts are expected.

1.3 Einführung

Vor jeder Magnetresonanztomographie (MRT) muss die Entscheidung getroffen werden, ob potentiell ferromagnetische Produkte zu entfernen sind, weil mit ihnen die Risiken der Erwärmung, Beschleunigung und Artefaktbildung einhergehen. Daher werden auch kieferorthopädische Apparaturen regelhaft prophylaktisch entfernt. Neben dem hierfür nötigen Zeit- und Kostenaufwand wird dabei zumeist der Zahnschmelz alteriert [1]. Die vorliegende Literatur zeigt jedoch, dass diese Apparaturen keine klinisch relevante Erwärmung [2] und, bei suffizienter Befestigung, auch keine Beschleunigung erfahren [3]. Relevant ist dagegen die diagnostische Einschränkung durch materialbedingte Suszeptibilitätsartefakte [4, 5]. Bei der Kernspintomographie solcher Patienten ist demnach eine Nutzen-Schaden-Abwägung vorzunehmen: In welchen Fällen stören die metallischen Applikationen und wann dürfen sie intraoral verbleiben. Für diese Entscheidung fehlen dem Radiologen bisher jedoch die entscheidenden Prädiktoren [**Publikation 1**].

Ziel der vorliegenden Dissertation ist es, dem Radiologen eine objektive Messmethode zur Verfügung zu stellen, mit der die Artefaktgrößen um kieferorthopädische Attachments im 1,5-Tesla-System hinreichend genau vorhersagbar sind („Validierungsstudie“ [**Publikation 3**]). Dazu mussten in vorausgehenden Untersuchungen zwei Fragen beantwortet werden:

- a) Wie groß sind experimentell erzeugte Artefakte um kieferorthopädische Attachments und sind diese Messergebnisse klinisch relevant? („Vergleichende Studie, Teil 1“ [**Publikation 2**]).
- b) Welchen Effekt hat eine artefaktreduzierende Sequenz unter In-vitro- und In-vivo-Bedingungen? („Vergleichende Studie, Teil 2“ [**Publikation 2**]).

Die gesamte Thematik wurde im Rahmen dreier Veröffentlichungen bearbeitet:

- 1) Blankenstein F, Truong BT, Thomas A, Thieme N, Zachriat C. Predictability of magnetic susceptibility artifacts from metallic orthodontic appliances in magnetic resonance imaging. J Orofac Orthop. 2015;76(1):14-29. [**Publikation 1**]
- 2) Zachriat C, Asbach P, Blankenstein KI, Peroz I, Blankenstein FH. MRI with intraoral orthodontic appliance - a comparative in vitro and in vivo study of image artefacts at 1.5 T. Dentomaxillofac Radiol. 2015;44(6):20140416 . [**Publikation 2**]
- 3) Blankenstein FH, Asbach P, Beuer F, Glienke J, Mayer S, Zachriat C. Magnetic permeability as a predictor of the artefact size caused by orthodontic appliances at 1.5 T magnetic resonance imaging. Clin Oral Investig. 2016;10.1007/s00784-016-1788-1. [**Publikation 3**]

1.4 Methodik

Die folgenden Materialien und Methoden waren bei den im Rahmen dieser Arbeit erstellten Studien identisch: Der verwendete Kernspintomograph, das Phantom, der Magnettest sowie die Methode der Artefaktbestimmung.

1.4.1 Kernspintomographie

Alle Versuchsreihen zur Artefaktbestimmung wurden im 1,5-Tesla-System MAGNETOM[®] Aera der Firma Siemens Healthcare Diagnostics GmbH (Eschborn/Deutschland) durchgeführt. Zur Akquisition der Bilddaten dienten bei den Untersuchungen im Phantom eine Ganzkörper-Resonator-Spule und bei den In-vivo-Messungen eine Kopf-Hals-Spule. Die Gradientenstärke betrug 33 mT/m und die maximale Anstiegsrate 125 T/m/s [**Publikation 2**]. Für die sagittale Bildakquisition wurde die Phasenkodierrichtung anterior-posterior und die Frequenzkodierrichtung Fuß-Kopf gewählt. Bei koronarer Bildakquisition war die Phasenkodierrichtung links-rechts und die Frequenzkodierrichtung Fuß-Kopf. Bei axialen Aufnahmen war die Phasenkodierrichtung rechts-links und die Frequenzkodierung anterior-posterior [**Publikation 3**].

Tabelle 1: MRT-Geräteeinstellung der verschiedenen Studien

Sequenz	Schichtstärke [mm]	Distanzfaktor [%]	Voxel Größe [mm×mm×mm]	Repetitionszeit (TR) [ms]	Echozeit (TE) [ms]	Flip Winkel [°]	Bandbreite [Hz/Px]	Turbofaktor /Epifaktor
Einstellungen der vergleichenden Studie: In vitro (Phantom)								
T2-TSE	5,0	30	2,73×1,37× 5,00	8550	61	150	190	20
T2-TSE-WARP	5,0	30	2,73×1,37× 5,00	8550	63	150	751	17
T1-GRE	5,0	30	2,73×1,37× 5,00	100	3,25	90	380	/
Einstellungen der vergleichenden Studie: In vivo (Probandin)								
T2-TSE- Neurocranium	5,0	30	0,96×0,72× 5,00	4500	92	150	191	20
T2-TSE- Halswirbelsäule	3,0	30	1,12×0,90×3,00	3000	84	150	190	16
T1-GRE- Neurocranium	5,0	30	1,11×0,90×5,00	366	4,8	90	150	/
T2-TSE- WARP- Halswirbelsäule	3,0	30	1,12×0,90×3,00	3000	84	150	651	17
SE-EPI- Neurocranium	6,0	30	1,50×1,20×6,00	4500	113	/	814	154
Einstellungen der Validierungsstudie (Phantom)								
T2-TSE	5,0	30	2,73×1,37× 5,00	8550	61	150	190	20
T1-GRE	5,0	30	2,73×1,37× 5,00	100	3,25	90	380	/

Tabelle 1 zeigt die Geräteeinstellungen der für die einzelnen Studien genutzten Sequenzen. Dabei handelte es sich um exemplarische Einstellungen, welche für die routinemäßigen Fragestellungen der Kopf-Hals-Region genutzt werden und repräsentativ für die unterschiedliche Artefaktanfälligkeit sind.

1.4.2 Das Phantom

Für die In-vitro-Untersuchungen wurde ein strukturiertes Phantom aus Polymethylmethacrylat (PMMA) genutzt (Abbildung 1). Die Streifenstruktur auf den in koronarer und sagittaler Ebene erstellten Schnitten resultiert aus elf jeweils 6,4 mm starken, partiell luftgefüllten PMMA-Platten, mit deren Hilfe auftretende Verzerrungen darstellbar sind. Die Platten wurden in einem definierten Abstand zueinander über Schienenführungen befestigt. Die mittlere Platte enthielt eine zentrale Haltevorrichtung zur Befestigung der Prüfkörper. Zur genauen Lokalisation des Prüfkörperzentrums innerhalb des Artefaktareals und als Referenzgröße wurde in allen drei Ebenen ein PMMA-Stab ($d = 10 \text{ mm}$) befestigt. Gemäß ASTM-Standard F2119-07[6] war das quaderförmige Phantom mit einer Kupfersulfatlösung gefüllt. [Publikation 2/3]

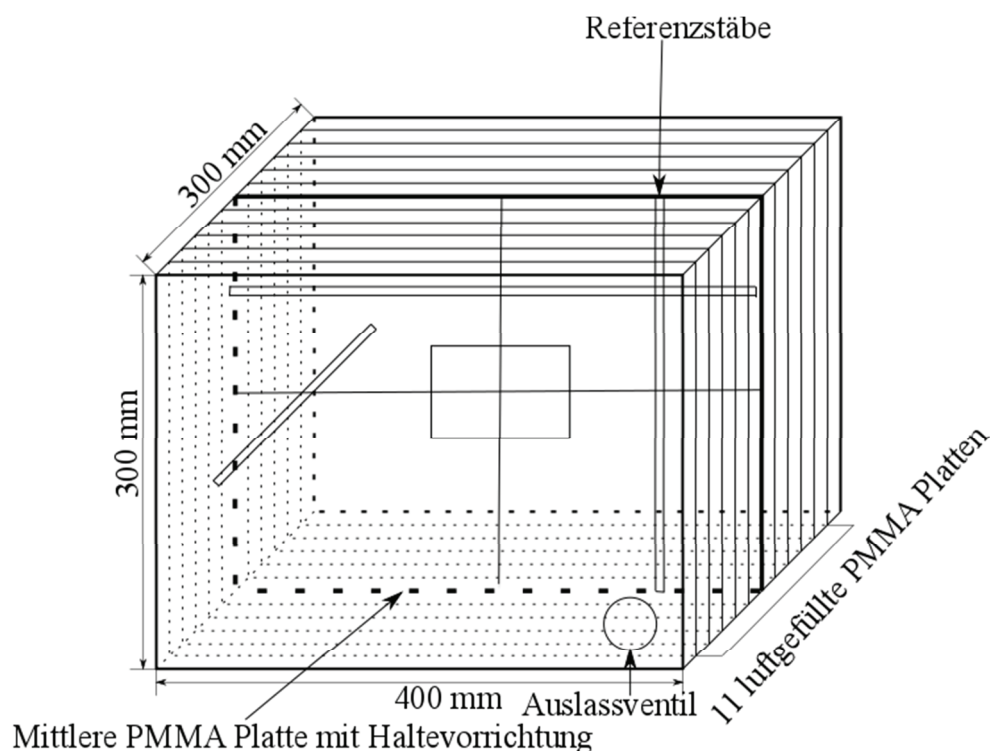


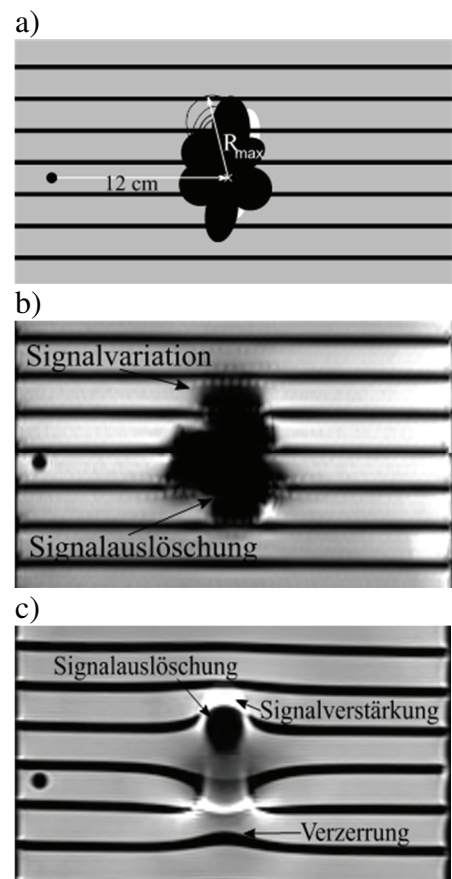
Abbildung 1: Aufbau der Phantombox der In-vitro-Versuche [Publikation 2].

1.4.3 Der Magnettest

Die ferromagnetischen Eigenschaften sämtlicher kieferorthopädischer Applikationen wurden zunächst mit einem Magnettest geprüft, wozu ein Dentalmagnet aus Neodym-Eisen-Bor (MAGFIT® DX 800, Fa. AICHI Steel Corporation/Japan) diente. Bei einem Eigengewicht von nur 0,16 g erzeugt er eine Kraft von 6,5 N. Als Ergebnis wurde notiert, ob dieser Magnet an den geprüften Attachments haftet oder nicht. [Publikation 1/2/3]

1.4.4 Artefaktbestimmung und Konkordanzanalyse

Die ASTM Norm F2119-07 zur Artefaktbestimmung um passive Implantate wurde grundsätzlich eingehalten, einzelne Aspekte jedoch der vorliegenden Situation angepasst [6]. Diese Norm bezieht sich primär auf massive Implantate wie z.B. Hüft- und Knieprothesen und definiert Suszeptibilitätsartefakte als Distanz von der Außenkante der passiven Implantate zur Artefaktperipherie. Angesichts der filigranen und komplexen Struktur der kieferorthopädischen Attachments war eine Unterscheidung zwischen deren Zentrum und Peripherie nicht relevant. Als sicher zu lokalisierenden Ausgangspunkt wählten wir mit Hilfe der Referenzstangen das Probenzentrum (Abbildung 2a). Die Attachments sind vereinfacht als Zylinder zu betrachten. Die Norm fordert für Zylinder die Artefaktmessung in zwei orthogonalen Ebenen [Publikation 2/3].



Dementsprechend wurden koronare und sagittale Schnitte mit dem Dicom-Viewer Micro Dicom (Micro Dicom, Sofia/Bulgaria) ausgewertet und dabei folgende Phänomene einbezogen (Abbildung 2b, c):

- Zentrale Signalauslöschungszonen
- Periphere Signalverstärkungen
- Verzerrungen und Signalvariationen [Publikation 2].

Abbildung 2a: Schematische Darstellung des Artefaktes und Lokalisation des Probenzentrums
2b,c: Exemplarisches Artefakt eines Attachments bei GRE-Sequenz (b) und TSE-Sequenz (c) [Publikation 2]

Einen Sonderfall stellten die parabelförmigen Drahtbögen dar, weil sie kein singuläres Objektzentrum aufweisen. Es wurde die Ebene ausgewählt, in der beide Drahtschenkel angeschnitten wurden und sich dadurch zwei gleichgroße Artefakte zeigten. Hier diente der Durchmesser eines dieser Artefakte als Messgröße. Konfluieren beide Artefakte, wurde der gesamte Durchmesser bestimmt [**Publikation 1/2**].

Um die Übereinstimmung der Ergebnisse zweier Untersucher zu beurteilen, wurde eine Pilotmessung nach Kalibrierung durchgeführt und die dabei aufgetretenen Abweichungen in einem Bland-Altman-Plot dargestellt. Zusätzlich wurde der Korrelationskoeffizient nach Pearson berechnet.

Zur Bewertung der Artefaktreduzierung durch syngo[®] WARP (Siemens Healthcare, Erlangen/Deutschland) diente ein gepaarter t-Test. Auch der Rater Bias wurde durch den t-Test für verbundene Stichproben getestet. Alle statistischen Analysen wurden mit der Statistik Software SPSS Statistics 22 (IBM Deutschland GmbH, Ehningen/Deutschland) durchgeführt [**Publikation 2**].

Die In-vivo-Artefaktbestimmung nahm ein Radiologe mit 6-jähriger klinischer Erfahrung als Facharzt im Bereich MRT-Diagnostik vor. Dazu wurden 27 typische Zielregionen im Kopf-Hals-Bereich ausgewählt. Die Diagnostizierbarkeit dieser einzelnen Regionen wurde in fünf Kategorien ausgedrückt (Tabelle 2) [**Publikation 2**].

Tabelle 2: Systematik der Diagnostik der in vivo auftretenden Artefakte [**Publikation 2**]

Kategorie	Artefakt, Diagnostizierbarkeit
1	artefaktfrei
2	minimales Artefakt, Aufnahme ist diagnostizierbar
3	moderates Artefakt, Aufnahme ist eingeschränkt diagnostizierbar
4	starkes Artefakt, Aufnahme ist nicht diagnostizierbar
X	anatomische Struktur außerhalb des gewählten Bildausschnittes

Nachfolgend werden die spezifischen Aspekte der vergleichenden Studie und der Validierungsstudie genannt.

1.4.5 Die vergleichende Studie: In vitro und in vivo

Zur Darstellung der in vitro und in vivo auftretenden Artefakte wurde exemplarisch ein Patientenfall simuliert.

Im Oberkiefer bestand die Multibracketapparatur aus selbstligierenden Clarity SL Keramikbrackets mit Stahlslots der Legierung AISI 316 auf den Zähnen 15 bis 25 und Victory Tube Bukkalröhrchen der Stahllegierung AISI 316L auf den Zähnen 16 und 26. Als Bogen für den Oberkiefer wurde ein Stahldraht der Legierung AISI 304 gewählt.

Die Apparatur des Unterkiefers bestand aus selbstligierenden Smart Clip Brackets der Stahlsorte AISI 630 an Prämolaren und Frontzähnen sowie Victory Tube Bukkalröhrchen an den Molaren der Legierung 316L. Für den Unterkiefer wurde ein Draht aus Nitinol verwendet. Sämtliche Drähte und Attachments stammten vom Hersteller 3M Unitek (Landsberg / Deutschland). Die Drähte wurden im Molarenbereich zusätzlich mit Ligaturdrähten (Dentaurum, Ispringen / Deutschland) aus Stahl (AISI 316L) befestigt [**Publikation 2**].

Einer 27-jährigen, weiblichen Testperson wurden diese Apparaturen mithilfe zweier Tiefziehschienen eingesetzt (Ethikvotum EA4/090/13 Charité vom 08.07.2013) und die in Tabelle 1 beschriebenen Sequenzen akquiriert. Die Einzelteile der Apparatur wurden separat mithilfe des Phantoms im Kernspintomographen auf ihre Artefaktbildung untersucht (Tabelle 1). Sowohl von der Probandin mit Komplettapparatur als auch von den Einzelteilen im Phantom wurden anschließend unter den Bedingungen einer Artefakt reduzierenden Geräteeinstellung eine weitere Turbospinecho-Sequenz (TSE) akquiriert. Diese nur für TSE und Short Tau Inversion Recovery (STIR)-TSE-Sequenzen anwendbare Einstellung syngo[®] WARP soll durch hohe Frequenzbandbreiten und optimierte Radiofrequenz-Pulse eine Artefaktreduzierung um bedingt MRT-sichere Implantate erreichen [**Publikation 2**].

Um zu klären, ob die Ergebnisse der Phantommessungen Rückschlüsse auf die klinisch zu erwartenden Artefakte erlauben, wurde ein Kreis mit dem insgesamt größten in vitro generierten Artefaktradius auf die In-vivo-Aufnahme projiziert, welche mit gleicher Sequenz und in gleicher Ebene gewonnen wurde und ebenfalls das größte Artefakt zeigte. Als Referenz für den Mittelpunkt dieses Kreises wurde der am weitesten dorsal gelegene Befestigungspunkt für metallische Attachments, der 2. Molar, gewählt [**Publikation 2**].

1.4.6 Die Validierungsstudie: In-vitro- Untersuchung am Phantom

Als Prädiktor für die zu erwartende Artefaktgröße um metallische Attachments wurde die magnetische Permeabilität herangezogen. Zu deren Bestimmung stehen handelsübliche Messgeräte zur Verfügung. Sie magnetisieren die Proben und bestimmen die dadurch auftretende Verzerrung des Magnetfeldes, woraus sich die Permeabilitätszahl μ_r ergibt. Für diese Studie wurde das Gerät „Ferromaster“ (Stefan Mayer Instruments, Dinslaken/Deutschland) verwendet (Abbildung 3) [Publikation 3].

Abbildung 3:

Permeabilitätsmessgerät
Ferromaster [Publikation 3]



Allerdings sind mit dieser Methode kalibrierte Ergebnisse nur für Körper mit einem Mindestdurchmesser von 20 mm und einer Mindesthöhe von 5 mm zu erwarten. Es galt zu untersuchen, ob der bekannte Zusammenhang zwischen der Permeabilität und der Artefaktgröße auch durch Permeabilitätsmessungen an den deutlich unterhalb dieser Mindestgröße liegenden Attachments reproduzierbar sein würde.

Abbildung 4: Großer Prüfkörper auf Mindestmaß zur Kontrolle der Permeabilitätszahl des Gemisches (links), kleiner Miniaturprüfkörper aus derselben Mixtur (Mitte) in der Größendimension der Attachments (rechts).



Dazu wurden elf standardisierte, zylindrische Prüfkörper aus einer Epoxidharzmasse hergestellt, der zur Realisierung unterschiedlicher Permeabilitätswerte ein entsprechender Anteil Carbonyl-Eisenpulver beigemischt war. Deren durchschnittliche Maße ($d = 7,8 \text{ mm}$, $h = 3,6 \text{ mm}$) wurden so gewählt, dass das Volumen jedes einzelnen Attachments innerhalb dieser kleinen zylindrischen Prüfkörper lag. [**Publikation 3**].

Ihre magnetische Permeabilität lag bei 1,003 – 1,01 – 1,02 – 1,03 – 1,035 – 1,04 – 1,09 – 1,104 – 1,164 – 1,283 und 1,431.

Diese Prüfkörper wurden unter den in Tabelle 1 verzeichneten Bedingungen im Kernspintomographen exponiert. Die ermittelten Artefaktradien jeder einzelnen Sequenz wurden in jeweils beiden Schnittebenen gemeinsam mit den zugehörigen Permeabilitätswerten in ein kartesisches Koordinatensystem übertragen. Die resultierenden Funktionen wurden mit der „Curve Fitting Toolbox“ analysiert und die entstandenen Kurven in MATLAB[®] approximiert (The MathWorks GmbH, Ismaning / Deutschland). Zur Parameterabschätzung wurde der Ansatz $y = a \cdot (x - 1)^b$ mit Optimierung nach dem Root-Mean-Square-Error verfolgt. Es wurden die Funktionen bestimmt, deren mittlere quadratische Fehler bezogen auf alle Messwerte am geringsten waren [**Publikation 3**].

Um die Aussagekraft der Permeabilitätsmessung an den unterhalb der Mindestgröße liegenden Applikationen mit dem „Ferromaster“ zu prüfen, wurden anschließend die Artefakte von insgesamt 21 kieferorthopädischen Attachments untersucht und deren Messpunkte in das beschriebene Koordinatensystem übertragen. Um eine breit gefächerte Produktpalette der Marktführer abzubilden, wurden Attachments unterschiedlicher Größe, Legierung und Gefügestruktur gewählt. Es wurden Produkte aus Keramik, Titan-, Kobalt-Chrom- und Stahllegierungen im Kernspintomographen exponiert [**Publikation 3**].

1.5 Ergebnisse

1.5.1 Messmethode Artefaktausdehnung und Konkordanz

Es zeigt sich, dass zwei gut kalibrierte Untersucher eine sehr hohe Korrelation (Interrater-Reliabilität) erreichen. Der Korrelationskoeffizient nach Pearson liegt bei $r = 0,998$, was sich auf dem Niveau von $p < 0,01$ als signifikant erwies.

Es trat nur ein geringer, aber signifikanter Rater Bias auf: Untersucher 1 misst durchschnittlich 0,83 mm größere Artefaktradien als Untersucher 2 ($p < 0,001$).

Auch die Übereinstimmung der Messwerte beider Untersucher ist nach Kalibrierung hoch. Der Bland-Altman Plot zeigt, dass bei zwei kalibrierten Untersuchern minimale Messdifferenzen von bis zu 3 mm zu erwarten sind [**Publikation 2**].

1.5.2 Artefaktradien der vergleichenden Studie: in vitro

TSE-Sequenz (TSE) und Gradientenecho-Sequenz (GRE):

Erwartungsgemäß erzeugen das Keramikbracket und der Nickel-Titan-Draht gegenüber den hier genutzten Stahl-Applikationen erheblich kleinere Artefakte. Der Artefaktradius des Attachments aus Keramik liegt bei maximal 11,2 mm. Der Nickel-Titan-Draht erzeugt einen Artefaktdurchmesser von maximal 12,83 mm. Es sind bei beiden Proben keine relevanten Verzerrungen gemessen worden. Bei den Stahllattachments (AISI 630/AISI 316L) findet man Artefaktradien von bis zu 73,62 mm und eine Verzerrung von bis zu 130,0 mm. Bei dem Stahldraht (AISI 304) konfluieren die durch beide Drahtschenkel verursachten Artefakte zu einem gemeinsamen Gebilde, dessen Durchmesser an der größten Ausdehnung 143,58 mm beträgt. Es liegt eine gemessene Verzerrung von bis zu 105,0 mm an jeweils einem Drahtschenkel vor. Der Ligaturdraht (AISI 316L) erzeugt ein Artefakt von bis zu 13,4 mm Durchmesser.

1.5.3 Artefakte der vergleichenden Studie: in vivo

Unter klinischen Bedingungen ist bei TSE- und GRE-Sequenzen jenseits der Kopf-Hals-Region nicht mit Artefakten zu rechnen. Auf keinem der an der Probandin gewonnenen Schnittbilder überragen die Artefakte die Peripherie des darüber projizierten Kreises, welcher der Ausdehnung der in vitro gefundenen Artefakte entspricht (Abbildung 5). Insbesondere bei den TSE-Sequenzen sind auch einige innerhalb des Kreises liegende wichtige Strukturen noch diagnostizierbar, z.B. Vertebrae cervicales, Pharynx und Truncus cerebri [**Publikation 2**].

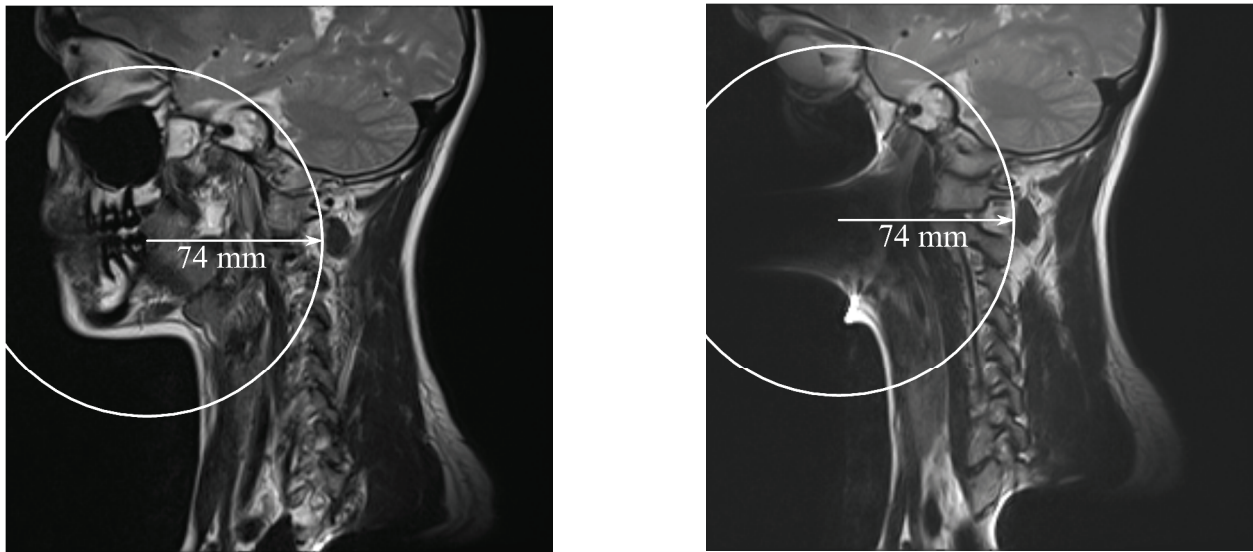


Abbildung 5: Übertragung des größten in vitro gemessenen Artefaktes, exemplarisch anhand der TSE-Sequenz. Links: Probandin ohne Apparatur, rechts: Probandin mit kieferorthopädischer Apparatur in situ.

TSE-Sequenz:

Das gesamte Neurocranium und die Vertebrae cervicales sind mit intraoraler kieferorthopädischer Apparatur artefaktfrei. Folgende anatomische Regionen sind klinisch nicht beurteilbar:

- Cavum oris
- periorale Region
- Lingua
- Cavum nasi
- Sinus maxillaris und Sinus ethmoidalis

GRE-Sequenz:

Nahezu das gesamte Viszerocranium ist von Artefakten überlagert und diagnostisch nicht nutzbar. Auch bei dieser Sequenz zeigt sich das Neurocranium größtenteils beurteilbar. Es treten dort minimale Artefakte auf, die eine Beurteilung jedoch noch zulassen. Zusätzlich zu den bei TSE-Sequenz diagnostisch nicht beurteilbaren Strukturen sind folgende Zielregionen durch Artefakte ausgelöscht:

- Orbita
- Medulla oblongata
- Sinus frontalis und Sinus sphenoidalis

Echoplanare Bildgebung (EPI):

Die EPI-Sequenz ist mit intraoraler Multibracketapparatur nicht nutzbar [**Publikation 2**].

1.5.4 Effekt einer artefaktreduzierenden Sequenz

Der hier nur für die TSE-Sequenzen verfügbare syngo[®] WARP-Modus bewirkt in vitro eine durchschnittliche Artefaktreduktion um $32,7 \pm 5,97$ %. Die Reduktion war durchweg signifikant (T-Test, $p < 0,001$). Dieser Effekt erscheint sagittal mit 35,96 % ausgeprägter als koronar mit 29,35 %. In der durch den Radiologen ausgewerteten In-vivo-Studie wirkt sich diese Einstellung nur in drei der 27 bewerteten Regionen artefaktreduzierend aus. Diese Artefaktreduktion führt jedoch nicht dazu, dass zuvor nicht beurteilbare Strukturen diagnostizierbar wurden. Jedoch wurden Regionen mit zuvor minimalen Artefakten (Sinus sphenoidalis, Naso- und Oropharynx) durch WARP nun artefaktfrei. [**Publikation 2**].

1.5.5 Artefaktgröße der kieferorthopädischen Attachments der Validierungsstudie

Die Produkte aus Keramik und Titan zeigen minimale Artefakte. Um das Attachment aus Keramik entstehen Artefaktradien von 2,8 mm bis 11,2 mm. Titan erzeugt Artefakte von 7,27 mm bis 10,59 mm. Die Artefaktradien um Kobalt-Chrom sind moderat und liegen im Bereich von 8,33 mm bis 18,78 mm. Die 16 untersuchten Produkte aus Stahl zeigen hinsichtlich ihrer Artefaktradien große Unterschiede. Es entstehen Artefakte mit Radien zwischen 10,29 mm und 73,62 mm [**Publikation 3**].

1.5.6 Magnettest und Permeabilitätsmessung mit dem Ferromaster

Die Permeabilitätsmessung mit dem Ferromaster liefert reproduzierbare Messergebnisse. Es wurden Permeabilitätswerte zwischen 1,000 und 1,46 ermittelt.

Es zeigt sich, dass der Magnet an den Attachments mit Permeabilitätszahlen von 1,003 und größer stets haften bleibt. Zu den Proben mit kleinerer Permeabilität, an denen der Magnet nicht haftet, gehören neben dem aus Keramik bestehenden Attachment, den Titan- und Kobalt-Chrom-Legierungen auch vier der insgesamt 16 aus Stahl gefertigten Produkte. Aber auch bei Proben, an denen der Magnet nicht haftet, treten mitunter kleinere Artefakte von bis zu 21,99 mm auf. **[Publikation 1/2/3]**.

1.5.7 Kurvenanalyse der standardisierten Prüfkörper der Validierungsstudie

Die Kurven (Abbildung 6a-d) zeigen das ermittelte Verhältnis zwischen Permeabilität μ_r und Artefaktradius R der standardisierten Prüfkörper mit bekannter Permeabilität. Der Zusammenhang zwischen den beiden Größen wird durch eine Wurzelfunktion beschrieben. Die Parameterabschätzung für den Ansatz $R = a \cdot (\mu_r - 1)^b$ ergab für den Faktor a Werte zwischen 85,27 und 114,6 sowie für den Exponenten b Werte zwischen 0,1759 und 0,2411. Die Punkte aller untersuchten kieferorthopädischen Attachments liegen unterhalb der approximierten Wurzelfunktion der standardisierten Prüfkörper **[Publikation 3]**.

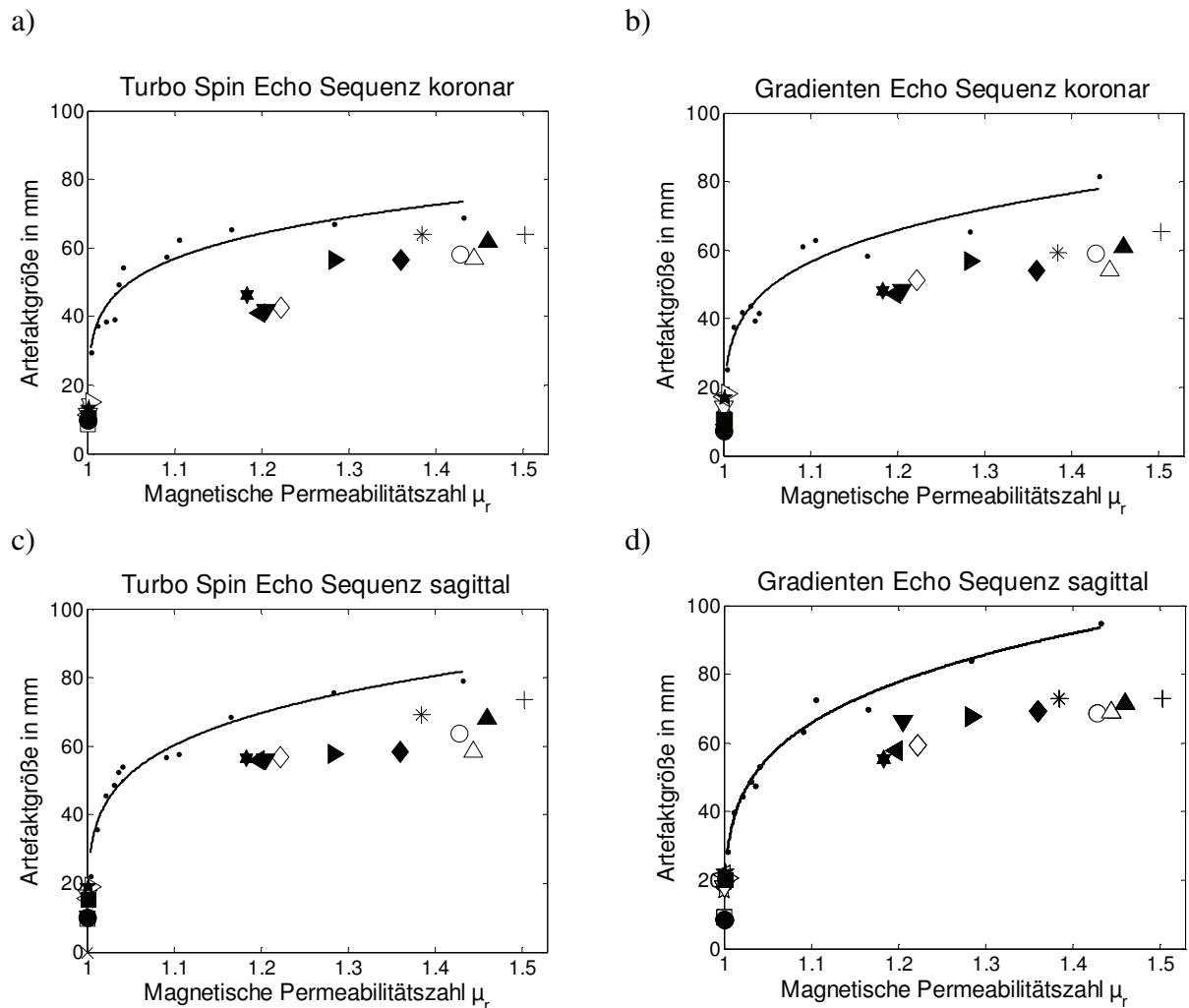


Abbildung 6a-d: Zusammenhang zwischen Permeabilitätszahl μ_r und Artefaktradius R [Publikation 3]

◆	Standardized Specimen	☆	Magic Lingualröhrchen	★	Ortho Cast
—	Fitting $a \cdot (x-1)^b$	◇	Euro Midi Classic	★	Brackets Roth OK
+	Smart Clip 6er	△	Discovery SL 2.0	◆	Brackets Saturn Roth UK
*	Victory Tube 6er	▽	Equilibrium2	▲	Apollo G2 OK
×	Clarity SL 3er	◀	Discovery smart	▼	Master Series
○	Midi Low Friction OK	◁	Ultrimm rund	▲	Mini Master
□	Rematitan Bukkalröhrchen	●	EquilibriumTi	▲	Empower Selfligating
☆	Topic	■	EquilibriumMini		

Legende zu den Abbildungen 6a-d: untersuchte kieferorthopädische Attachments [Publikation 3]

1.6 Diskussion

1.6.1 Klinische Relevanz der am Phantom gemessenen Artefakte

Die unter standardisierten Routinebedingungen gewonnenen In-vitro-Daten sind bei dieser Probandin klinisch anwendbar und beinhalten einen Sicherheitsbereich, da die hier entstandenen Artefakte etwas größer sind als die in vivo generierten. Am strukturierten Phantom sind auch kleinste hypo- und hyperintense Bezirke und die Verzerrungen messbar, welche die Diagnostik unter Realbedingungen nur geringfügig beeinflussen und mitunter zwischen den anatomischen Strukturen gar nicht eindeutig identifizierbar sind. Jedoch können diese im schlimmsten Fall als Läsionen fehlinterpretiert werden [**Publikation 3**]. Die vom Artefakt betroffene Fläche der klinischen Aufnahme ist deutlich kleiner als der durch den größten in vitro ermittelten Artefaktradius konstruierbare Kreis [**Publikation 2**].

Es genügt die zur jeweiligen Zielregion am nächsten platzierte Probe als Maßstab zu nehmen und von diesem Punkt aus den maximalen Artefaktradius anzusetzen.

1.6.2 Einordnung in die bestehende Literatur

Grundsätzlich bestätigt sich die Erkenntnis, dass die Auslöschungen bei GRE-Sequenzen deutlich größer sind als bei Spinecho-Sequenzen (SE) [5], bei denen sich jedoch eine asymmetrische Zone mit peripherer Signalverstärkung zeigt. Daher variieren die jeweils maximalen Artefaktradien zwischen den beiden Sequenzen nur in geringem Maße. Betrachtet man die Artefaktfläche, so ist die Auslöschungszone bei der GRE-Sequenz insgesamt größer als bei der SE-Sequenz [**Publikation 1**]. Die zweidimensionale [7] [8] oder gar dreidimensionale Artefaktbestimmung [9] ist jedoch für diese nicht rotationssymmetrischen Gebilde ohne Beschreibung ihrer individuellen Ausrichtung für den Kliniker wenig relevant. Da die Apparatur aus vielen verschiedenen Bestandteilen zusammengesetzt und regelhaft im Ober- und Unterkiefer angebracht ist, kann eine exakte Vorhersage über die Ausrichtung des komplexen Artefaktgebildes nicht getroffen werden. Daher wurde stets der maximale Artefaktradius gemessen, um dem Radiologen eine sichere Abschätzung des zu erwartenden Artefaktes zu ermöglichen [**Publikation 1/2/3**].

In der überwiegenden Zahl auch jüngster Studien wird gefordert, Stahlprodukte grundsätzlich vor Kernspintomographie zu entfernen. Diese Empfehlung beruht jedoch auf einem grundsätzlichen methodischen Fehler: Es wurden stets nur einzelne Produkte aus Stahl untersucht, dabei jedoch deren vom Gefüge abhängigen magnetischen Eigenschaften nicht berücksichtigt. So erklären Okano et al. auf der Basis nur eines untersuchten Produktes, dass Edelstahlbögen vor MRT entfernt werden müssten [10]. Elison et al. fanden zwar deutlich unterschiedlich große Artefakte um zwei getestete Stahlsorten, schlussfolgerten aber trotzdem, dass kraniale Strukturen mit intraoralen Brackets aus Edelstahl grundsätzlich nicht zu diagnostizieren seien [11] [**Publikation 2/3**].

Beau et al. untersuchten einen Retainerdraht aus Stahl, dessen Artefakt nur die Mundhöhle selbst betraf. Anhand der veröffentlichten Zusammensetzung ist zu vermuten, dass es sich dabei um einen austenitischen Stahl mit einer niedrigen Permeabilität handelt. Die Autoren verallgemeinern, dass Retainerdrähte im Mund belassen werden könnten, soweit die Zielregion nicht ausdrücklich die Mundhöhle betrifft. Dagegen fordern sie, Stahlbrackets immer zu entfernen, was auf der Untersuchung nur eines vermutlich ferritischen Stahlproduktes basiert [12]. Auch Wylezinska et al. testeten einzelne Attachments und Drähte unbekannter Stahlsorte und unbekannter magnetischer Permeabilität. Sie raten Edelstahlprodukte vor MRT möglichst zu entfernen [13] [**Publikation 3**].

Diese induktive Vorgehensweise hilft zur Beantwortung der Frage, ob kieferorthopädische Apparaturen vor MRT zu entfernen sind, nicht zuverlässig weiter. Von der Untersuchung einzelner austenitischer, martensitischer oder ferritischer Produkte kann keine allgemeingültige Aussage getroffen werden. Es muss ein deduktives Vorgehen gewählt werden. Die Bestimmung der magnetischen Permeabilitätszahlen μ_r ermöglicht dem Radiologen eine konkrete Vorhersage der Artefaktgröße um kieferorthopädische Apparaturen.

1.6.3 Limitationen

Die gewonnenen Erkenntnisse der experimentell ermittelten Daten unterliegen folgenden methodischen Limitationen.

Sämtliche Aussagen sind auf die Nutzung einer Hauptfeldstärke von 1,5 Tesla begrenzt, die jedoch häufig in der klinischen Routine Anwendung findet. Die Ergebnisse dieser Dissertation können nicht ohne weitere Folgeuntersuchungen auf höhere Magnetfeldstärken transferiert werden [**Publikation 3**].

Durch die Wahl der Bildgebungstechnik können Suszeptibilitätsartefakte akzentuiert oder minimiert werden. Ziel dieser Studie ist es nicht, die Abhängigkeit der Artefaktgröße von einzelnen Parametern der MRT zu zeigen, sondern dem Radiologen eine zuverlässige Artefaktvorhersage bei Standardparametern zu ermöglichen. Suszeptibilitätsartefakte vergrößern sich bei 3 Tesla grundsätzlich nur dann, wenn identische Aufnahmetechniken und Parameter gewählt werden würden. Dies ist jedoch nur selten der Fall [14] [**Publikation 3**].

Die quantitativ visuelle Bestimmung des Artefaktradius mit stetiger Ausprägung unterliegt einer gewissen Subjektivität. Jedoch bestätigt das Bland-Altman-Diagramm der durchgeführten Konkordanzanalyse eine gute Übereinstimmung zweier unabhängiger, kalibrierter Beurteiler. Durch die variablen Startpunkte der Bildfolge kann es zu minimalen Differenzen der Artefakt radien um dieselben Proben kommen, da das größte Artefakt in einer nicht detektierten Schicht (Distanzfaktor: 30 %) liegen kann. Des Weiteren hängt die Genauigkeit der Längenmessung mit dem Dicom Viewer von den gewählten Schichtdicken ab [**Publikation 2**].

Da die Untersuchung mit der artefaktreduzierenden Geräteeinstellung syngo[®] WARP auf einer Fallnachstellung mit einer geringen Anzahl von Attachments basiert, müsste eine Studie mit größerer Stichprobe erfolgen, um die vorliegenden Ergebnisse zu bestätigen.

Die in vivo generierten Daten beziehen sich auf eine erwachsene Probandin. Bei Kindern könnten aufgrund der kleineren Anatomie weitreichende Areale von Artefakten überlagert werden.

Die erarbeitete Methode ist insofern nur eingeschränkt anwendbar, da derzeit nur für zwei Sequenztypen entsprechende Kurven existieren. Die intraorale Permeabilitätsmessung muss auf ihre klinische Anwendbarkeit geprüft werden. Die vorliegenden Untersuchungen sollten auch bei höheren Hauptfeldstärken durchgeführt werden [**Publikation 3**].

1.6.4 Schlussfolgerung

Unter Einbeziehung der Limitationen können folgende Schlussfolgerungen aus der vorliegenden Arbeit gewonnen werden:

- Auf Basis der im Phantom gemessenen Werte kann der Radiologe je nach Zielregion entscheiden, ob die kieferorthopädische Apparatur bei der Kernspintomographie belassen werden kann oder vorher zu entfernen ist.
- Die Artefaktgröße ist sequenzabhängig. Auch die hier genutzte artefaktreduzierende Geräteeinstellung löst die bestehende Problematik der Suszeptibilitätsartefakte nicht.
- Jenseits der Kopf-Hals-Region ist bei den untersuchten Attachements nicht mit Artefakten zu rechnen.
- Die von den Apparaturen erzeugten Artefakte beeinflussen bei der TSE-Sequenz nur partielle Areale des Viszerocraniums. Die Strukturen des Neurocraniums bleiben unbeeinflusst.
- Bei der GRE-Sequenz sind zusätzlich zum angrenzenden Gewebe auch die pneumatisierten Höhlen und die Orbita durch Artefaktbildung nicht zu beurteilen. Die Diagnostik von HWS und ZNS ist möglich.
- Die zur Diagnostik von Ischämien genutzte echoplanare Bildgebung ist mit intraoraler Apparatur nicht nutzbar.
- Die Produktgruppe Stahl ist sehr inhomogen, selbst die Kenntnis des Gefüges lässt keine eindeutige Vorhersage zu. Dies beruht auf der martensitischen Umwandlung ursprünglich austenitischer Stähle durch Kaltverformung.
- Bei unbekanntem Produkteigenschaften ermöglicht der Magnettest eine gute Abschätzung. Jedoch sollte auch bei einem negativen Ergebnis mit minimalen Artefakten gerechnet werden. Hierbei handelt es sich zwar um ein leicht durchführbares, bisher jedoch nicht normiertes Verfahren.
- Der relevante Prädiktor der Artefaktentstehung ist die magnetische Permeabilität.
- Die Werte des Permeabilitätsmessgerätes Ferromaster sind aufgrund der Unterschreitung der Mindestgröße nicht validiert, erwiesen sich jedoch als hinreichend genau, da alle Punkte der Attachments unterhalb der approximierten Kurven der standardisierten Prüfkörper liegen.
- Von fraglichen Apparaturen kann nach Bestimmung der magnetischen Permeabilität die Maximalgröße des Artefaktes aus dem Diagramm abgelesen werden.

1.7 Literaturverzeichnis

1. Radlanski RJ. A new carbide finishing bur for bracket debonding. *J Orofac Orthop.* 2001;62(4):296-304.
2. Yassi K, Ziane F, Bardinet E, Moinard M, Veyret B, Chateil JF. [Evaluation of the risk of overheating and displacement of orthodontic devices in magnetic resonance imaging]. *J Radiol.* 2007;88(2):263-268.
3. Kemper J, Klocke A, Kahl-Nieke B, Adam G. [Orthodontic brackets in high field MR imaging: experimental evaluation of magnetic field interactions at 3.0 Tesla]. *Rofo.* 2005;177(12):1691-1698.
4. Bennett LH, Wang PS, Donahue MJ. Artifacts in magnetic resonance imaging from metals. *Journal of Applied Physics.* 1996;79(8):4712.
5. Blankenstein FH, Truong B, Thomas A, Schroder RJ, Naumann M. [Signal loss in magnetic resonance imaging caused by intraoral anchored dental magnetic materials]. *Rofo.* 2006;178(8):787-793.
6. ASTM F2119-07 Standard Test Method for Evaluation of MR Image Artifacts from Passive Implants. West Conshohocken, PA 2007.
7. Thomsen M, Schneider U, Breusch SJ, Hansmann J, Freund M. [Artefacts and ferromagnetism dependent on different metal alloys in magnetic resonance imaging. An experimental study]. *Orthopade.* 2001;30(8):540-544.
8. Klinke T, Daboul A, Maron J, Gredes T, Puls R, Jaghsi A, Biffar R. Artifacts in magnetic resonance imaging and computed tomography caused by dental materials. *PLoS One.* 2012;7(2):e31766.
9. Hug J, Nagel E, Bornstedt A, Schnackenburg B, Oswald H, Fleck E. Coronary arterial stents: safety and artifacts during MR imaging. *Radiology.* 2000;216(3):781-787.
10. Okano Y, Yamashiro M, Kaneda T, Kasai K. Magnetic resonance imaging diagnosis of the temporomandibular joint in patients with orthodontic appliances. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.* 2003;95(2):255-263.
11. Elison JM, Leggitt VL, Thomson M, Oyoyo U, Wycliffe ND. Influence of common orthodontic appliances on the diagnostic quality of cranial magnetic resonance images. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2008;134(4):563-572.
12. Beau A, Bossard D, Gebeile-Chauty S. Magnetic resonance imaging artefacts and fixed orthodontic attachments. *Eur J Orthod.* 2015;37(1):105-110.
13. Wylezinska M, Pinkstone M, Hay N, Scott AD, Birch MJ, Miquel ME. Impact of orthodontic appliances on the quality of craniofacial anatomical magnetic resonance imaging and real-time speech imaging. *Eur J Orthod.* 2015;37(6):610-617.
14. Nitz WR, Runge VM, Schmeets SH. *Praxiskurs MRT.* Georg Thieme Verlag, Stuttgart, New York. 2011:201.

2 Eidesstattliche Versicherung und ausführliche Anteilserklärung

2.1 Eidesstattliche Versicherung

Ich, Christine Zachriat, versichere an Eides statt durch meine eigenhändige Unterschrift, dass ich die vorgelegte Dissertation mit dem Thema:

„Suszeptibilitätsartefakte durch kieferorthopädische Attachments in der 1,5 Tesla Magnetresonanztomographie“

selbstständig und ohne nicht offengelegte Hilfe Dritter verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel genutzt habe.

Alle Stellen, die wörtlich oder dem Sinne nach auf Publikationen oder Vorträgen anderer Autoren beruhen, sind als solche in korrekter Zitierung (siehe „Uniform Requirements for Manuscripts (URM)“ des ICMJE -www.icmje.org) kenntlich gemacht. Die Abschnitte zu Methodik (insbesondere praktische Arbeiten, Laborbestimmungen, statistische Aufarbeitung) und Resultaten (insbesondere Abbildungen, Graphiken und Tabellen) entsprechen den URM (s.o) und werden von mir verantwortet.

Meine Anteile an den ausgewählten Publikationen entsprechen denen, die in der untenstehenden gemeinsamen Erklärung mit dem/der Betreuer/in, angegeben sind. Sämtliche Publikationen, die aus dieser Dissertation hervorgegangen sind und bei denen ich Autor bin, entsprechen den URM (s.o) und werden von mir verantwortet.

Die Bedeutung dieser eidesstattlichen Versicherung und die strafrechtlichen Folgen einer unwahren eidesstattlichen Versicherung (§156,161 des Strafgesetzbuches) sind mir bekannt und bewusst.

Datum

Unterschrift

2.2 Anteilserklärung an den erfolgten Publikationen

Christine Zachriat hatte folgenden Anteil an den folgenden Publikationen:

Publikation 1:

Blankenstein F, Truong BT, Thomas A, Thieme N, Zachriat C. Predictability of magnetic susceptibility artifacts from metallic orthodontic appliances in magnetic resonance imaging. J Orofac Orthop. 2015;76(1):14-29.

Beitrag im Einzelnen:

Selbstständige Literaturrecherche und Auswertung

Auswertung des radiologischen Bildmaterials gemeinsam mit Mitautor und Betreuer

Interpretation der Ergebnisse gemeinsam mit Betreuer

Erstellung der Grafik

Verfassung des Manuskriptes mithilfe des Betreuers

Publikation 2:

Zachriat C, Asbach P, Blankenstein KI, Peroz I, Blankenstein FH. MRI with intraoral orthodontic appliance-a comparative in vitro and in vivo study of image artefacts at 1.5 T. Dentomaxillofac Radiol. 2015;44(6):20140416.

Beitrag im Einzelnen:

Weiterführende Literaturrecherche

Konzeption der Studie mithilfe des Betreuers

Durchführung aller zugrunde liegenden Experimente gemeinsam mit Betreuer

Datenerhebung am MRT gemeinsam mit Radiologe und Betreuer

Probandin

Weiterentwicklung der Methode der Artefaktbestimmung

Auswertung des radiologischen Bildmaterials gemeinsam mit Radiologe und Betreuer

Interpretation der Daten

Erstellung der Grafiken

Verfassen des Manuskriptes gemeinsam mit Betreuer

Publikation 3:

Blankenstein FH, Asbach P, Beuer F, Glienke J, Mayer S, Zachriat C. Magnetic permeability as a predictor of the artefact size caused by orthodontic appliances at 1.5 T magnetic resonance imaging. Clin Oral Investig. 2016;10.1007/s00784-016-1788-1.

Beitrag im Einzelnen:

Konzeption der Studie gemeinsam mit Betreuer

Validierung der Permeabilitätsmessung

Entwicklung des Versuchsaufbaus

Durchführung aller zugrunde liegenden Experimente

Datenerhebung am MRT gemeinsam mit dem Radiologen

Eigenständige Auswertung des radiologischen Bildmaterials

Interpretation der Daten

Erstellung und Überarbeitung des Manuskriptes mit Korrekturhilfe

Korrespondenz im Verlauf des gesamten Peer-Review-Prozesses

Unterschrift, Datum und Stempel des betreuenden Hochschullehrers/der betreuenden Hochschullehrerin

Unterschrift des Doktoranden/der Doktorandin

3 Druckexemplare der ausgewählten Publikationen

Lizenznummer der Publikation 1: 3838940825963

Publikation 2: Für die eigene Doktorarbeit wird vom Verlag keine Lizenznummer gefordert.

Lizenznummer der Publikation 3: 3838941182653

Publikation 1: Zur Vorhersagbarkeit von Suszeptibilitätsartefakten durch metallische orthodontische Apparaturen in der Magnetresonanztomographie

<http://dx.doi.org/10.1007/s00056-014-0258-0>

Publikation 2: MRI with intraoral orthodontic appliance—a comparative in vitro and in vivo study of image artefacts at 1.5 T

<http://dx.doi.org/10.1259/dmfr.20140416>

Publikation 3: Magnetic permeability as a predictor of the artefact size caused by orthodontic appliances at 1.5 T magnetic resonance imaging

<http://dx.doi.org/10.1007/s00784-016-1788-1>

4 Curriculum Vitae

Mein Lebenslauf wird aus datenschutzrechtlichen Gründen in der elektronischen Version meiner Arbeit nicht veröffentlicht.

5 Komplette Publikationsliste

Publikationen in peer reviewed Fachzeitschriften mit Impact Factor:

1) Blankenstein F, Truong BT, Thomas A, Thieme N, Zachriat C. Predictability of magnetic susceptibility artifacts from metallic orthodontic appliances in magnetic resonance imaging. J Orofac Orthop. 2015;76(1):14-29.

Impact Factor: 0,833

2) Zachriat C, Asbach P, Blankenstein KI, Peroz I, Blankenstein FH. MRI with intraoral orthodontic appliance-a comparative in vitro and in vivo study of image artefacts at 1.5 T. Dentomaxillofac Radiol. 2015;44(6):20140416.

Impact Factor: 1,390

3) Blankenstein FH, Asbach P, Beuer F, Glienke J, Mayer S, Zachriat C. Magnetic permeability as a predictor of the artefact size caused by orthodontic appliances at 1.5 T magnetic resonance imaging. Clin Oral Investig. 2016;10.1007/s00784-016-1788-1.

Impact Factor: 2,352

Publikationen in Fachzeitschriften:

Zachriat C. Bleaching: Wer schön sein will muss leiden?! PLAQUE N CARE. 2012;2:98-102

Zachriat C. Neues aus der Implantologie. ZAHN PRAX. 2012;15(3):184-187

Zachriat C. Neues aus der Welt der Keramik- Ästhetischer High-End-Werkstoff der Zahnmedizin. ZAHN PRAX. 2012;15(4):266-268

Zachriat C. Computer-aided design und computer-aided manufacturing - Fortschritt oder Kompromiss?. ZAHN PRAX. 2012;15(5):306-308

Zachriat C. Effizienz von Prophylaxemaßnahmen. ?. ZAHN PRAX. 2012;15(6):390-393

Zachriat C. Verschrauben oder Zementieren, das ist hier die Frage!. ZAHN PRAX. 2013;16(1):16-20

Zachriat C. Sensibilitäten und andere Unannehmlichkeiten. ZAHN PRAX. 2013;16(2):94-97

Zachriat C. Implantatabutments. ZAHN PRAX. 2013;16(Sonderausgabe Implantologie):14-16

Zachriat C. Digitale Farbbestimmung - neomodische Spielerei oder sinnvolle Alternative zum subjektiven Blick. PLAQUE N CARE. 2013;2:88-91

Zachriat C. Parodontitis + Implantate = Peri...was?. ZAHN PRAX. 2013;16(3):176-180

Zachriat C. Der alte Streit ums Brückenzwischenglied: Das Ovate Pontic Design. ZAHN PRAX. 2013;16(4):234-237

Zachriat C. Über die Kunst der Wurzelkanalbehandlung. ZAHN PRAX. 2013;16(5):286-291

DGZI Journal, ZWP online Zweitveröffentlichung Verschrauben oder Zementieren

6 Danksagung

Frau Priv.-Doz. Dr. Ingrid Peroz danke ich herzlich für die Anstellung als wissenschaftliche Mitarbeiterin und dafür, dass Sie mir die Bearbeitung dieses Promotionsthemas unter Ihrer Leitung ermöglicht hat. Vielen Dank auch für die Unterstützung und das Korrekturlesen.

Für die freundliche Überlassung des Themas, die umfangreiche Betreuung, die tatkräftige Hilfe und die konstruktiven Diskussionen danke ich Herrn Dr. Felix Blankenstein. Mein besonderer Dank gilt dir Felix, denn ich habe von dir und deinem Wissen sowie deiner Erfahrung profitieren können. Ich werde mir deine Eloquenz und deine Hilfsbereitschaft stets zum Vorbild nehmen. Vielen Dank für die nette Zusammenarbeit und das Vertrauen in mich; ich freue mich auf alle folgenden Projekte.

Ich möchte Herrn Prof. Dr. Florian Beuer für die wertvollen Hinweise und seine effiziente Hilfe bei der Fertigstellung dieser Arbeit danken, durch die er die Entwicklung meiner akademischen Laufbahn maßgeblich bestimmt hat.

Ein weiteres Dankeschön richtet sich an Herrn Priv.-Doz. Dr. Patrick Asbach, der die experimentelle Arbeit am Kernspintomographen zielorientiert durchgeführt hat und mir mit seiner fundierten Expertise stets zur Seite stand.

Zu Dank verpflichtet bin ich Herrn Dr. Stefan Mayer, dessen physikalisches Fachwissen und Hilfe zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat.

Ein weiterer Dank geht an die Statistiker Herrn Dr. Konrad Neumann und Herrn Dr. Ulrich Gauger.

Ich möchte meinem Mann danken, der immer für mich da gewesen ist. Danke Johannes, dass du immer an mich geglaubt hast. Dein technisches Know-how hat unser Projekt wirklich tatkräftig unterstützt.

Danke Jennifer Hamm, ohne deine Hilfe im TPK wäre ich wohl niemals Zahnärztin geworden. Danke auch für das Gegenlesen des Manuskriptes.

Danke Katharina von Wallis für dein offenes Ohr während dieser langwierigen Promotion.

Danke Julia Mann für die qualifiziert beantworteten Englisch-Fragen.

Danke Martin Heimann für die gemeinsame Zeit als Kollegen und die vielen langen Abende im Büro, an denen wir gemeinsam an unseren Doktorarbeiten saßen.

Der letzte Dank gebührt meinen Eltern, die mich immer unterstützt haben und deren bedingungslose Liebe mich stets begleitet hat. Danke für alles!