

Diplomarbeit

**MR-Indikation, Ergebnisse und Langzeitverlauf bei
PatientInnen nach Implantation
eines MR-tauglichen Herzschrittmachersystems**

eingereicht von

Alexandra Hirn

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktorin der gesamten Heilkunde

(Dr.ⁱⁿ med. univ.)

an der

Medizinischen Universität Graz

ausgeführt an der

Klinischen Abteilung für Herzchirurgie

unter der Anleitung von

Frau Univ.-Ass.ⁱⁿ OAⁱⁿ Dr.ⁱⁿ Ingeborg Keeling

Frau Ass.-Prof.ⁱⁿ OAⁱⁿ Dr.ⁱⁿ Manuela Aschauer

Graz, 08.11.2016

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst habe, andere als die angegebenen Quellen nicht verwendet habe und die den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am 08.11.2016

Alexandra Hirn eh

DANKSAGUNG

Ganz herzlich möchte ich meinen Diplomarbeitsbetreuerinnen Frau Univ. Ass.ⁱⁿ OAⁱⁿ Dr.ⁱⁿ Ingeborg Keeling und Frau Ass. Prof.ⁱⁿ OAⁱⁿ Dr.ⁱⁿ Manuela Aschauer danken. Beide hatten stets ein offenes Ohr für meine Anliegen und Fragen, waren mir fachlich eine große Unterstützung und brachten mir einen sehr wertschätzenden Umgang entgegen.

Weiters möchte ich mich bei Herrn DI Dr. Markus Puchinger für die Hilfe bei der statistischen Auswertung, sowie bei Herrn MSc. Jakob L. Honeder für das genaue Lesen der Arbeit und die Verbesserungsvorschläge bedanken.

Großer Dank gilt meinen Eltern, die mir dieses Studium ermöglichten und mir immer zur Seite stehen.

Meinen Freunden, besonders M. und N., möchte ich für die vielen tollen Stunden während des Studiums danken.

Meinem Freund P. danke ich für die vielen motivierenden Worte und die Geduld während des Studiums und Verfassens dieser Arbeit.

ZUSAMMENFASSUNG

Hintergrund: Erst seit wenigen Jahren sind MR-kompatible Herzschrittmacher und Defibrillatoren in der Europäischen Union zugelassen. Davor blieb den meisten PatientInnen mit CIED (Cardiovascular implanted electronic device) eine MR-Untersuchung verwehrt, da diese nur unter großem Risiko und strengen Vorsichtsmaßnahmen durchgeführt werden konnte. Diese Arbeit beschäftigt sich mit MR-Untersuchungen bei PatientInnen mit MR-kompatiblen CIED hinsichtlich Indikationen und Ergebnisse der MR-Untersuchung sowie Langzeitverlauf der PatientInnen.

Methoden: Es wurden all jene MR-Untersuchungen bei PatientInnen mit MR-kompatiblen CIED an der Klinischen Abteilung für Radiologie am Universitätsklinikum Graz eingeschlossen, die von September 2011 bis Juni 2015 stattfanden. Daraus wurden Daten des Herzschrittmachers und der MR-Untersuchung erhoben und ausgewertet. Weiters wurde eine Fragebogenuntersuchung bezüglich MR-Untersuchung und Lebensqualität/Duke-Aktivitätsindex durchgeführt.

Ergebnisse: Die Auswertung der Herzschrittmacherdaten zeigte, dass keine Funktionsstörungen des Herzschrittmachers durch die MR-Untersuchung auftraten. Bei sieben MR-Untersuchungen traten Artefakte auf, eine Beeinträchtigung der Beurteilbarkeit war bei keiner dieser sieben Untersuchungen gegeben. 17 von 23 PatientInnen gaben in der Fragebogenuntersuchung an, keinen Unterschied zwischen MR-Untersuchungen mit bzw. ohne MR-kompatible Herzschrittmacher verspürt zu haben.

Schlussfolgerung: Die Herzschrittmacherfunktion wird durch die MR-Untersuchung nicht beeinflusst. Bestimmte Sequenzen der MR-Untersuchung sowie die Lage der Schrittmachertasche haben Auswirkung auf Artefakte und Beurteilbarkeit der MR-Bilder.

ABSTRACT

Background: Only in recent years the European Union approved MRI conditional pacemakers and MRI conditional ICDs (implantable cardioverter defibrillator). Before most patients with CIEDs (Cardiovascular implanted electronic device) did not have the possibility to undergo MRI due to a high risk of complications and strict precautions during the examination. This survey covers indications and results of MRI examinations as well as long-term follow ups of patients with MRI conditional CIED.

Methods: This study included all patients with MRI conditional CIED who underwent MRI examinations at the Department of Radiology at the University Hospital of Graz between September 2011 and June 2015. Relevant data regarding pacemakers and MRI examinations were collected and analysed. Furthermore, we performed a written survey among these patients concerning the MRI exam. In addition, overall quality of life and Duke Activity Status Index with MRI-pacemakers were tested.

Results: We were unable to detect any dysfunction of cardiac pacemakers caused by MRI. Artefacts occurred in seven MRI examinations, but these did not interfere interpretation of those examinations. 17 out of 23 patients did not notice a difference between MRI examination with or without MRI conditional pacemaker.

Conclusion: According to this study, the performance of MRI conditional pacemakers remained unchanged during the MRI examination. However, some MRI sequences and near location of the pacemaker pocket can promote the occurrence of artefacts and might disturb the interpretation of the images.

INHALTSVERZEICHNIS

Danksagung	III
Zusammenfassung	IV
Abstract	V
Inhaltsverzeichnis	VI
Glossar und Abkürzungen	VIII
Abbildungsverzeichnis	X
Tabellenverzeichnis	XII
1 Einleitung	1
1.1 Hintergrund der Arbeit	1
1.2 Kernfrage der Arbeit.....	2
1.3 Theoretische Grundlagen der Herzschrittmachertherapie	2
1.3.1 Aufbau eines Herzschrittmachersystems.....	2
1.3.2 Implantation.....	4
1.3.3 Antibradykarde Herzschrittmachertherapie	6
1.3.4 Antitachykarde Systeme – ICD	10
1.4 Magnetresonanztomographie.....	12
1.4.1 Geschichtlicher Überblick	12
1.4.2 Allgemeine Grundlagen	13
1.4.3 Physikalische Grundlagen und Bilderzeugung	14
1.4.4 Magnetfeldstärke und Spezifische Absorptionsrate (SAR).....	15
1.4.5 Wichtige technische Begriffe.....	17
1.4.6 Bildkontrast.....	18
1.4.7 Sequenzen.....	19
1.4.8 Bildqualität und Artefakte.....	21
1.4.9 Kontrastmittel	23
1.4.10 Kontraindikationen der Magnetresonanztomographie	23
1.5 Magnetresonanz bei konventionellen und MR-kompatiblen CIEDs.....	24
1.5.1 Risiko und Komplikationen von MR-Untersuchungen bei konventionellen CIED PatientInnen ..	24
1.5.2 Ablauf und Besonderheiten der MR-Untersuchung bei konventionellen Herzschrittmacher.....	25
1.5.3 „Safe by design“	27
1.5.4 Allgemeines zu MR-kompatiblen Herzschrittmachern und ICDs.....	28

1.5.5 Ablauf und Besonderheiten der MR-Untersuchung bei MR-kompatiblen Herzschrittmacher	28
2 Material und Methoden	31
2.1 Studiendesign.....	31
2.2 Deskriptive Statistik	31
2.2.1 PatientInnenkollektiv	31
2.2.2 Herzschrittmacher.....	32
2.2.3 MR: Datenauswertung und Bildbefundung.....	33
2.2.4 Fragebogenauswertung	34
2.3 Statistische Auswertung	35
3 Ergebnisse	36
3.1 Deskriptive Statistik	36
3.1.1 PatientInnenkollektiv	36
3.1.2 Herzschrittmacherdaten.....	40
3.1.3 MR-Untersuchung.....	51
3.2 Artefakten und Beurteilbarkeit	58
3.2.1 Deskriptive Statistik von Artefakten und Beurteilbarkeit	58
3.2.2 Beschreibung der Artefakte und Beurteilbarkeit.....	61
3.3 Statistische Auswertung der Fragebogenuntersuchung	75
3.3.1 Duke Aktivitätsindex	75
3.3.2 MR-Untersuchung und Lebensqualität	77
4 Diskussion.....	80
4.1 Interpretation der Ergebnisse.....	80
4.1.1 Indikationen	80
4.1.2 Ergebnisse.....	81
4.1.3 Langzeitverlauf.....	84
4.2 Limitationen.....	85
4.3 Conclusio	86
5 Literaturverzeichnis	87
Anhang.....	A

GLOSSAR UND ABKÜRZUNGEN

0	Kein(e)
3D	Dreidimensional
A	Atrium
A.	Arterie
ADC	Apparent diffusion coefficient
ASTM	American Society of Testing Materials
AV	Atrioventrikulär
BMI	Body-Mass-Index
BPEG	British Pacing and Electrophysiology Group
CIED	Cardiovascular implanted electronic device
Cor.	Koronal
CRT	Kardiale Resynchronisationstherapie
D	Dual
DASI	Duke Aktivitätsindex
DICOM	Digital Imaging and Communication in Medicine
DTPA	Diethylentriaminpentaessigsäure
EKG	Elektrokardiogramm
EPI	Echo planar imaging
FDA	US Food and Drug Administration
FISP	Fast imaging with steady-state precession
FLAIR	Fluid-attenuated inversion recovery
FLASH	Fast low angle shot
FoV	Bildfeld (field of view)
Gd	Gadolinium
Gd-DPTA	Gadopentat-Dimeglumin
GRE	Gradientenecho
ICD	Implantierbarer Kardioverter-Defibrillator
IEC	International Electrotechnical Commission
k.A.	Keine Angabe
MET	Metabolische Äquivalente

Glossar und Abkürzungen

MIP	Maximal intensity Projektion
Mn	Mangan
MR	Magnetresonanz
MRT	Magnetresonanztomographie
NASPE	North American Society of Pacing and Electrophysiology
NBG-Code	North American Society of Pacing and Electrophysiology / British Pacing and Electrophysiology Group Generic Pacemaker Code
OP	Operation
PACS	Bildarchivierungs-und Kommunikationssystem
PC	Phasenkontrast
PCD	Pacer-Kardioverter-Defibrillator
PD	Protonendichte
PET	Positronen-Emissions-Tomographie
PSIF	Reversed fast imaging with steady-state precession
S	Single
SA	Sinuatral
Sag.	Sagittal
SAR	Spezifische Absorptionsrate
SE	Spinecho
STIR	Short inversion time inversion recovery
T ₁	Längsrelaxation
T ₂	Querrelaxation
TA	Akquisitionszeit
TE	Echozeit
TH	Schichtdicke
TI	Inversionszeit
TOF	Time of flight
TR	Repetitionszeit
Tra.	Transversal
TSE	Turbo Spinecho
V	Ventrikel
V.	Vena
WHO	Weltgesundheitsorganisation

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

<i>Abbildung 1: Schraubelektrode (CapSure Fix Novus™ MRI® 5076 ©Medtronic GmbH)</i>	3
<i>Abbildung 2: Ankerelektrode (CapSure Sense MRI® ©Medtronic GmbH)</i>	3
<i>Abbildung 3: Bewegungsartefakt durch Pulsation der A. carotis in einer transversalen T₁-gewichteten Spinecho-Sequenz</i>	22
<i>Abbildung 4: Voraussetzungen und Arbeitsablauf vor Durchführung einer MR-Untersuchung bei PatientInnen mit MR-kompatiblen Herzschrittmacher [modifiziert nach (36)]</i>	30
<i>Abbildung 5: Geschlechterverteilung</i>	36
<i>Abbildung 6: Altersverteilung der PatientInnen bei Herzschrittmacherimplantation</i>	37
<i>Abbildung 7: Altersverteilung der PatientInnen bei MR-Untersuchung</i>	38
<i>Abbildung 8: BMI-Verteilung zum Zeitpunkt der MR-Untersuchung</i>	39
<i>Abbildung 9: Indikationen zur Herzschrittmacherimplantation</i>	40
<i>Abbildung 10: Verteilung der Herzschrittmacher-Modi</i>	41
<i>Abbildung 11: Modi der Herzschrittmacher bei bestimmter Indikation</i>	42
<i>Abbildung 12: Prozentueller Anteil der Herzschrittmacherfirmen</i>	43
<i>Abbildung 13: Modelle der Firma Biotronik®</i>	44
<i>Abbildung 14: Modelle der Firma Medtronic®</i>	45
<i>Abbildung 15: Prozentueller Anteil der Lage der Schrittmachertaschen</i>	50
<i>Abbildung 16: Prozentueller Anteil von MR-Untersuchungen nach bestimmten Intervallen nach Herzschrittmacherimplantation</i>	51
<i>Abbildung 17: Prozentueller Anteil der MR-Untersuchungsmodalitäten</i>	52
<i>Abbildung 18: Prozentueller Anteil der MR-Untersuchungsfelder</i>	53
<i>Abbildung 19: Prozentueller Anteil der 1,5T MR-Untersuchungsgeräte</i>	55
<i>Abbildung 20: Prozentueller Anteil der verabreichten Kontrastmittel</i>	56
<i>Abbildung 21: Spezifische Absorptionsrate der MR-Untersuchungen für Kopf/Rumpf und Extremitäten</i>	57
<i>Abbildung 22: MR-Untersuchungen mit Artefakten durch den Herzschrittmacher</i>	58
<i>Abbildung 23: Prozentueller Anteil der MR-Untersuchungsfelder mit Artefakten</i>	59
<i>Abbildung 24: Prozentueller Anteil der Herzschrittmacher mit Artefaktgeschehen</i>	60
<i>Abbildung 25: PatientIn 1: Tonsillennymphom, pathologisch vergrößerte Lymphknoten und Artefakte der Sequenz T1_tse_tra_fs_4mm_KM im Untersuchungsfeld Hals</i>	62
<i>Abbildung 26: PatientIn 1: Artefakte der Sequenz T1_tse_tra_fs_4mm_KM im Untersuchungsfeld Hals</i>	62
<i>Abbildung 27: PatientIn 2: Kontrastmittelaussparung der V. jugularis in der Äquilibriumphase durch einen Thrombus</i>	63
<i>Abbildung 28: PatientIn 2: Thrombus und Artefakt der Sequenz T1_vibe_tra_fs im Untersuchungsfeld Hals</i>	64

<i>Abbildung 29: PatientIn 2: Thrombusausdehnung, Artefakte durch Herzschrittmacher und Schrittmachersonden ohne Beeinträchtigung der Beurteilbarkeit</i>	64
<i>Abbildung 30: PatientIn 3: Artefakt der Sequenz T1_tse_cor_fs_4mm_KM im Untersuchungsfeld Hals.....</i>	65
<i>Abbildung 31: PatientIn 4: Röntgenbild mit Sternum-Cerclagen und Herzschrittmacher</i>	66
<i>Abbildung 32: PatientIn 4: fraglicher Schrittmacher-Artefakt der Sequenz F13d_cor_carotis_KM im Untersuchungsfeld Hals</i>	67
<i>Abbildung 33: PatientIn 4: Schrittmacherartefakt der Sequenz F13d_cor_carotis_KM im Untersuchungsfeld Hals</i>	67
<i>Abbildung 34: PatientIn 4: Verlauf der Herzschrittmachersonde</i>	68
<i>Abbildung 35: PatientIn 5: Vergleich dreier MR-Schnittbilder vor und nach Herzschrittmacherimplantation (linke Spalte nach Schrittmacherimplantation, rechte Spalte vor Schrittmacherimplantation)</i>	70
<i>Abbildung 36: PatientIn 5: Einsehbarkeit des linksventrikulären Ausflusstraktes und der Aorta während systolischer (links) und diastolischer (rechts) linksventrikulären Füllung trotz Artefakt.....</i>	71
<i>Abbildung 37: PatientIn 5: Signallose Areale im rechten Ventrikel, wahrscheinlich durch turbulenten Fluss im Rahmen einer Pulmonalklappeninsuffizienz, während der maximalen diastolischen Füllung (links) und der systolischen Füllung (rechts)</i>	71
<i>Abbildung 38: PatientIn 5: Vierkammerblick des Herzens mit Sondenartefakt im rechten Ventrikel</i>	72
<i>Abbildung 39: PatientIn 6: Artefakt der Sequenz Trufi2d_t1_psr_segmented_MAG im Untersuchungsfeld Thorax</i>	73
<i>Abbildung 40: PatientIn 7: Artefakt der Sequenz „Localizer“ im Untersuchungsfeld Lendenwirbelsäule....</i>	74
<i>Abbildung 41: Prozentueller Anteil der körperlichen Leistungsfähigkeit.....</i>	76
<i>Abbildung 42: Anzahl der Beschwerden während einer MR-Untersuchung</i>	77
<i>Abbildung 43: Unterschied zwischen MR-Untersuchung ohne bzw. mit MR-kompatiblen Herzschrittmacher</i>	78
<i>Abbildung 44: Gesamtnote der Lebensqualität mit MR-kompatiblen Herzschrittmacher</i>	79
<i>Abbildung 45: Lage der Schrittmachertasche mit geringerem Artefaktgeschehen (links) und Lage der Schrittmachertasche bei deutlicherem Artefaktgeschehen (rechts)</i>	84

TABELLENVERZEICHNIS

<i>Tabelle 1:</i> Parameter und Ergebnisse von intraoperativen Messungen [modifiziert nach (6)]	5
<i>Tabelle 2:</i> NBG-Code [modifiziert nach (11)]	8
<i>Tabelle 3:</i> NBD-Code [modifiziert nach (14)]	11
<i>Tabelle 4:</i> IEC und FDA Richtlinien des SAR-Wertes und Körpererwärmung bei einer MR-Untersuchung [modifiziert nach (19)]	16
<i>Tabelle 5:</i> Anzahl und prozentueller Anteil von Herzschrittmacherindikationen und -modi	42
<i>Tabelle 6:</i> MR-Indikationen	54

1 EINLEITUNG

1.1 Hintergrund der Arbeit

Die erste Implantation eines Herzschrittmachers fand am 8. Oktober 1958 in Schweden statt (1). Heutzutage sind mehrere Millionen Menschen Träger eines kardiovaskulär implantierten elektronischen Gerätes (CIED) und somit eines Herzschrittmachers oder implantierbaren kardioverter-Defibrillators (ICD). Die Anzahl jener steigt stetig, vor allem aufgrund zunehmender Indikationsstellungen bezüglich Herzversagen und primärer Prävention (2).

Ebenso bekommt die MR-Bildgebung eine immer größere Bedeutung. Vor allem in der radiologischen Untersuchung des zentralen Nervensystems, bei muskuloskeletalen Erkrankungen, Tumoren oder kardiovaskulären Erkrankungen kommt das MR wegen sehr gutem Weichteilkontrast und der Möglichkeit einer dreidimensionalen (3D) Rekonstruktion immer häufiger zum Einsatz (3).

Schon 2005 wurde angenommen, dass etwa 75% aller PatientInnen, die TrägerInnen eines CIED sind, eine MR-Untersuchung benötigen werden. Dies ist vor allem auf die hohe Wahrscheinlichkeit von Komorbiditäten, wie Schlaganfall, Erkrankungen der Lendenwirbelsäule, Arthritis oder Tumore, zurückzuführen (4).

Vor der Einführung MR-kompatibler Herzschrittmacher wurden TrägerInnen eines CIED von MR-Untersuchungen ausgeschlossen (3). Die Entwicklung MR-kompatibler Herzschrittmacher ermöglicht es, beide Modalitäten miteinander zu verbinden (5).

1.2 Kernfrage der Arbeit

Diese Arbeit beschäftigt sich mit Indikationen, Durchführungen und Komplikationen von PatientInnen mit MR-kompatiblen Herzschrittmachersystemen und der Frage nach Parametern, die ein erhöhtes Risiko für den Patienten bedeuten könnten. Weiters werden die Ergebnisse der MR-Untersuchung und der (Langzeit-)Verlauf von PatientInnen nach Implantation eines MR-kompatiblen Herzschrittmachersystems untersucht.

1.3 Theoretische Grundlagen der Herzschrittmachertherapie

1.3.1 Aufbau eines Herzschrittmachersystems

Ein Herzschrittmachersystem setzt sich aus einem Aggregatgehäuse und den Herzschrittmachersonden zusammen. Das Aggregatgehäuse besteht vorzugsweise aus Titan und dient dem Schutz der elektrischen Bauteile vor Körperflüssigkeiten. In diesem Gehäuse befinden sich funktionelle Elemente, wie etwa ein Telemetriemodul zur Kommunikation mit externen Programmiergeräten, elektronische Datenspeicher und die Schrittmacherbatterie, eine Lithium-Jod-Batterie (6,7). Voll geladen beträgt die Leerlaufspannung der Batterie 2,8V. Diese nimmt, bis zu einer Spannung von 2,4V, linear ab. Danach erfolgt die Spannungsabnahme exponentiell, bis die Batterie vollständig entladen ist. Je nach Stimulationshäufigkeit können Batterielaufzeiten von zehn Jahren oder mehr erreicht werden. Der Batteriewechsel erfolgt immer durch Austausch des gesamten Aggregats, die Schrittmachersonden werden, sofern sie noch intakt sind, weiterverwendet (7).

Bei Herzschrittmachersonden handelt es sich um unipolare oder bipolare Elektroden. Die Sondenspitze unipolarer Systeme dient als Kathode, das Schrittmacheraggregat als Anode. Bei bipolaren Systemen beinhaltet die Elektrode im Herzen sowohl Anode als auch Kathode, wobei die Sondenspitze als Kathode, und eine etwa 2,5cm dahinterliegende Ringelektrode als Anode, eingesetzt werden (8). Vorteil der bipolaren Elektroden ist eine geringere Wahrnehmung von elektrischen Störsignalen wie Muskelpotentiale oder externen Quellen. Die häufigsten Formen der Sonden sind Schraubelektroden (siehe

Abbildung 1) und Ankerelektroden mit Widerhaken (siehe **Abbildung 2**). Aus den Sondenspitzen werden Steroidhormone freigesetzt, die Entzündungsreaktionen reduzieren und eine stabile, niedrige Reizschwelle aufrecht erhalten (7).



Abbildung 1: Schraubelektrode (CapSure Fix Novus™ MRI® 5076 ©Medtronic GmbH)



Abbildung 2: Ankerelektrode (CapSure Sense MRI® ©Medtronic GmbH)

1.3.2 Implantation

Nach einer etwa 5cm langen Hautinzision im Bereich des Sulcus deltoideopectoralis und Präparation der Subcutis wird die Vena (V.) cephalica aufgesucht, peripher legiert, zentral angeschlungen, inzidiert und die jeweilige Schrittmachersonde in die Vene eingeführt. Seltener wird auch die V. subclavia punktiert. Bei Zugang über die V. cephalica wird die Sonde unter Durchleuchtung in Richtung des rechten Ventrikels vorgeschoben und im Anschluss die Lage der Sonde überprüft. Im Falle einer Punktion der V. subclavia wird zunächst ein Mandrin in Richtung des rechten Ventrikels vorgeschoben, eine Lageüberprüfung durchgeführt, und, bei korrekter Lage über diesen Führungskatheter die Sonden implantiert. Ventrikelsonden werden üblicherweise an der Spitze des rechten Ventrikels, Vorhofsonden am rechten Herzohr, der anterolateralen Vorhofwand oder der kaudalen anterioren Vorhofwand verankert oder angeschraubt (6).

Nach Platzierung der Sonden werden Messungen zur Funktionsüberprüfung des Herzschrittmachers durchgeführt (siehe 1.3.2.1). Nach der Sondenfixierung und Präparation einer subcutanen Tasche für das Schrittmacheraggregat werden, nach genauer Blutstillung, die Elektroden an das Aggregatgehäuse angeschlossen und gemeinsam in die Aggregattasche gebettet. Danach erfolgt ein zweischichtiger Wundverschluss (6).

Die Schrittmachertasche wird an der Klinischen Abteilung für Herzchirurgie am Universitätsklinikum Graz üblicherweise rechts angelegt, mit Ausnahme von aktiven Jägern, bei denen der Schrittmacher links implantiert wird. Ebenfalls linksseitig erfolgt die Anlage der Tasche eines ICD oder CRT.

1.3.2.1 Intraoperative Messungen

Die intraoperativen Messungen beinhalten Reizschwelle, intrakardiale Signale, Sondenimpedanz, Anstiegssteilheit, Zwerchfellmitemregung und ante- bzw. retrograde Leitungsverhältnisse (6,9).

Die Reizschwelle ist jene elektrische Energie, die gerade noch eine Kontraktion des Herzens bewirkt. Sie wird in Volt angegeben. Im Ventrikel werden Werte bis 1V akzeptiert, im Vorhof liegt dieser Wert bei 1,5V. Eine Reizschwelle der Vorhöfe über 1,5V kann in Ausnahmefällen toleriert werden, eine Überschreitung der Reizschwelle von 1V im Ventrikel bedarf bei Fortbestand jedoch meist einer Intervention (9).

Die intrakardialen Signale beziehen sich auf Ventrikelsignal (R-Welle) und Vorhofsignal (P-Welle). Die R-Welle sollte 4mV, die P-Welle 2mV nicht unterschreiten (9).

Die Sondenimpedanz sollte 300Ω bis 1800Ω betragen (6).

Die für diese Arbeit relevanten Werte werden nachfolgend beschrieben (siehe **Tabelle 1**):

Parameter	Wünschenswert	akzeptabel
<i>Reizschwelle Ventrikel</i>	$\leq 0,5V$	$\leq 1,0V$
<i>Reizschwelle Vorhof</i>	$\leq 1,0V$	$\leq 1,5V$
<i>R-Welle</i>	$\geq 8,0mV$	$\geq 4,0mV$
<i>P-Welle</i>	$\geq 4,0mV$	$\geq 2,0mV$
<i>Sondenimpedanz</i>	300-1800Ω	-

Tabelle 1: Parameter und Ergebnisse von intraoperativen Messungen [modifiziert nach (6)]

1.3.3 Antibradykarde Herzschrittmachertherapie

1.3.3.1 Indikationen

Die Indikationen zur antibradykarden Herzschrittmachertherapie bei persistierender Bradykardie sind Sinusknotenerkrankungen oder atrioventrikulärer (AV) Block. Bei intermittierender Bradykardie ist eine Indikation bei intrinsischer oder extrinsischer EKG (Elektrokardiogramm)-dokumentierter Bradykardie oder bei suspekten, nicht EKG-dokumentierten Bradykardien, wie Schenkelblock, Reflex-Synkope oder ungeklärter Synkope, gegeben (10).

Bei Sinusknotenerkrankung erfolgt die Herzschrittmachertherapie bei symptomatischer Bradykardie und kann bei Symptomen, die wahrscheinlich im Zusammenhang mit einer Bradykardie stehen, angedacht werden. Ein Herzschrittmacher bei AV-Block ist bei AV-Block zweiten Grades Typ 2 (Mobitz) oder dritten Grades, unabhängig vom Auftreten von Symptomen indiziert (10). Über eine Herzschrittmacherimplantation kann ebenfalls bei AV-Block zweiten Grades Typ 1 (Wenkebach) nachgedacht werden, wenn Symptome auftreten oder die Lokalisation des AV-Blocks bei der elektrophysiologischen Untersuchung im His-Bündel oder darunter liegt (10).

1.3.3.2 North American Society of Pacing and Electrophysiology (NASPE)/ British Pacing and Electrophysiology Group (BPEG) Generic Pacemaker Code (NBG-Code)

2001 erschien, herausgegeben von der North American Society of Pacing and Electrophysiology (NASPE) und British Pacing and Electrophysiology Group (BPEG), der neu überarbeitete NASPE/BPEG Generic Pacemaker Code (NBG-Code). Dieser dient der Vereinheitlichung verschiedener Herzschrittmachermodi bezüglich antibradykarder Herzschrittmachertherapie und besteht aus fünf Positionen, welche nachfolgend beschrieben und **Tabelle 2** zu entnehmen sind (11):

Position I beschreibt den Stimulationsort des Herzschrittmachers, der sich entweder an keiner Stelle des Herzens (0), im Atrium (A), Ventrikel (V) oder in Atrium und Ventrikel (D) befindet. *Position II* steht für den Wahrnehmungsort, an dem spontane Depolarisationen oder Interferenzsignale von den Herzschrittmachersonden wahrgenommen werden. Dieser liegt ebenfalls im Atrium (A), Ventrikel (V), Atrium und Ventrikel (D) oder an keiner Stelle des Herzens (0). Die *Herstellerangabe* Single (S) ist sowohl bei Position I als auch bei Position II zu finden und bedeutet, dass das Gerät nur in einem Vorhof oder einer Kammer stimulieren bzw. wahrnehmen kann. *Position III* bezeichnet die Betriebsart eines Herzschrittmachers. Kann der Herzschrittmacher nur mit seinem programmierten Intervall, unabhängig herzeigener Signale, stimulieren, wird dies mit 0 (keine) beschrieben. Bei der Funktion Triggern (T) muss zwischen Einkammer- und Zweikammerschrittmachern unterschieden werden. Einkammerschrittmacher (AAT, VVT) geben bei Betriebsart T einen Stimulus ab, sobald der Schrittmacher bestimmte Signale wahrnimmt. Zweikammerschrittmacher (DDD, VDD) wiederum stimulieren den Ventrikel, wenn ein bestimmtes programmiertes atrioventrikuläres (AV) Intervall nach wahrgenommener Vorhofstimulation überschritten wird. In der Betriebsart Inhibiert (I) stimuliert der Herzschrittmacher dann, wenn eine zu niedrige herzeigene Frequenz vorliegt. Weiters gibt es die Möglichkeit, dass der Herzschrittmacher sowohl Triggert als auch Inhibiert (D). *Position IV* kennzeichnet die Frequenzadaptation. Diese kann vorhanden sein (adaptiv = R) oder fehlen (keine = 0). *Position V* gibt Auskunft darüber, ob der Herzschrittmacher eine multifokale Stimulation in Atrium (A), Ventrikel (V), Atrium und Ventrikel (D) oder keinem der vorher genannten (0) aufweist (11).

Position	I	II	III	IV	V
Bedeutung	Stimulations- ort	Wahrnehmungs- ort	Betriebsart	Frequenz- adaptation	Multifokale Stimulation
	0 = keiner	0 = keiner	0 = keine	0 = keine	0 = keine
	A = Atrium	A = Atrium	T = getriggert	R = adaptiv	A = Atrium
	V = Ventrikel	V = Ventrikel	I = inhibiert		V = Ventrikel
	D = Dual (A+V)	D = Dual (A+V)	D = Dual (T+I)		D = Dual (A+V)
Hersteller- bezeichnung	S = Single (A oder V)	S = Single (A oder V)			

Tabelle 2: NBG-Code [modifiziert nach (11)]

1.3.3.3 Einkammerschrittmacher

Unter diese Kategorie fallen unter anderem VVI und AAI, die Schrittmacherelektroden liegen entweder im rechten Ventrikel (VVI) oder im rechten Vorhof (AAI) (12).

Einkammerschrittmacher werden unter anderem bei persistierendem AV-Block mit Vorhofflimmern eingesetzt (10).

1.3.3.4 Zweikammerschrittmacher

Zu Zweikammerschrittmacher zählen unter anderem DDD und VDD, die Elektroden liegen sowohl im rechten Vorhof als auch im rechten Ventrikel (12). Zweikammerschrittmacher sind erste Wahl bei persistierenden oder intermittierenden Sinusknotenerkrankungen sowie bei intermittierendem AV-Block und persistierendem AV-Block mit oder ohne Sinusknotenerkrankung (10).

1.3.3.5 Dreikammerschrittmacher

Neben einer Sonde im rechten Vorhof und rechten Ventrikel liegt eine dritte Sonde zur Stimulation der lateralen Wand des linken Ventrikels vor. Die Implantation dieser dritten Sonde erfolgt über den Sinus coronarius. Diese multifokale bzw. Dreikammerschrittmacher werden zur kardialen Resynchronisationstherapie (CRT) verwendet (12).

1.3.4 Antitachykarde Systeme – ICD

1.3.4.1 Indikationen

ICDs werden als Sekundärprävention zur Vorbeugung des plötzlichen Herztods bei PatientInnen nach Asystolie oder Kammertachykardie, sowie bei PatientInnen mit erhöhtem Risiko eines plötzlichen Herztods, wenn ungeklärte Synkopen auftreten, die wahrscheinlich auf ventrikuläre Arrhythmien zurückzuführen sind, eingesetzt. Ebenso dienen sie zur Primärprävention eines plötzlichen Herztods bei PatientInnen mit einem erhöhten Risiko für ebendiesen, jedoch ohne bisherige Ereignisse wie Kammertachykardie, Kammerflimmern oder Asystolie (13).

1.3.4.2 North American Society of Pacing and Electrophysiology (NASPE)/ British Pacing and Electrophysiology Group (BPEG) Defibrillator Code (NBD-Code)

Der NBD-Code wurde im Jahr 1993 zur einheitlichen Beschreibung der antitachykarden Schrittmacherfunktion durch ICD veröffentlicht und besteht aus vier Positionen (14):

Position I beschreibt die Schockkammer, die im Atrium (A), Ventrikel (V) oder sowohl im Atrium als auch im Ventrikel (D) liegen kann. Sollte keine Schockprogrammierung vorhanden sein wird sie mit 0 (keine) gekennzeichnet. *Position II* bezeichnet die antitachykarde Stimulationskammer, die Kodierung gleicht jener von Position I. Die Tachykardiedetektion befindet sich an *Position III*. Sie erfolgt entweder durch Messungen eines Elektrogramms (E) oder der Hämodynamik (H). Die hämodynamische Messung kann jedoch nur bei Vorhandensein der Elektrogramm-Messung vorliegen. Somit verfügt jeder ICD über die Tachykardiedetektion durch Elektrogramm. ICDs können zusätzlich über eine antibradykarde Funktion verfügen. Die antibradykarde Stimulationskammer steht an der *Position IV* des NBD-Code und liegt entweder im Atrium (A), Ventrikel (V) oder in Atrium und Ventrikel (D). Bei fehlender antibradykarder Funktion ist dies mit 0 (keine) gekennzeichnet (14) (siehe **Tabelle 3**).

Position	I	II	III	IV
Bedeutung	Schockkammer	Antitachykarde Stimulationskammer	Tachykardie- detektion	Antibradykarde Stimulationskammer
	0 = keine	0 = keine	E = Elektro- gramm	0 = keine
	A = Atrium	A = Atrium	H = Hämodynamik	A = Atrium
	V = Ventrikel	V = Ventrikel		V = Ventrikel
	D = Dual (A+V)	D = Dual (A+V)		D = Dual (A+V)

Tabelle 3: NBD-Code [modifiziert nach (14)]

Auf andere Herzschrittmachersysteme wie Pacer-kardioverter-Defibrillatoren (PCD), eine Kombination aus antitachykardem und antibradykardem Herzschrittmacher, und die kardiale Resynchronisationstherapie (CRT) wird aufgrund fehlender Relevanz für diese Arbeit nicht näher eingegangen.

1.4 Magnetresonanztomographie

1.4.1 Geschichtlicher Überblick

Im Jahr 1976 wurde zum ersten Mal eine Magnetresonanztomographie am Menschen in Form eines Schnittbildes des Fingers angewandt. Diese Aufnahme dauerte 23 Minuten. Ein Jahr darauf erfolgte die Aufnahme des Thorax, welche mehr als vier Stunden in Anspruch nahm (15). 1980 dauerte eine Ganzkörperaufnahme mit Ernst-Technik noch 5 Minuten pro Schicht, 1986 nur mehr 5 Sekunden. Im Jahr 1986 entstanden, nach der Entwicklung der MR-Angiographie durch Haake und Lenz in den Jahren 1984 bis 1987, die ersten Aufnahmen mit Time of flight (TOF) und Phasenkontrastmittel (PC) (15). 1981 wurde das Patent zur Gabe von gadoliniumhaltigem Kontrastmittel, Gadopentat-Dimeglumin (Gd-DPTA), angemeldet. Die ersten schnellen Spinecho-Sequenzen entstanden im Jahr 1990, die erste funktionelle MRT 1991 und die erste interventionelle MRT 1995. 1999 wurden erstmals ultraschnelle Sequenzen verwendet, 2004 begannen klinische Studien zu Positronen-Emissions-Tomographie (PET)/MRT (15). 2008 wurde der erste MR-kompatible Herzschrittmacher vorgestellt (5).

1.4.2 Allgemeine Grundlagen

Die Magnetresonanztomographie dient der Aufnahme von Schnittbildern ohne Röntgenstrahlung. Sie verfügt über den höchsten Weichteilkontrast in der Bildgebung und ist daher besonders geeignet zur Darstellung von Gehirn und Rückenmark sowie Bandscheiben, Muskulatur, Sehnen, Bänder, Knorpel und Knochenmark. Becken und Oberbauchorganen sind ebenfalls gut beurteilbar (16).

Zu den wichtigsten Bestandteilen eines Magnetresonanztomographen gehören supraleitende Magnete, Gradientenspulen, Hochfrequenzspulen und ein Rechnersystem. Gradientenspulen überlagern mit Magnetfeldern geringer Feldstärke das starke äußere Magnetfeld und dienen der Ortskodierung. Hochfrequenzspulen werden, zum Beispiel in Form einer Kopf- oder Oberflächenspule, nahe an den Körper gebracht, nehmen die Signale von Protonen auf und leiten es an das Rechnersystem weiter, wo die Bildrekonstruktion erfolgt (16).

1.4.3 Physikalische Grundlagen und Bilderzeugung

Die Grundlage der Magnetresonanz beruht auf Eigenschaften von Wasserstoffprotonen (H^+). Diese sind Atomkerne mit ungerader Nukleonenzahl und besitzen, wie jedes Proton, einen Eigendrehimpuls (Kernspin). Somit bewegt sich die positive Ladung mit einer bestimmten Geschwindigkeit um die eigene Achse und induziert ein magnetisches Dipolmoment. Diese Magnetfelder sind im menschlichen Körper ungeordnet, in einem starken äußeren Magnetfeld erfolgt jedoch eine parallele oder antiparallele Ausrichtung der Dipole entlang der Feldlinien (16). Durch den Großteil der Protonen, die eine energetisch günstigere Parallelposition einnehmen, entsteht eine Längsmagnetisierung. Der Begriff Präzession beschreibt die Bewegung der Atomkerne mit ungerader Nukleonenzahl um diese Längsachse. Die Präzessionsfrequenz (Lamorfrequenz) bezeichnet die Rotationsgeschwindigkeit bzw. -frequenz der Protonenladung und ist von der Stärke des äußeren Magnetfeldes und einer stoffspezifischen Konstante abhängig. Sie ist für alle Protonen in einem starken Magnetfeld gleich. Dies und die Ausrichtung der Protonen in einem Magnetfeld ermöglichen die Resonanz (16).

Zusätzlich zur zuvor beschriebenen Längsmagnetisierung kommt es zu einer ebenfalls messbaren Quermagnetisierung, welche durch Auslenkung der Längsmagnetisierung um einen bestimmten Winkel in einem starken Magnetfeld entsteht (16).

Ein Hochfrequenz-Impuls sorgt, bei gleichbleibender Präzessionsfrequenz, für die Energieübertragung (Anregung) auf Protonen. Des Weiteren kommt es zu einer Synchronisation der Präzessionsbewegung (16).

Die aufgenommene Energie wird von den Protonen nach Abschalten des Hochfrequenz-Impulses mittels magnetischem Impuls abgegeben, die Protonen kehren zu ihrem Grundzustand zurück (Relaxation). Dabei wird einerseits Energie an die Umgebung abgegeben und die Längsmagnetisierung wieder eingenommen (Längsrelaxation), andererseits kommt es zu einer Desynchronisation der Präzessionsbewegung (Querrelaxation) (16). Gewebespezifische Zeitkonstanten beschreiben diese Relaxationsvorgänge: Die Längsrelaxation wird als T_1 oder Spin-Gitter-Relaxationszeit, die Querrelaxation als T_2 oder Spin-Spin-Relaxationszeit bezeichnet. Die Messung des magnetischen Impulses, der bei der Rückkehr der Protonen in den Grundzustand abgegeben wird, dient nun der Bildgebung (16).

1.4.4 Magnetfeldstärke und Spezifische Absorptionsrate (SAR)

Die SI-Einheit der Magnetfeldstärke ist Tesla (17). Permanentmagnete erreichen eine Magnetfeldstärke von 0,01T bis 0,35T, supraleitende Magnete 0,5T bis 3T. Forschungssysteme mit supraleitenden Magneten haben eine Magnetfeldstärke von 7T oder mehr (18).

Die spezifische Absorptionsrate ist jene Energie, die pro Zeiteinheit und Kilogramm Körpergewicht absorbiert wird. Durch diese Energie kommt es zur Erwärmung des Körpergewebes, wobei zu hohe lokale Energiekonzentration zu Verbrennungen führen kann und die Thermoregulation und das Herz-Kreislaufsystem, durch die Verteilung der Energie über den ganzen Körper, belastet wird (17). Um diese Komplikationen zu vermeiden wurden von der US Food and Drug Administration (FDA) und International Electrotechnical Commission (IEC) Grenzwerte festgelegt (siehe **Tabelle 4**). Die IEC bezieht ihre Grenzwerte auf eine durchschnittliche Untersuchungsdauer von 6 Minuten und unterscheidet zwischen einem normalen Untersuchungslevel und dem *first* und *second level* (19). *Normale Untersuchungslevel* haben einen Grenzwert von 2W/kg für den ganzen Körper und verursachen keine Belastungen für die PatientInnen. Für spezielle MR-Untersuchungen wird der *first level* Modus mit einem Gesamtwert von 4W/kg für den ganzen Körper angewandt. Da dieser Modus die PatientInnen körperlich belasten kann, muss die Untersuchung unter medizinischer Aufsicht erfolgen. Bei *second level* Untersuchungen muss zusätzlich zur medizinischer Aufsicht eine ethische Bewilligung vorliegen, da ein erhebliches Risiko für PatientInnen besteht (20).

Limit	Durchschnittliche SAR bezogen auf ganzen Körper	SAR-Lokalwerte: Kopf, Rumpf	SAR-Lokalwerte: Extremitäten
IEC (6min)			
Normal (alle Patienten)	2 W/kg (0,5°C)	10 W/kg	20 W/kg
First level	4 W/kg (1°C)	10 W/kg	20 W/kg
Second level	4 W/kg (>1°C)	>10 W/kg	>20 W/kg
Lokales Erwärmungslimit	39°C in 10g		40°C in 10g
FDA	4 W/kg in 15min	8 W/kg in 1g in 10min	12 W/kg in 1g in 5min

Table 4: IEC und FDA Richtlinien des SAR-Wertes und Körpererwärmung bei einer MR-Untersuchung [modifiziert nach (19)]

1.4.5 Wichtige technische Begriffe

Mit dieser Arbeit in Zusammenhang stehende und für das Verständnis wichtige technische Begriffe sind Akquisitionszeit (TA), Bildfeld (FoV), Pixel, Fensterung, Schicht und Schichtdicke (TH), Flipwinkel und Inversionszeit (TI) (17).

Die Akquisitionszeit (TA) beschreibt die Zeit der Messung eines gesamten Datensatzes. Das Bildfeld, field of view (FoV), gibt den zu messenden Ausschnitt einer Schicht an. Pixel sind die kleinsten Bildelemente des MR-Bildes, besitzen bestimmte Grauwerte und bilden somit eine Grauwertmatrix, welche eine bildliche Darstellung ermöglicht. Mit Hilfe der Fensterung können Helligkeit und Kontrast eines MR-Bildes eingestellt werden (17). Eine Schicht ist durch Schichtposition, FoV und Schichtdicke definiert. Aus der Mittelebene einer Schicht resultiert die Bildebene. Der Flipwinkel beschreibt die Auslenkung der Magnetisierung von der Längsrichtung und beträgt häufig 90° oder 180° . Die Inversionszeit (TI) wird bei der Inversion-Recovery-Sequenz benötigt und gibt das Intervall zwischen einem 180° Inversionspuls und einem 90° Anregungspuls an (17).

Bei der MR-Bildgebung gelten die drei Grundebenen sagittal (sag.), transversal/axial (tra.) und koronar (cor.) als Basisorientierung. Dreht man eine dieser Schichten kann man schräge oder doppeltschräge Schichten erhalten (17).

1.4.6 Bildkontrast

Der Bildkontrast wird durch Sequenzparameter, Gewebeparameter und Sequenztyp bestimmt. Zu *Sequenzparameter* zählen die Repetitionszeit (TR), welche die Zeit zwischen Impulsen beschreibt, und die Echozeit (TE), die die Zeit zwischen Anregung und Signalaufnahme angibt (16). *Gewebeparameter* setzen sich aus den Zeitkonstanten der Relaxation, T_1 und T_2 , sowie der Protonendichte (PD) zusammen. Sie sind ausschlaggebender Faktor des Bildkontrastes und bestimmen die Gewichtung einer Sequenz (16). In einer T_1 -gewichteten Sequenz erscheint etwa Fett aufgrund einer kurzen Längsrelaxation hell (hyperintens), Muskulatur wegen einer langen Längsrelaxation dunkel (hypointens). Diese Sequenz beinhaltet eine kurze Repetitions- und Echozeit. In T_2 -gewichteten Sequenzen ist dies genau umgekehrt. Eine lange Querrelaxation erscheint hell (z.B. Wasser), eine kurze Querrelaxation dunkel (z.B. Muskulatur). Repetitions- und Echozeit sind länger als T_1 -gewichtete Sequenzen (16). Weiters gibt es eine *PD-Gewichtung*, bestehend aus einer langen TR und kurzen TE. Hell dargestellt sind hier Gewebe mit hoher Protonendichte, wie Wasser und Bindegewebe, dunkel imponiert Gewebe mit geringer Protonendichte (z.B. Knochen, Luft) (16).

1.4.7 Sequenzen

1.4.7.1 Spinecho- und Gradientenecho-Sequenzen

Die häufigste Form der Pulssequenz basiert auf der Wahrnehmung von Spinecho (SE) (21). Ein Spinecho entsteht durch einen („Single-echo Spinecho“) oder mehrere („Multi-echo Spinecho“) 180° Inversionspulse, die abgegeben werden, um die Quermagnetisierung neu auszurichten. Single-echo Spinecho Sequenzen werden vor allem für T_1 -gewichtete Sequenzen verwendet (21). Eine schnellere Variante der Spinecho-Sequenzen sind Turbo Spinecho (TSE) Sequenzen (22).

Gradientenecho (GRE)-Sequenzen haben eine kürzere Echozeit als Spinecho-Sequenzen, da nur ein Inversionspuls und geringere Flipwinkel verwendet werden (22).

1.4.7.2 Inversion-Recovery-Sequenzen

Inversion-Recovery-Sequenzen werden von Spinecho-Sequenzen abgeleitet. Hier wird vor dem Anregungspuls ein 180° Inversionspuls abgegeben um die Nettomagnetisierung umzukehren. Verwendung finden diese Sequenzen vor allem zur Signalunterdrückung von Geweben, wobei hier speziell die short inversion time inversion recovery (STIR) Sequenz für Fettgewebe und die fluid-attenuated inversion recovery (FLAIR) Sequenz für Rückenmarksflüssigkeit angewandt werden (21).

1.4.7.3 Echo-planar Imaging (EPI)

EPI-Sequenzen benötigen nur einen einzigen Anregungspuls, was zu einer deutlichen Reduktion der Akquisitionszeit führt. EPI wird sowohl mit Spinecho- als auch mit Gradientenecho-Sequenzen durchgeführt. Sie ist heutzutage die bevorzugte Technik diffusionsgewichteter Bildgebung und wird auch zur Beurteilung der zerebralen Durchblutung verwendet (23).

1.4.7.4 Diffusionsgewichtete Bildgebung

Die diffusionsgewichtete Bildgebung kann sowohl mit EPI- als auch mit GRE-Sequenzen durchgeführt werden und entsteht durch Verwendung zweier gleichwertiger Gradientenpulse. Sie ermöglicht es eingeschränkte und uneingeschränkte Diffusion von Protonen zu differenzieren und wird vor allem zur Diagnostik eines vor kurzem aufgetretenen Schlaganfalls eingesetzt. Üblicherweise wird die apparent diffusion coefficient (ADC) Bildtechnik gemeinsam mit der diffusionsgewichteten Bildgebung angewandt (23).

1.4.7.5 MR-Angiographie

Die MR-Angiographie nützt den Blutfluss zur Visualisierung des MR-Signals. Sowohl arterielles als auch venöses Blut kann verwendet werden. Je nach Flussgeschwindigkeit und Volumen werden 2D oder 3D Gradientenechotechniken angewandt (21). Die häufigsten MR-Angiographietechniken sind time of flight (TOF) Bildgebung, multiple overlapping thin-slab acquisitions (MOTSA), Phasenkontrast (PC) Bildgebung und die kontrastmittelverstärkte MR-Angiographie (23).

TOF verwendet eine kurze Relaxationszeit und große Flipwinkel. So bekommt das fließende Blut eine höhere Signalintensität als das unbewegte Gewebe (21). *MOTSA* kombiniert die 2D und 3D Technik der TOF, wobei eine dünnere Schicht als bei 3D Techniken der TOF verwendet werden (23). Die *Phasenkontrast* MR-Angiographie ist eine Subtraktionstechnik, bei der zwei Messungen durchgeführt werden: Die erste Flussmessung in eine bestimmte Richtung und eine zweite Flussmessung in die der ersten Flussmessung entgegengesetzte Richtung. Die *kontrastmittelverstärkte* MR-Angiographie verstärkt die Signalintensität von T₁-gewichteten Sequenzen. Typischerweise werden Kontrastmittel verwendet, die auf Gadolinium basieren (23) (siehe **1.4.9**).

Die Funktion zur Berechnung von angiographieähnlichen Gefäßbildern aus allen Einzelbildern eines Untersuchungsvolumens wird maximum intensity Projektion (MIP) genannt (16).

Die in **Kapitel 1.4.5** und **1.4.7** genannten Begriffe und Abkürzungen beziehen sich ausschließlich auf Siemens® MAGNETOM® MRI Systeme, da nur diese Geräte am Universitätsklinikum Graz eingesetzt werden und somit Relevanz für diese Arbeit haben.

1.4.8 Bildqualität und Artefakte

Die Bildqualität einer MR-Untersuchung ist von Signal, Kontrast, Rauschen, räumlicher Auflösung und Artefakten abhängig (24).

Artefakte eines MR-Bildes können sowohl durch die Hardware des MR-Gerätes, als auch durch Interaktion zwischen PatientIn und Hardware bedingt sein. Die Bezeichnung der Artefakte ist je nach Literatur unterschiedlich. Einige wichtige Artefakte sind Bewegungsartefakte, Einfaltungsartefakte, Kantenartefakte („Gibbs-Phänemon“) und Chemical-shift Artefakte (25).

Bewegungsartefakte (Geisterartefakte) werden zum Beispiel durch Atmung, Herzbewegungen, Liquor- und Blutfluss oder Bewegungen des Patienten ausgelöst (siehe **Abbildung 3**). Diese können z.B. mittels Immobilisation von PatientInnen, Medikamenten zur Verlangsamung der Darmperistaltik, Optimierung der Bild-Sättigung oder durch rasche MR-Aufnahmen mit Hilfe von Echo Planar Imaging (EPI) Sequenzen vermindert werden (25). Bei *Einfaltungsartefakten* werden anatomische Strukturen, die eigentlich außerhalb des Bildfeldes (FoV) liegen, am anderen Ende der Aufnahme abgebildet. Durch Verkleinern des field of view können diese verhindert werden (25). *Kantenartefakte* bzw. Gibbs-Phänomene entstehen an Hochkontrastgrenzen und äußern sich durch mehrere, in ihrer Breite variierende, schwarze Linien („ringing“). *Chemical-shift* Artefakte treten an Grenzflächen zwischen Fett und Wasser, besonders in von Fettgewebe umgebenen flüssigkeitsgefüllten Strukturen, auf. Sie zeigen sich als schwarze oder breite Streifen, die in T2-gewichteten Bildern imposanter wirken (25).

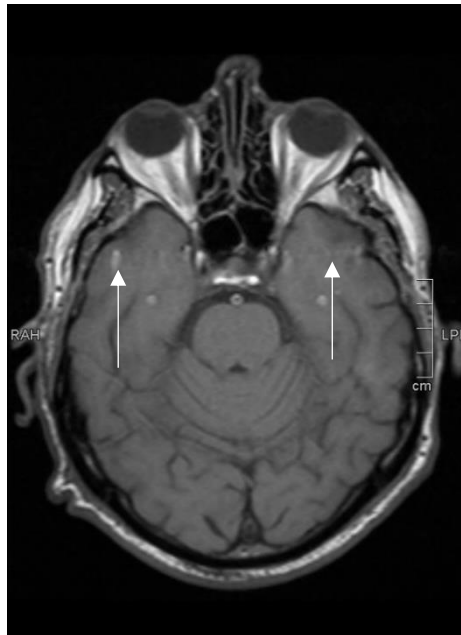


Abbildung 3: Bewegungsartefakt durch Pulsation der *A. carotis* in einer transversalen T_1 -gewichteten Spinecho-Sequenz

1.4.9 Kontrastmittel

Kontrastmittel können in zwei Kategorien eingeteilt werden: Zum einen gibt es paramagnetische Verbindungen, die vor allem die Längsrelaxation T_1 vermindern und zu einer Aufhellung bzw. Signalverstärkung führen, zum anderen super-paramagnetische Verbindungen, die die Querrelaxation T_2 beeinflussen (26).

Kontrastmittel der Längsrelaxation sind Gadolinium (Gd) und Mangan (Mn). Durch ihre Bindung an Diethylentriaminpentaessigsäure (DTPA) entsteht ein Chelatkomplex, der für den menschlichen Körper weniger toxisch ist. Super-paramagnetische Kontrastmittel bestehen entweder aus Eisenoxid oder einem Eisen-Mangan-Gemisch (26).

1.4.10 Kontraindikationen der Magnetresonanztomographie

Absolute Kontraindikationen für eine MR-Untersuchung sind Herzschrittmacher und ICDs, Cochleaimplantate, Neurostimulatoren bzw. andere bioelektrische Implantate und spezielle Implantate wie etwa bestimmte Penisprothesen (27). *Relative* Kontraindikationen sind individuell, zum Beispiel auf MR-Kompatibilität, zu klären und beinhalten Metallsplitter- oder Schussverletzungen, zerebrale Aneurysmaclips die nicht aus Titan oder Tantal gefertigt sind, intrakorporale Pumpen, künstliche Herzklappen, Metallgitterstents, Hautklammern, Endoprothesen und Osteosynthesematerial, sowie Schwangerschaft (27).

1.5 Magnetresonanz bei konventionellen und MR-kompatiblen CIEDs

1.5.1 Risiko und Komplikationen von MR-Untersuchungen bei konventionellen CIED PatientInnen

Lange Zeit waren CIEDs eine Kontraindikation für MR-Untersuchungen. Das starke statische Magnetfeld und die Hochfrequenzfelder für die Bildentstehung können die Schrittmacherfunktion beeinträchtigen und den PatientInnen während der MR-Untersuchung Schaden zuführen. Einige TrägerInnen eines CIEDs starben auf Grund ihrer MR-Untersuchung (28).

Das Risiko einer MR-Untersuchung bei konventionellen HerzschrittmacherpatientInnen liegt vor allem im statischen Magnetfeld, den Gradientenmagnetfeldern, der Hochfrequenzenergie und kombinierter Feldeffekte (28):

Das *statische Magnetfeld* eines in der Klinik verwendeten Magnetresonanztomographen beträgt üblicherweise 1,5T oder 3T, etwa die 30 000 bis 60 000-fache Stärke des Erdmagnetfeldes. Das größte Problem hierbei liegt in der Anziehungskraft von ferromagnetischen Gegenständen des MR-Gerätes, die Bewegung, Drehung und Dislokation verursachen, und einen Geschoss-artigen Effekt auslösen kann. Dies führt zu Verletzungen des/der Patienten/Patientin und/oder zu einer Zerstörung des Magnetresonanztomographen (5). Ebenso besteht die Möglichkeit, dass es bei Herzschrittmachern, die einen Reed-Kontakt beinhalten, zu unvorhersehbaren unregelmäßigen Schaltungen kommt, die zu asynchronen Impulsen des Schrittmachers führen. Auf Grund der Eisenvorkommen im menschlichen Blut, kann es bei einem starken äußeren Magnetfeld zu Spannungen kommen, die im EKG des/der Patienten/Patientin übereinandergelagert werden und lebensgefährliche Arrhythmien, T-Wellen Abweichungen und ST-Hebungen simulieren können. Dies wiederum kann fälschlicherweise die Schrittmacherfunktion inhibieren (5).

Gradientenmagnetfelder werden während einer MR-Untersuchungen mehrere Male und sehr schnell ein- und ausgeschaltet. Diese raschen Magnetfeldänderungen verursachen möglicherweise elektrische Spannung in den Herzschrittmacherelektroden, was zu oversensing und undersensing sowie zu lebensgefährlichen Arrhythmien führen kann (5).

Die *Hochfrequenzenergie* wird teilweise vom Körper absorbiert, wodurch es zur Erwärmung des Körpergewebes kommt. Herzschrittmacherelektroden können als „Antennen“ fungieren, diese Energie konzentrieren und somit Hitze und elektrische Ströme produzieren (5). Daraufhin würde eventuell Herzgewebe an der Elektrodenspitze zerstört, das Myokard stimuliert und möglicherweise lebensgefährliche Arrhythmien ausgelöst, und der Schaltkreis bzw. die Batterie zerstört werden. Durch die Zerstörung von Schaltkreis und/oder Batterie könnten wiederum die Schrittmacherfunktion zurückgesetzt, die Batterie entleert und negative Effekte bezüglich der Schrittmacherwahrnehmung, Stimulationsschwelle und Impedanz entstehen, was wiederum fälschlicherweise eine Schrittmacherstimulation oder -inhibierung auslösen könnte (5). *Kombinierte Feldeffekte* verursachen unter anderem Ausfälle von Systembestandteilen, mechanische Vibrationen und Geräteschäden (3).

1.5.2 Ablauf und Besonderheiten der MR-Untersuchung bei konventionellen Herzschrittmacher

Vor der Durchführung einer MR-Untersuchung bei konventionellen HerzschrittmacherpatientInnen, muss das Risiko-Nutzen-Verhältnis von Fall zu Fall durch den zuweisenden Arzt, Kardiologen und Radiologen beurteilt werden. Ebenso sollten die PatientInnen genau über das Risiko und Prozedere der MR-Untersuchung aufgeklärt werden (29). Die kontinuierliche pulsoximetrische Überwachung beginnt mit Eintritt in den MR-Untersuchungsraum und ist zwingend notwendig. Auf eine Überwachung mittels EKG kann verzichtet werden, da durch die Gradientenfelder und der Hochfrequenzpulse Artefakte im EKG entstehen (29). Während der Untersuchung muss eine ständige verbale Kommunikation und Sichtkontakt mit den PatientInnen bestehen. Der/die PatientIn muss darauf hingewiesen werden, Symptome wie Herzklopfen, Schwindel, Wärmeempfinden oder Bewegungen in der Herzschrittmachertasche sofort an die Untersuchenden zu melden (29). Die MR-Untersuchung sollte wegen der Sicherheitsgründe im Beisein eines Kardiologen erfolgen. Der Ganzkörper-SAR-Wert einer MR-Untersuchung bei konventionellen HerzschrittmacherpatientInnen darf einen Wert von 2W/kg nicht

überschreiten, der Grenzwert für ein Schädel-MR liegt bei 3,2W/kg. Eine maximale Untersuchungsdauer von 30 Minuten wird empfohlen (29).

Unmittelbar vor der Untersuchung erfolgt eine Umprogrammierung des Herzschrittmachers. Bei herzschrirrmacherabhängigen PatientInnen wird die Wahrnehmungsfunktion deaktiviert und ein asynchroner Modus (z.B. V00) programmiert. Ist dieser asynchrone Modus programmiert (V00, D00), so wird die Frequenz typischerweise auf 90min^{-1} fixiert, was üblicherweise einer Erhöhung des/der individuell eingestellten „Ruhepulses“/Grundfrequenz entspricht (29). PatientInnen die nicht ständig auf die Herzschrittmacherfunktion angewiesen sind, werden entweder auf einen reinen Wahrnehmungsmodus eingestellt oder der Schrittmacher wird komplett deaktiviert. In beiden Gruppen sollten zusätzlich noch der Stimulationspuls erhöht, die Schrittmacherelektroden bipolar programmiert und alle zusätzlichen Stimulationsfunktionen deaktiviert werden (29). Im Anschluss an die Untersuchung erfolgt die Wiederherstellung der ursprünglichen Herzschrittmacherfunktion. Weiters sollte bei konventionellen Herzschrittmachern eine Nachuntersuchung der Schrittmacherfunktion nach drei Monaten erfolgen (29).

1.5.3 „Safe by design“

Die American Society of Testing Materials (ASTM) unterscheidet bei Geräten zwischen MRI Safe, MRI Conditional und MRI Unsafe (30). *MRI Safe* bedeutet, das Gerät besteht aus keinerlei metallischem und leitendem Material und ist sicher für die Durchführung einer MR-Untersuchung. Einen solchen Herzschrittmacher herzustellen ist jedoch nicht möglich. *MRI Conditional* kennzeichnet ein Gerät, welches unter Einhaltung bestimmter Vorschriften gebrauchssicher in Bezug auf MR-Untersuchungen ist (30). *MRI Unsafe* besagt, das Gerät ist unter keinen Umständen MR-tauglich (4).

Um den Zugang von CIED-TrägerInnen zu MR-Untersuchungen zu ermöglichen wurden einige technische Änderungen durchgeführt (5):

Der ferromagnetische Inhalt des Schrittmachersystems wurde reduziert um die magnetische Anziehungskraft zu vermindern. Nun kommen hauptsächlich nicht-ferromagnetische Materialien zum Einsatz, die als Leiter geeignet, langlebig und körperverträglich sind. Die Elektroden werden aus nicht-magnetischem Material gefertigt (5). Der früher zur Umprogrammierung verwendete Reed-Kontakt wurde durch Hallensoren ersetzt. Das Verhalten dieser Sensoren in einem Magnetfeld ist leichter vorhersehbar als jenes des Reed-Kontaktes. Um die Erwärmung und die Erzeugung elektrischer Ströme zu reduzieren kam es zu einer Veränderung der Elektrodengeometrie, in dem das Spulenmuster der Filamente der inneren Elektrodenspule verändert wurde. Dadurch konnte auch die Weiterleitung der Energie über die Filamente vermindert werden (5). Bipolares Elektrodendesign und das Beschichten von Elektrodenspitzen wurden zur Reduktion elektromagnetischer Störungen eingesetzt. Das Risiko für Beschädigungen der Energieversorgung und des Schaltkreises wurde durch spezielle Filter, welche die Übertragung bestimmter Frequenzen und den Energieverlust beschränken, minimiert (5). In MR-kompatiblen Herzschrittmachern wurde zusätzlich ein „MRI-mode“ installiert, der vor der MR-Untersuchung ein- und unmittelbar nach der Untersuchung ausgeschaltet werden muss. Mit dieser Programmierung wird die Entscheidungsfindung zwischen asynchronem und nicht-stimulierendem Modus während einer MR-Untersuchung unterstützt. Weiters werden mit Hilfe dieses Modus während der MR-Untersuchung

obligatorische Überprüfungen der Systemsicherheit durchgeführt und gesteigerte Stimulationsimpulse abgegeben (5).

1.5.4 Allgemeines zu MR-kompatiblen Herzschrittmachern und ICDs

Die Firma Medtronic® stellte im Jahr 2008 den ersten MR-kompatiblen Herzschrittmacher vor (5), im November 2011 wurde der erste ICD für ein 1,5T Gerät als MR-kompatibel gekennzeichnet (4). Neben Medtronic® stellen auch die Firmen St. Jude Medical®, Boston Scientific®, Biotronik® und die Sorin Group® MR-kompatible CIEDs her (5).

1.5.5 Ablauf und Besonderheiten der MR-Untersuchung bei MR-kompatiblen Herzschrittmacher

Sowohl kardiologische als auch radiologische Bedingungen müssen vor der MR-Untersuchung überprüft und der/die PatientIn über das Risiko der Untersuchung aufgeklärt werden (29). Zu überprüfen sind unter anderem MR-Kompatibilität und Funktionsfähigkeit von Herzschrittmachergerät und -elektroden, Implantationsseite des Schrittmachersystems, Durchführung der Implantation vor über sechs Wochen, Reizschwelle und Batterieladestand sowie Herstellerangaben von Feldstärke, Gradientensystem, Zulassung für Ganzkörper-MR-Untersuchungen oder nur für MR-Untersuchungen bestimmter Körperteile und Ausschluss anderer Implantate (29).

Alle Herzschrittmachergeräte sind für eine Feldstärke von 1,5T zugelassen, einige Geräte von Biotronik® und Boston Scientific® können auch bei einer Feldstärke von 3T verwendet werden. Die meisten Geräte dürfen einer maximalen Anstiegsgeschwindigkeit der Gradientenfelder von 200T/m/s pro Achse ausgesetzt werden. Bei einigen Geräten der Firma Biotronik® liegt die Grenze bei 125T/m/s pro Achse (29). Für eine Ganzkörper-MR-Untersuchung sind Herzschrittmacher der Firmen Medtronic® und Boston Scientific® geeignet. Biotronik® und St. Jude Medical® produzieren zusätzlich zu Geräten, die für Ganzkörperuntersuchungen verwendet werden können, Herzschrittmacher, die nur für MR-

Untersuchungen in bestimmten Körperregionen zugelassen sind. Geräte der Firma Sorin Group® sind nur für MR-Untersuchungen bestimmter Körperregionen geeignet (29).

Unmittelbar vor der MR-Untersuchung erfolgt eine Umprogrammierung des Schrittmachersystems in den „MRI-protection Mode“. Dieser ist in den Software-Optionen des Herzschrittmachers gespeichert und ermöglicht die einzelnen Umprogrammierungen, die vor einer MR-Untersuchung bei konventionellen Herzschrittmacher nötig sind (siehe **1.5.2**), in einem Schritt (29). Nach der Untersuchung findet die Rückprogrammierung der ursprünglichen Schrittmacherfunktion statt. Auf eine Nachuntersuchung der Schrittmacherfunktion nach drei Monaten kann verzichtet werden (29).

Die Hersteller MR-kompatibler Herzschrittmacher schreiben eine Überwachung des/der Patienten/Patientin während der MR-Untersuchung mittels Pulsoximeter, EKG oder Blutdruckmessung vor, wobei die pulsoximetrische Überwachung empfohlen wird (siehe **1.5.2**). Ein Kardiologe muss während der MR-Untersuchung nicht anwesend sein (29). Die MR-Untersuchung darf nur im normalen Untersuchungslevel mit einem maximalen SAR-Wert von üblicherweise 2W/kg durchgeführt werden. Einige Herzschrittmachersysteme von Biotronik®, Boston Scientific® und St. Jude Medical® sind für einen maximalen SAR-Wert von 4 W/kg zugelassen. In beiden Fällen darf jedoch ein SAR-Wert von 3,2W/kg bei einem Schädel-MR nicht überschritten werden (29) (siehe **Abbildung 4**).

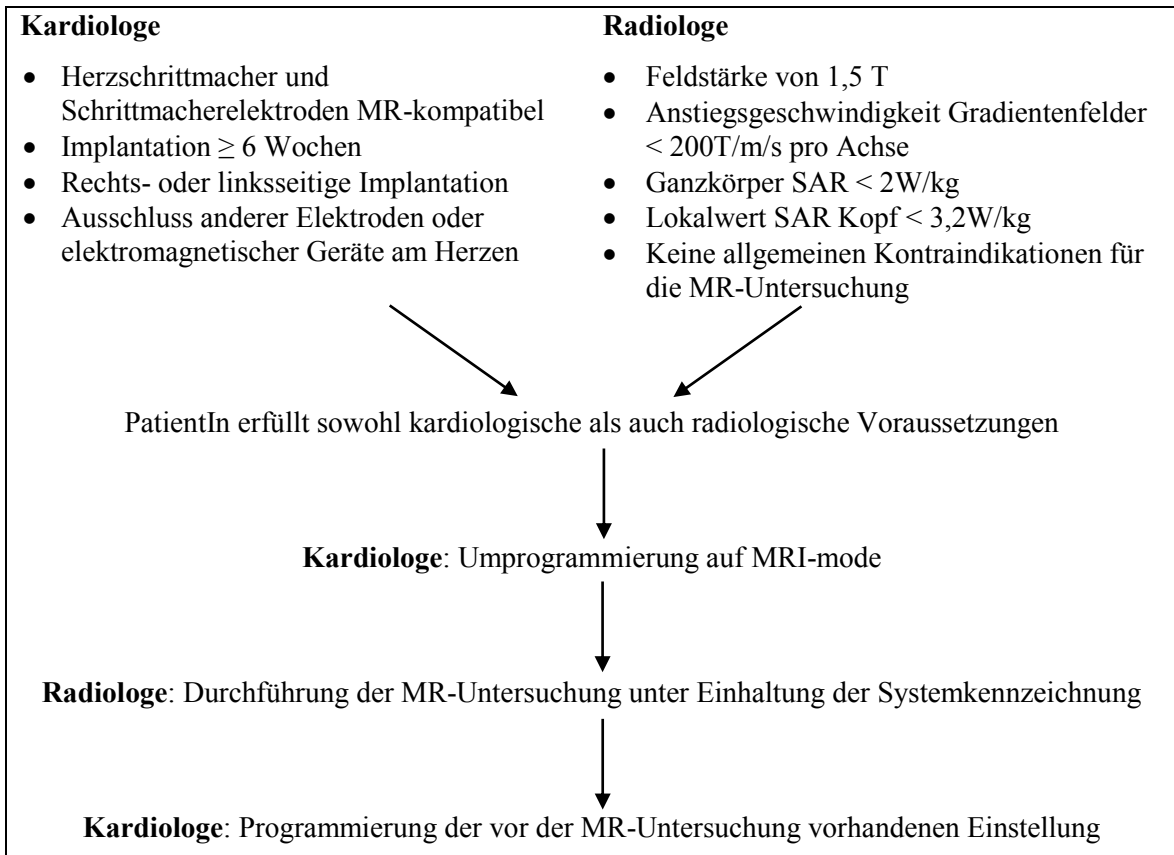


Abbildung 4: Voraussetzungen und Arbeitsablauf vor Durchführung einer MR-Untersuchung bei PatientInnen mit MR-kompatiblen Herzschrittmacher [modifiziert nach (36)]

2 MATERIAL UND METHODEN

2.1 Studiendesign

Hierbei handelt es sich um eine monozentrische, retrospektive Kohortenstudie anhand von Daten aus PatientInnenakten und eine schriftliche, versandte Fragebogenuntersuchung. Für diese Studie lag ein positives Ethikkommissionsvotum der Medizinischen Universität Graz vor. Alle personenbezogenen Daten und das Bildmaterial wurden anonymisiert.

2.2 Deskriptive Statistik

In diese Studie wurden all jene PatientInnen eingeschlossen, bei denen im Zeitraum von 01.09.2011 bis 30.06.2015 eine MR-Untersuchung an der Klinischen Abteilung für Radiologie am Universitätsklinikum Graz durchgeführt wurde. Einschlusskriterium war ein bereits implantiertes MR-taugliches Herzschrittmacher- oder ICD-System. Das Kollektiv wurde unabhängig von Alter, Geschlecht oder Begleiterkrankungen gewählt.

2.2.1 PatientInnenkollektiv

Eine vorgefertigte Liste mit dem in **Kapitel 2.2** angeführten Einschlusskriterium beinhaltete 40 MR-Untersuchungen von 39 PatientInnen, da ein/e PatientIn an zwei unterschiedlichen Zeitpunkten eine MR-Untersuchung hatte. Somit ergab sich ein Kollektiv von 39 PatientInnen und 40 MR-Untersuchungen. Die statistischen Auswertungen von Geschlechterverteilung, Altersverteilung bei Herzschrittmacherimplantation, Indikationen zur Herzschrittmachertherapie, Herzschrittmacher-Modi, Herzschrittmacherinfektion, Herstellerfirmen und ihre Modelle sowie Lage der Schrittmachertasche wurden mit einem PatientInnenkollektiv von 39 durchgeführt. Alle übrigen statistischen Auswertungen beliefen sich auf ein Kollektiv von 40 MR-Untersuchungen.

2.2.2 Herzschrittmacher

Die Erhebung der PatientInnen Daten sowie der Parameter der MR-kompatiblen Herzschrittmacher erfolgte mittels des Krankenhausinformationssystems openMedocs (KAGES – Studentenzugang). Hieraus konnten, soweit vorhanden, folgende PatientInnenparameter erhoben werden: Geburtsdatum, Größe, Gewicht, Herzschrittmacherindikation, Implantationsdatum des Herzschrittmachers, Typ, Firma, Seriennummern und Sondentypen von Vorhof- und/oder Ventrikelsonden, Datum der MR-Untersuchung. Informationen über Sondenimpedanz und Reizschwelle von Vorhof und/oder Ventrikel, P-Welle, R-Welle und Batteriestatus wurden zu zwei Zeitpunkten erhoben: einerseits von der erstmaligen Funktionsüberprüfung nach der Schrittmacherimplantation (Zeitpunkt A), andererseits vom ersten Kontrolltermin nach der MR-Untersuchung (Zeitpunkt B).

Bei einem Patienten fehlten Daten des Herzschrittmachers, wie Herzschrittmacherindikation, Typ, Firma, Seriennummer und Sondentyp von Vorhof- und/oder Ventrikelsonden und Lage des Herzschrittmachers. Dies wurde in der statistischen Auswertung der Kapitel 3.1.2.1, 3.1.2.2, 3.1.2.4, 3.1.2.9 und 3.1.3.1 als „keine Angabe“ vermerkt. Weiters wurde die statistische Auswertung der Sondenimpedanz, Reizschwelle, P-Welle, R-Welle des Batteriestatus und der Lage der Schrittmachertasche aufgrund der fehlenden Daten ohne diesen Patienten durchgeführt.

2.2.3 MR: Datenauswertung und Bildbefundung

Die Daten der MR-Untersuchung wurden ebenfalls aus dem Krankenhausinformationssystem openMedocs erhoben. Hierzu zählten MR-Datum, MR-Indikation, MR-Untersuchungsfeld und Besonderheiten während der MR-Untersuchung.

Die MR-Bildserien mit der jeweiligen Schichtdicke (TH), der spezifischen Absorptionsrate (SAR) und die Akquisitionszeit (TA) sowie erstes und letztes Bild der Untersuchung, Magnetfeld und Art und Dosis des Kontrastmittels wurden mittels Syngo.plaza von Siemens® (Windowseinstieg – Student) erhoben. Dazu musste die Funktion DICOM (Digital Imaging and Communication in Medicine) - Daten aufgerufen werden. Zusätzlich wurden die Bilderserien auf Artefakte durch den MR-kompatiblen Herzschrittmacher überprüft.

Schichtdicke, Dauer und erstes bzw. letztes Bild einer Serie konnten nur über Syngo.plaza ermittelt werden. Alle anderen zuvor aufgeführten Daten waren auch über das Krankenhausinformationssystem aufrufbar. Hierfür musste das Bildarchivierungs- und Kommunikationssystem (PACS) aufgerufen werden, danach konnte man für jede Bildserie über die Funktion ACR/NEMA Dump auf jene Daten zugreifen.

In die Datensammlung wurden sowohl die aufgenommenen Bilderserien, als auch errechnete Bilder und Rekonstruktionen miteinbezogen. Die jeweilige Bezeichnung der Serie wurde in die Microsoft® Office Excel Tabelle übernommen.

Ein Patient lehnte die MR-Untersuchung ab, da er keine klinische Relevanz darin sah. Daher wurde die statistische Auswertung der Kapitel 3.1.3.5, 3.1.3.6, 3.1.3.7 ohne diesen Patienten durchgeführt.

Bei einem anderen Patienten wurde die MR-Untersuchung auf Wunsch des Patienten und wegen des schlechten Allgemeinzustandes nach Durchführung weniger Sequenzen beendet.

2.2.4 Fragebogenauswertung

Die Fragebogenuntersuchung wurde von der Ethikkommission der Medizinischen Universität Graz bewilligt. Die Fragebögen setzten sich aus dem Duke-Aktivitätsindex und einer Befragung zu Lebensqualität mit Herzschrittmacher und MR-Untersuchung zusammen. Sie wurden gemeinsam mit einer PatientInneninformation und Einwilligungserklärung sowie einem frankierten Kuvert mit der Adresse der Klinischen Abteilung für Herzchirurgie des Universitätsklinikum Graz an 35 der 39 PatientInnen verschickt, da vier der 39 PatientInnen zum Zeitpunkt der Fragebogenuntersuchung bereits verstorben waren. Die Suche der Adressen erfolgte mittels Krankenhausinformationssystem openMedocs.

23 Fragebögen wurden von den PatientInnen ausgefüllt und zurückgesendet, zwei Fragebögen kamen ungeöffnet retour, da eine Patientin verstorben und bei einem Patienten die Adresse amtlich unbenannt war.

2.2.4.1 Duke Aktivitätsindex

Zur Auswertung des Duke Aktivitätsindex (DASI) wurde pro angekreuztem „Ja“ eine bestimmte Anzahl von Punkten vergeben (31). Der Fragebogen zum Duke Aktivitätsindex dieser Studie wurde ohne die Frage „Können Sie eine sexuelle Beziehung haben?“ versandt. Anhand der beantworteten Fragen der körperlichen Leistungsfähigkeit und der Einschätzung der PatientInnen wurde diese Frage bei der statistischen Auswertung ergänzt und in die Beurteilung miteinbezogen. Aus der Summe dieser Punkte wurde zuerst die maximale Sauerstoffaufnahme mit der Formel $VO_2peak = 0,43 * DASI + 9,6$ und danach die metabolischen Äquivalente (MET) mit der Formel $\frac{VO_2peak}{3,5}$ berechnet (31).

Abschließend wurden die berechneten metabolischen Äquivalente in „geringe“ (MET < 4) oder „moderate oder exzellente“ (MET > 4) körperliche Leistungsfähigkeit eingeteilt (32).

2.2.4.2 MR-Untersuchung, Lebensqualität

Bei der Befragung zu „MR-Untersuchung, Lebensqualität“ wurde jede angekreuzte Beschwerde der Frage 1 „Während der MR-Untersuchung verspürte ich:“ mit einem Punkt bewertet. Somit ergab sich eine unterschiedliche Anzahl an aufgetretenen Beschwerden.

2.3 Statistische Auswertung

Die deskriptive statistische Auswertung umfasste die Berechnung von Mittelwert, Median, Standardabweichung, Minimum, Maximum sowie absolute und relative Häufigkeit mit Microsoft® Office Excel 2016 (Redmond, Washington, USA). Die Präsentation der Ergebnisse erfolgte zusätzlich in Diagrammen und Tabellen.

Eine Mehrfachprüfung der Daten bezüglich Vollständigkeit und Richtigkeit wurde zur Qualitätssicherung durchgeführt.

3 ERGEBNISSE

3.1 Deskriptive Statistik

3.1.1 PatientInnenkollektiv

3.1.1.1 Geschlechterverteilung

Das PatientInnenkollektiv (n=39) setzte sich aus 10 Patientinnen (25,64%) und 29 Patienten (74,36%) zusammen (siehe **Abbildung 5**).

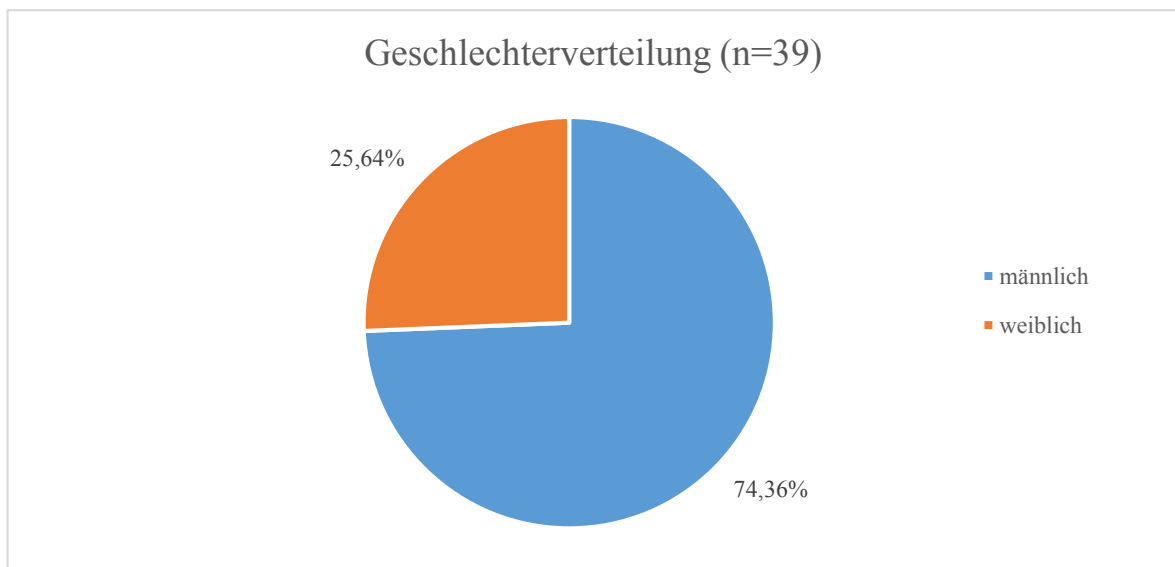


Abbildung 5: Geschlechterverteilung

3.1.1.2 Altersverteilung

Das Alter der PatientInnen (n=39) lag zum *Zeitpunkt der Herzschrittmacherimplantation* zwischen 28 und 87 Jahren. Daraus ergaben sich ein Median von 65 Jahren und ein arithmetisches Mittel und eine Standardabweichung von $60,25 \pm 18,21$ Jahren. Am häufigsten (10 Implantationen $\cong 25,64\%$) wurde eine Herzschrittmacherimplantation im Alter von 70 bis 79 Jahren durchgeführt (siehe **Abbildung 6**).

Zum *Zeitpunkt der MR-Untersuchungen* waren die PatientInnen 30 bis 87 Jahre alt. Der Median betrug 66,50 Jahre, das arithmetische Mittel und die Standardabweichung $63,10 \pm 15,30$ Jahre. Hier war ebenfalls die Gruppe der 70- bis 79-jährigen mit 11 MR-Untersuchungen (27,50%) am häufigsten vertreten (siehe **Abbildung 7**).

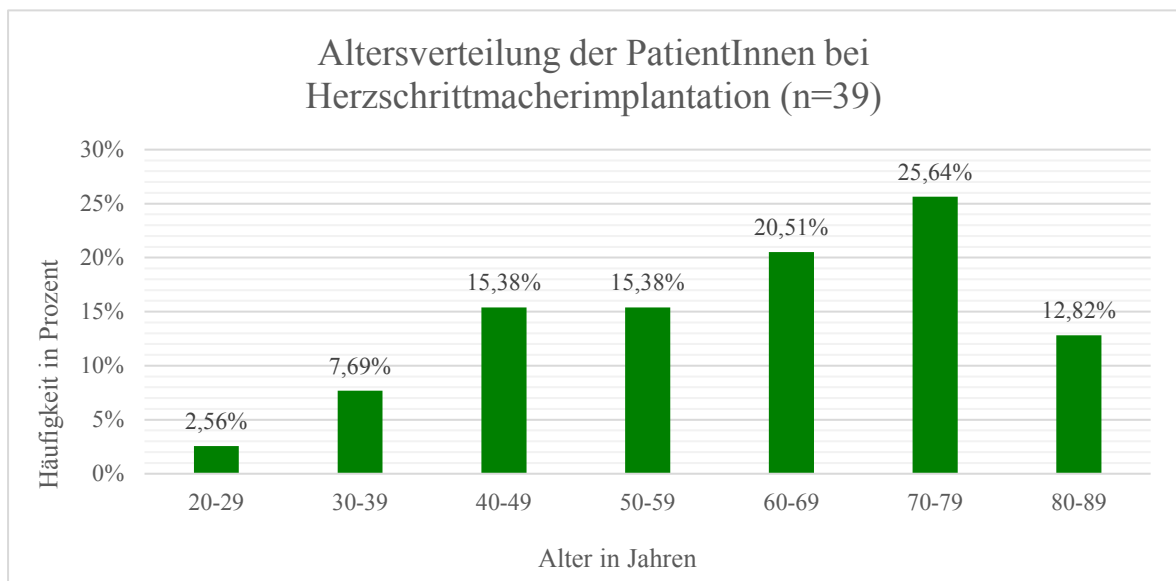


Abbildung 6: Altersverteilung der PatientInnen bei Herzschrittmacherimplantation

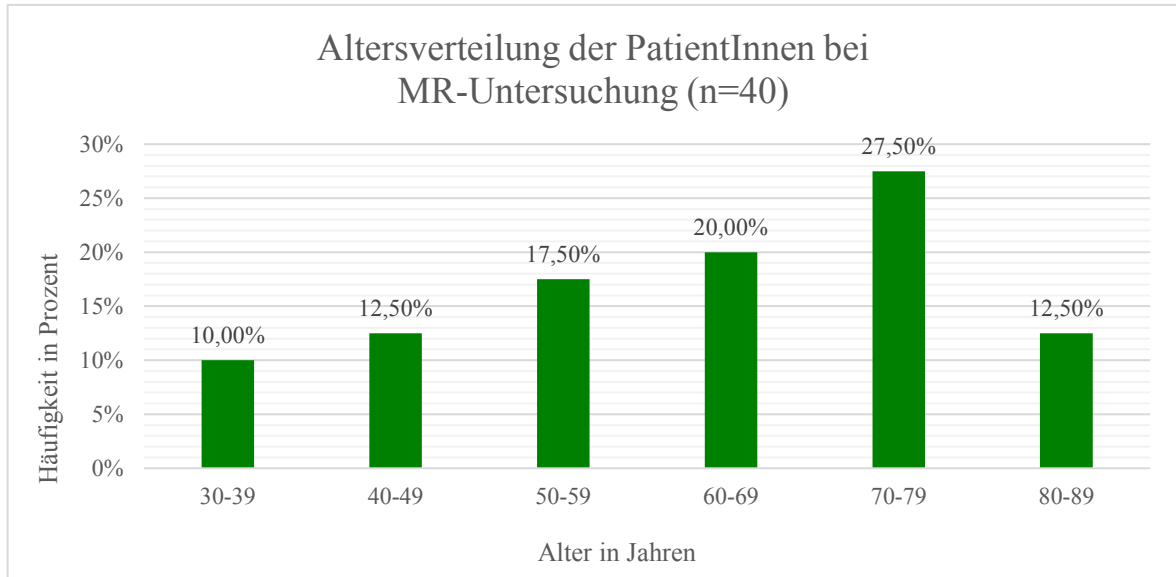


Abbildung 7: Altersverteilung der PatientInnen bei MR-Untersuchung

3.1.1.3 Body-Mass-Index

Der Body-Mass-Index (BMI) wurde aus Körpergröße und -gewicht der PatientInnen zum Zeitpunkt der MR-Untersuchung (n=40) mit der Formel

$$\frac{\text{Körpergewicht [kg]}}{\text{Körpergröße [m]}^2}$$

berechnet (33). Die Einteilung erfolgte laut Weltgesundheitsorganisation (WHO) (33).

Das Maximum des BMI lag bei 46,09 kg/m², das Minimum bei 20,55 kg/m². Mittelwert und Standardabweichung des BMI betragen 28,68 ± 5,03 kg/m², der Median lag bei 27,89 kg/m². Die größte Anzahl der PatientInnen befand sich im Stadium der Präadipositas (16 PatientInnen ≅ 40,00%), normalgewichtige PatientInnen waren mit 27,50% (≅ 11 PatientInnen) am zweithäufigsten vertreten (siehe **Abbildung 8**). Unter den Untersuchten befand sich kein(e) untergewichtige(r) PatientIn.

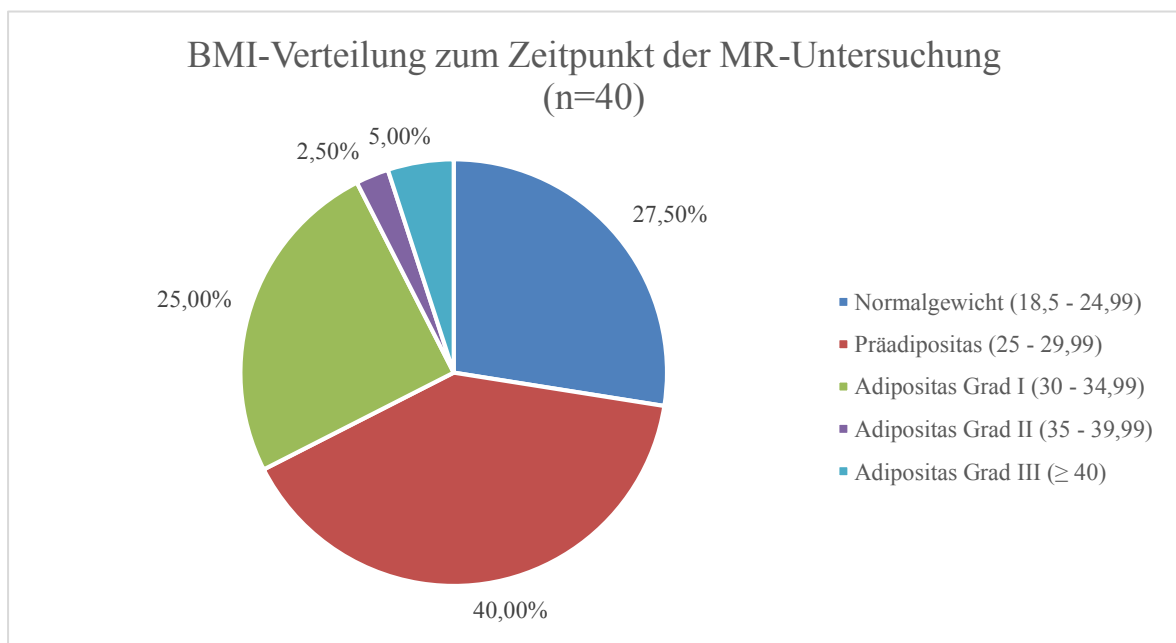


Abbildung 8: BMI-Verteilung zum Zeitpunkt der MR-Untersuchung

3.1.2 Herzschrittmacherdaten

3.1.2.1 Indikationen zur Herzschrittmachertherapie

Die Indikationen zur Herzschrittmacherimplantation (n=39) wurden zu den Kategorien Bradykardie, Tachykardie und Bradykardie-Tachykardie-Syndrom zusammengefasst. Bradykardie war mit 51,28% (\cong 20 Herzschrittmacherimplantationen) die häufigste Indikation zur Herzschrittmachertherapie, gefolgt vom Bradykardie-Tachykardie-Syndrom mit 35,90% (\cong 14 Herzschrittmacherimplantationen). Am seltensten war eine Tachykardie bzw. tachykarde Vorhofflimmerarrhythmie Grund zu einer Herzschrittmachertherapie (10,26% \cong vier Herzschrittmacher-implantationen) (siehe **Abbildung 9**).

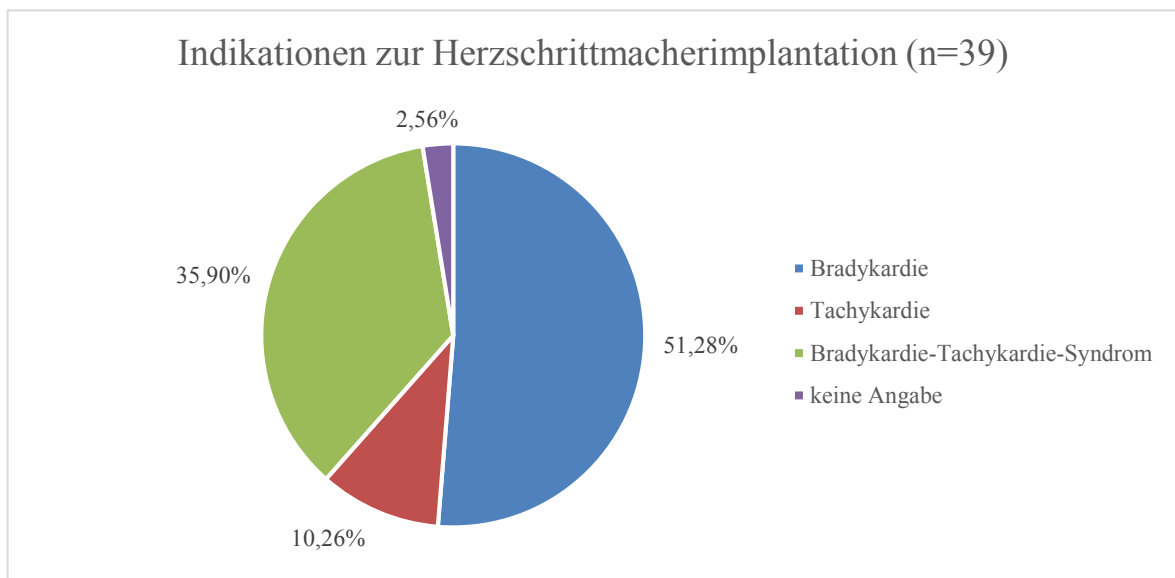


Abbildung 9: Indikationen zur Herzschrittmacherimplantation

3.1.2.2 Herzschrittmacher-Modi

Am häufigsten vertreten waren Herzschrittmacher mit einem DDD-R Modus (56,41% $\hat{=}$ 22 Modi). Herzschrittmacher mit einem VVI Modus (5,13% $\hat{=}$ zwei Modi) und ICDs mit einem VDD-Schrittmachermodus (7,69% $\hat{=}$ drei Modi) kamen am seltensten vor (siehe **Abbildung 10**).

Von 20 PatientInnen mit Herzschrittmacherindikation Bradykardie erhielten 16 (80,00%) einen Schrittmacher mit DDD-R Modus, vier (20,00%) einen DDD Modus. Bei Bradykardie-Tachykardie-Syndrom („Brady-Tachy“) wurde am häufigsten ein DDD-R (42,86% $\hat{=}$ sechs Modi) Modus eingesetzt (siehe **Abbildung 11** und **Tabelle 5**).

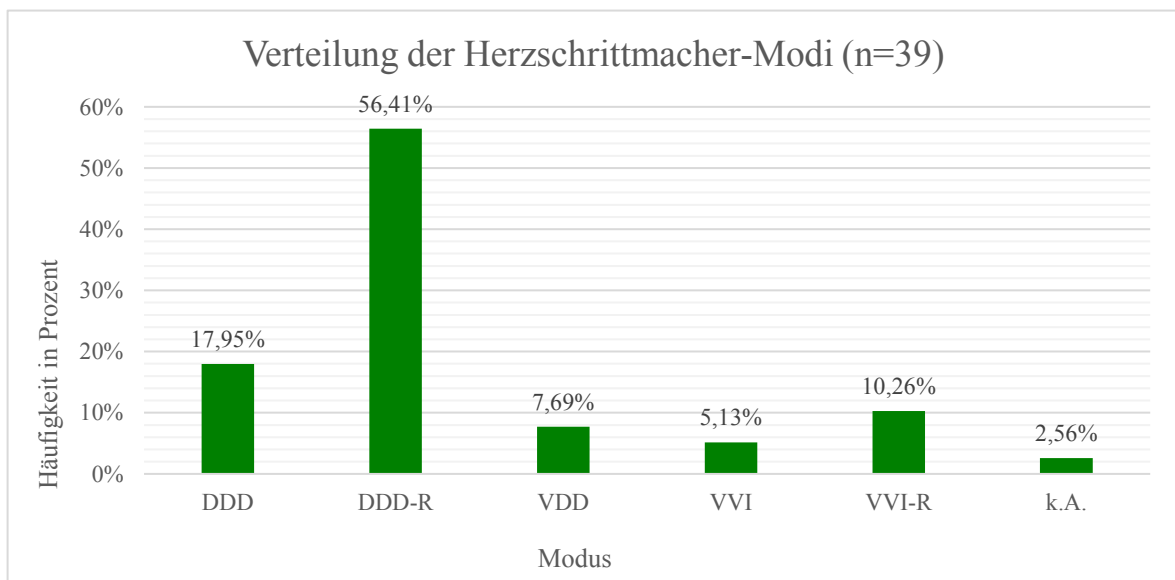


Abbildung 10: Verteilung der Herzschrittmacher-Modi

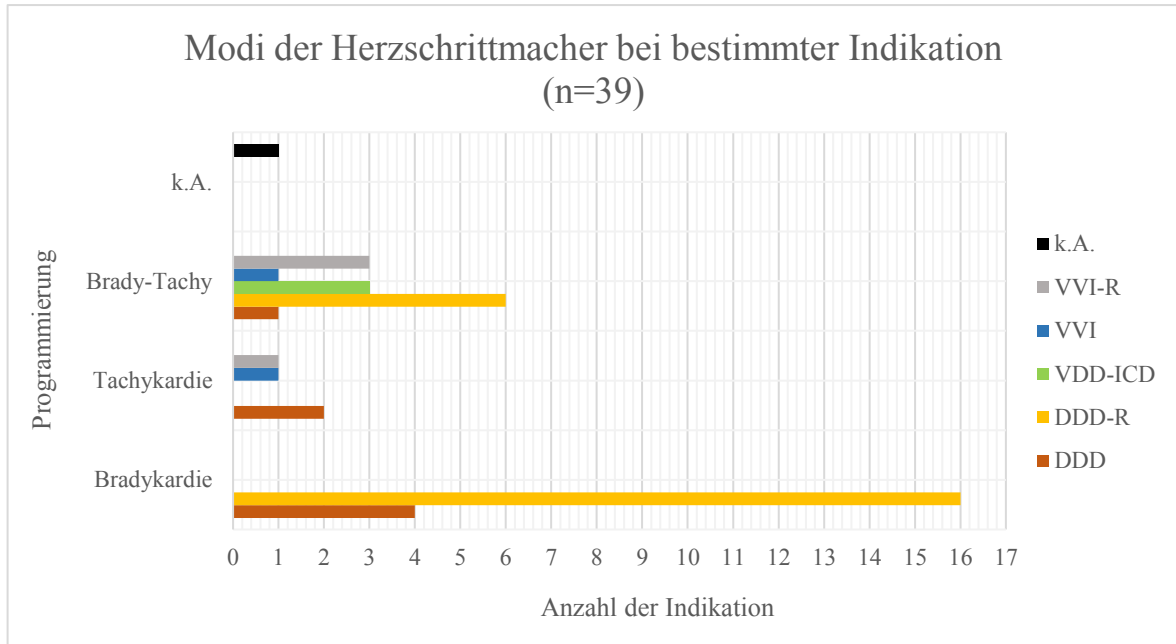


Abbildung 11: Modi der Herzschrittmacher bei bestimmter Indikation

Anzahl und prozentueller Anteil von Herzschrittmacherindikationen und -modi										
	Bradykardie		Tachykardie		Brady-Tachy		k. A.		Gesamt	
DDD	4	20,00%	2	50,00%	1	7,14%	0	0,00%	7	17,95%
DDD-R	16	80,00%	0	0,00%	6	42,86%	0	0,00%	22	56,41%
VDD	0	0,00%	0	0,00%	3	21,43%	0	0,00%	3	7,69%
VVI	0	0,00%	1	25,00%	1	7,14%	0	0,00%	2	5,13%
VVI-R	0	0,00%	1	25,00%	3	21,43%	0	0,00%	4	10,26%
k. A.	0	0,00%	0	0,00%	0	0,00%	1	100,00%	1	2,56%
Gesamt	20	51,28%	4	10,46%	14	35,90%	1	2,56%	39	100,00%

Tabelle 5: Anzahl und prozentueller Anteil von Herzschrittmacherindikationen und -modi

3.1.2.3 Herzschrittmacherinfektion

Bei keinem der PatientInnen (n=39) kam es nach einer Herzschrittmacherimplantation zu einer Schrittmachertaschen-Infektion.

Bei einem Patienten kam es einen Monat nach Implantation des Herzschrittmachers zu einer Vorhofsendendislokation.

3.1.2.4 Herstellerfirmen und ihre Modelle

Unter den implantierten Herzschrittmachern (n=39) fanden sich Geräte der Firmen Medtronic® (53,85% $\hat{=}$ 21 Herzschrittmacher), Biotronik® (25,64% $\hat{=}$ 10 Herzschrittmacher) und St. Jude Medical® (17,95% $\hat{=}$ sieben Herzschrittmacher) (siehe **Abbildung 12**).

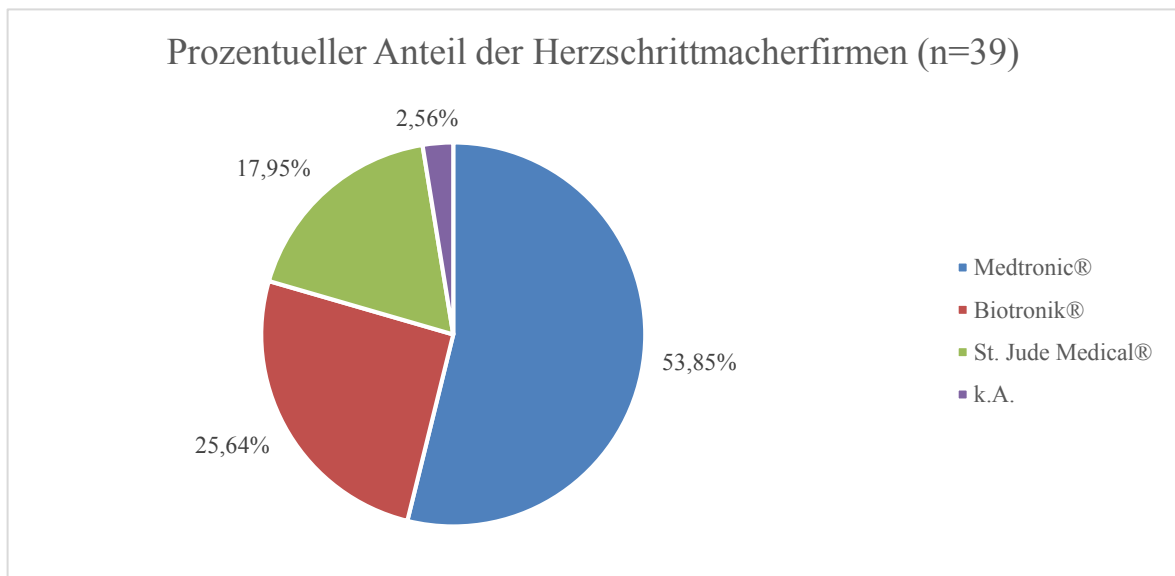


Abbildung 12: Prozentueller Anteil der Herzschrittmacherfirmen

Mit 60,00% ($\hat{=}$ sechs Modellen) war das Modell Biotronik® Evia das am häufigsten verwendete, die Modelle Biotronik® Epyra und Biotronik® Iforia mit jeweils 10,00% ($\hat{=}$ je einem Modell) die am seltensten verwendeten Modelle der Firma Biotronik® (siehe **Abbildung 13**).

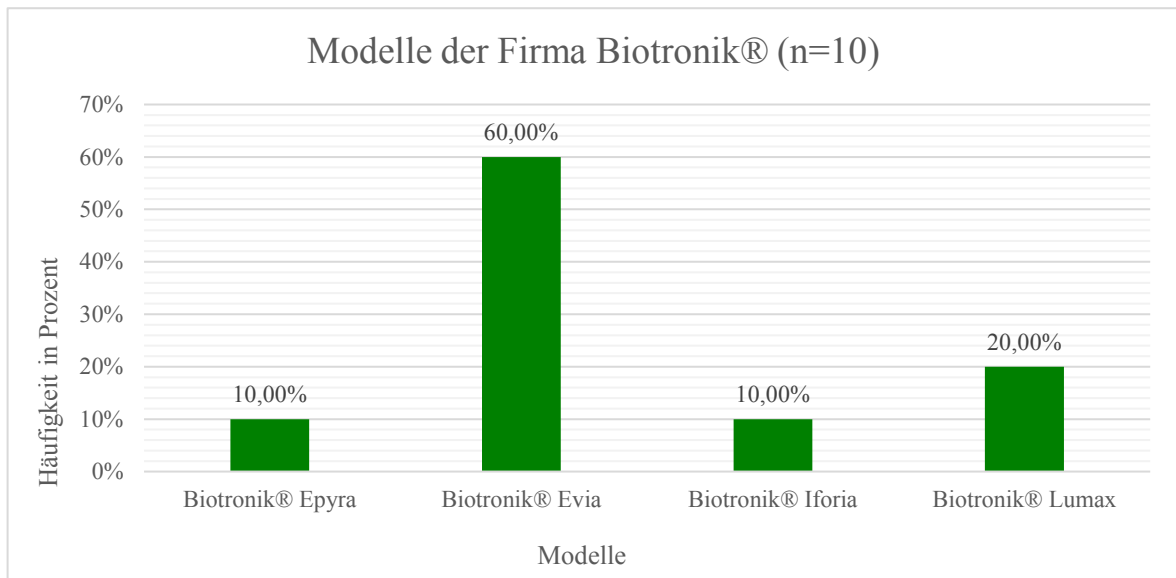


Abbildung 13: Modelle der Firma Biotronik®

Von den insgesamt 21 Medtronic® Modellen entsprachen 17 (80,95%) dem Modell Medtronic® Advisa MRI™, drei (14,29%) dem Modell Medtronic® EnRhythm MRI™ und eines (4,76%) dem Modell Medtronic® Ensura MRI™ (siehe **Abbildung 14**).

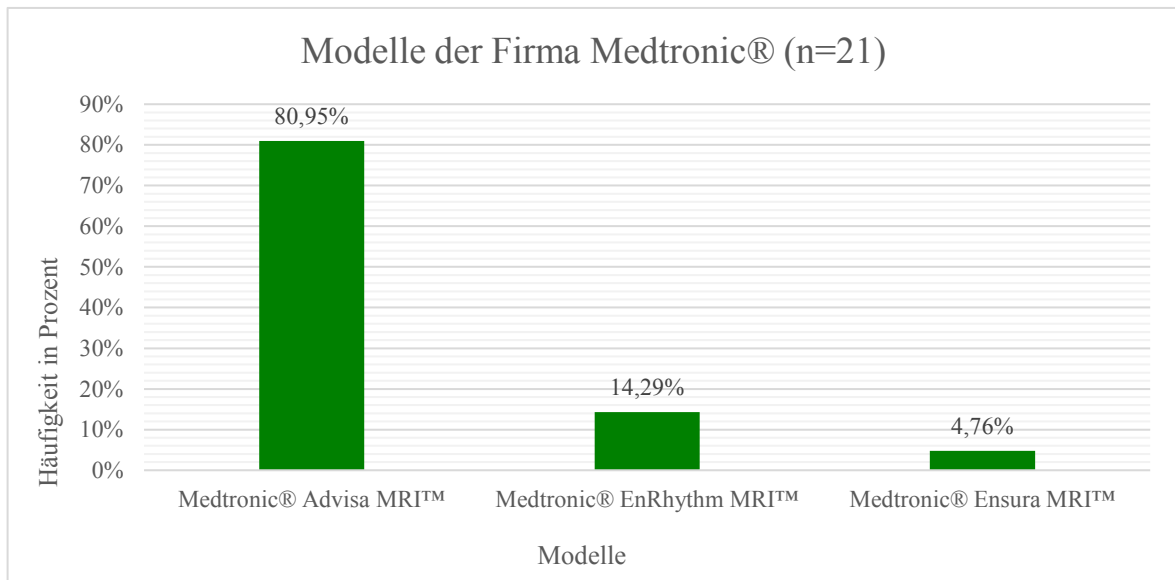


Abbildung 14: Modelle der Firma Medtronic®

3.1.2.5 Sondenimpedanz [Ohm]

3.1.2.5.1 Einkammerschrittmacher

Von insgesamt neun PatientInnen mit Einkammerschrittmacher konnte zum Zeitpunkt A von acht PatientInnen, zum Zeitpunkt B von zwei PatientInnen die Sondenimpedanz ermittelt werden¹.

Zum Zeitpunkt A befand sich die ventrikuläre Sondenimpedanz bei Einkammerschrittmacher zwischen 460,00Ω und 1080,00Ω zum Zeitpunkt B bei 600,00Ω und 682,00Ω. Median, Mittelwert und Standardabweichung zum Zeitpunkt A betragen 605,00Ω bzw. $690,50 \pm 200,58\Omega$. Auf die Berechnung von Median, Mittelwert und Standardabweichung zum Zeitpunkt B wurde aufgrund der geringen Anzahl der Messwerte verzichtet.

3.1.2.5.2 Zweikammerschrittmacher – Zeitpunkt A

Von insgesamt 30 PatientInnen mit Zweikammerschrittmacher konnte zum Zeitpunkt A die atriale und ventrikuläre Sondenimpedanz von jeweils 25 PatientInnen erhoben werden. Die Werte der atrialen Sondenimpedanz lagen zwischen 290,00Ω und 891,00Ω, jene der ventrikulären Sondenimpedanz zwischen 460,00Ω und 1219,00Ω. Median, Mittelwert und Standardabweichung der atrialen Sondenimpedanz ergaben 551,00Ω bzw. $591,00 \pm 146,53\Omega$, die der ventrikulären Sondenimpedanz betragen 739,00Ω bzw. $797,76 \pm 224,45\Omega$.

¹ Zur Erklärung der Zeitpunkte A und B siehe Kapitel 2.2.2

3.1.2.5.3 Zweikammerschrittmacher – Zeitpunkt B

Von insgesamt 30 PatientInnen mit Zweikammerschrittmacher konnte zum Zeitpunkt B die atriale Sondenimpedanz von 12, die ventrikuläre Sondenimpedanz von 13 PatientInnen ermittelt werden.

Die atriale Sondenimpedanz befand sich zwischen 340,00 Ω und 627,00 Ω , die ventrikuläre zwischen 410,00 Ω und 665,00 Ω . Der Median der atrialen Sondenimpedanz betrug 505,50 Ω , jener der ventrikulären Sondenimpedanz 513,00 Ω . Mittelwert und Standardabweichung der atrialen Sondenimpedanz ergaben $495,50 \pm 74,71\Omega$, die der ventrikulären $527,69 \pm 77,11\Omega$.

3.1.2.6 *Reizschwelle [V]*

3.1.2.6.1 Einkammerschrittmacher

Von insgesamt neun PatientInnen mit Einkammerschrittmacher konnte zum Zeitpunkt A von neun PatientInnen, zum Zeitpunkt B von zwei PatientInnen die Reizschwelle ermittelt werden.

Die Reizschwelle zum Zeitpunkt A lag zwischen 0,30V und 0,80V, zum Zeitpunkt B bei 0,60V und 0,80V. Median, Mittelwert und Standardabweichung zum Zeitpunkt A betragen 0,50V bzw. $0,53 \pm 0,15V$. Auf die Berechnung von Median, Mittelwert und Standardabweichung zum Zeitpunkt B wurde aufgrund der geringen Anzahl der Messwerte verzichtet.

3.1.2.6.2 Zweikammerschrittmacher – Zeitpunkt A

Von insgesamt 30 PatientInnen mit Zweikammerschrittmacher konnte zum Zeitpunkt A die atriale Reizschwelle von 23 PatientInnen, die ventrikuläre Reizschwelle von 25 PatientInnen erhoben werden.

Die atriale Reizschwelle lag zwischen 0,38V und 1,90V, die ventrikuläre zwischen 0,25V und 1,30V. Median, Mittelwert und Standardabweichung der atrialen Reizschwelle betragen 0,60V bzw. $0,69 \pm 0,35V$, die der ventrikulären Reizschwelle ergaben 0,50V bzw. $0,57 \pm 0,27V$.

3.1.2.6.3 Zweikammerschrittmacher – Zeitpunkt B

Von insgesamt 30 PatientInnen mit Zweikammerschrittmacher konnte zum Zeitpunkt B die atriale Reizschwelle von 12 PatientInnen, die ventrikuläre Reizschwelle von 14 PatientInnen erhoben werden.

Die atriale Reizschwelle lag zwischen 0,50V und 1,50V, die ventrikuläre zwischen 0,25V und 2,38V. Median, arithmetisches Mittel und Standardabweichung der atrialen Reizschwelle ergaben 0,69V bzw. $0,74 \pm 0,29V$, die der ventrikulären Reizschwelle betragen 0,73V bzw. $0,82 \pm 0,63V$.

3.1.2.7 *P- bzw. R-Welle [mV]*

3.1.2.7.1 Einkammerschrittmacher

Von insgesamt neun PatientInnen mit Einkammerschrittmacher konnte die R-Welle zum Zeitpunkt A von acht PatientInnen, zum Zeitpunkt B von einer/einem Patientin/Patienten erhoben werden.

Die R-Welle betrug zum Zeitpunkt A 6,90mV bis 30,00mV. Median, arithmetisches Mittel und Standardabweichung lagen zum Zeitpunkt A bei 12,60mV bzw. $14,65 \pm 7,91mV$.

Der gemessene Wert der R-Welle betrug zum Zeitpunkt B 18,20mV.

3.1.2.7.2 Zweikammerschrittmacher – Zeitpunkt A

Von insgesamt 30 PatientInnen mit Zweikammerschrittmacher konnte die P-Welle zum Zeitpunkt A von 24 PatientInnen, die R-Welle von 25 PatientInnen ermittelt werden.

Die P-Welle lag zum Zeitpunkt A zwischen 0,80mV und 5,70mV, die R-Welle zwischen 7,50mV und 20,60mV. Median, arithmetisches Mittel und Standardabweichung der P-Welle ergaben 2,85mV bzw. $2,89 \pm 1,34\text{mV}$, die der R-Welle betragen 10,50mV bzw. $11,40 \pm 3,44\text{mV}$.

3.1.2.7.3 Zweikammerschrittmacher – Zeitpunkt B

Von insgesamt 30 PatientInnen mit Zweikammerschrittmacher konnte zum Zeitpunkt B die P-Welle bei 13 PatientInnen, die R-Welle bei 11 PatientInnen ermittelt werden.

Die Werte der P-Welle befanden sich zum Zeitpunkt B zwischen 0,30mV und 5,40mV, die der R-Welle zwischen 0,90mV und 15,90mV. Median, arithmetisches Mittel und Standardabweichung der P-Welle lagen bei 2,10mV bzw. $2,18 \pm 1,40\text{mV}$, jene der R-Welle betragen 9,50mV bzw. $8,95 \pm 3,83\text{mV}$.

3.1.2.8 *Batteriestatus*

Der Batteriestatus war, wenn angegeben, zum Zeitpunkt A und zum Zeitpunkt B sowohl bei Einkammer- als auch bei Zweikammerschrittmacher ordnungsgemäß. Zum Zeitpunkt A war der Batteriestatus bei 35 von 39, zum Zeitpunkt B bei 16 von 39 angegeben.

3.1.2.9 Lage der Schrittmachertasche

Die Schrittmachertasche befand sich bei 24 PatientInnen (61,54%) (n=39) rechtsseitig im Thorax, bei 14 PatientInnen (35,90%) linksseitig (siehe **Abbildung 15**). Die Tasche lag bei drei von drei PatientInnen mit einem ICD mit VDD-Schrittmachermodus auf der linken Seite des Thorax. Bei 24 PatientInnen (63,16%) der übrigen 35 PatientInnen wurde die Schrittmachertasche rechts angelegt, 11 (28,95%) der übrigen 35 PatientInnen erhielten eine linksseitige Schrittmachertasche.

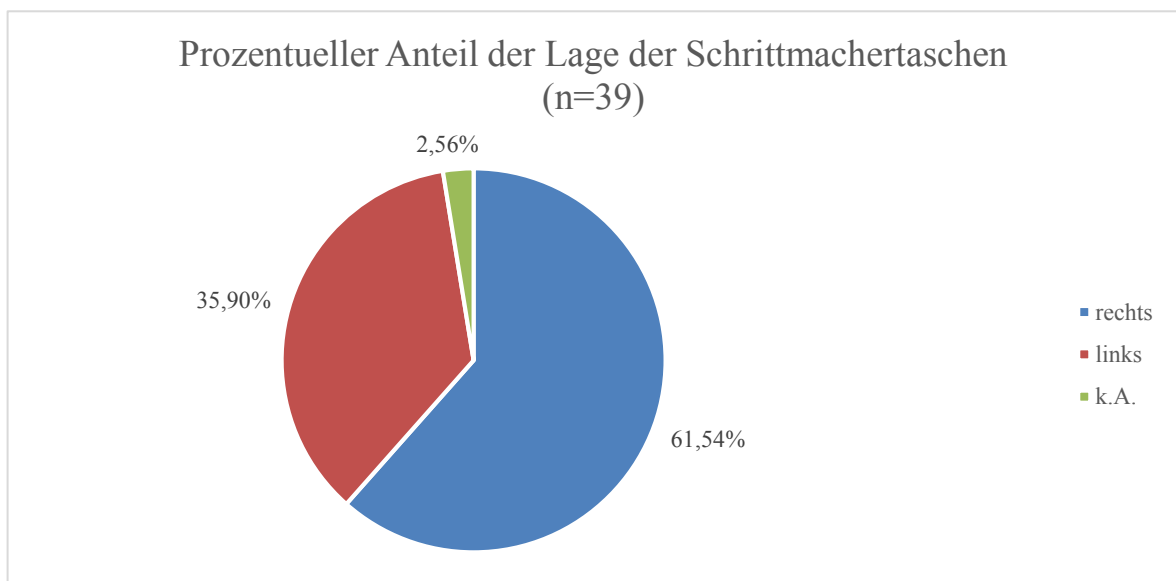


Abbildung 15: Prozentueller Anteil der Lage der Schrittmachertaschen

3.1.3 MR-Untersuchung

3.1.3.1 Intervall zwischen Herzschrittmacherimplantation und MR-Untersuchung

Das Intervall zwischen Herzschrittmacherimplantation und MR-Untersuchung lag zwischen 5,86 und 245,86 Wochen, arithmetisches Mittel und Standardabweichung betragen $60,92 \pm 61,99$ Wochen. Der Median ergab 43,86 Wochen. Mehr als die Hälfte der PatientInnen (55,00% \pm 22 PatientInnen) hatte innerhalb der ersten 12 Monate nach der Herzschrittmacherimplantation eine MR-Untersuchung. (siehe **Abbildung 16**).

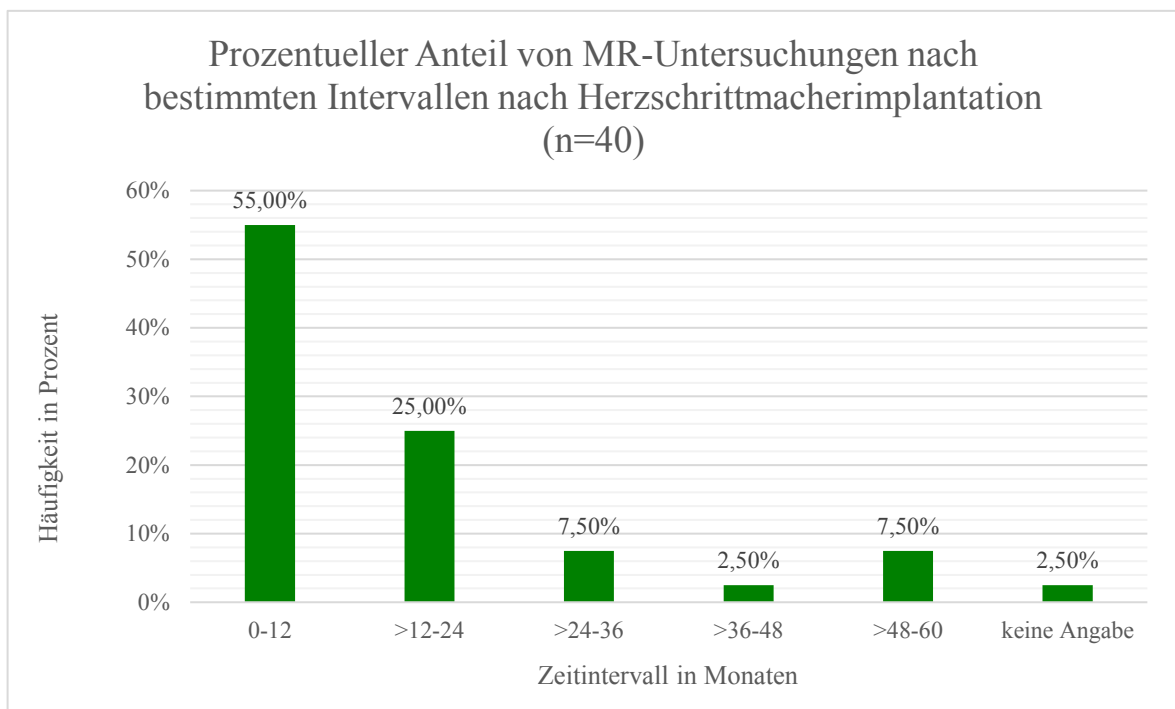


Abbildung 16: Prozentueller Anteil von MR-Untersuchungen nach bestimmten Intervallen nach Herzschrittmacherimplantation

3.1.3.2 Untersuchungsmodalitäten

Die MR-Untersuchungen des PatientInnenkollektiv setzten sich aus 24 Magnetresonanztomografien (60,00%) und jeweils acht Magnetresonanztomografien bzw. Magnetresonanztomografien mit zusätzlicher Magnetresonanztomografie (jeweils 20,00%) zusammen (siehe **Abbildung 17**).

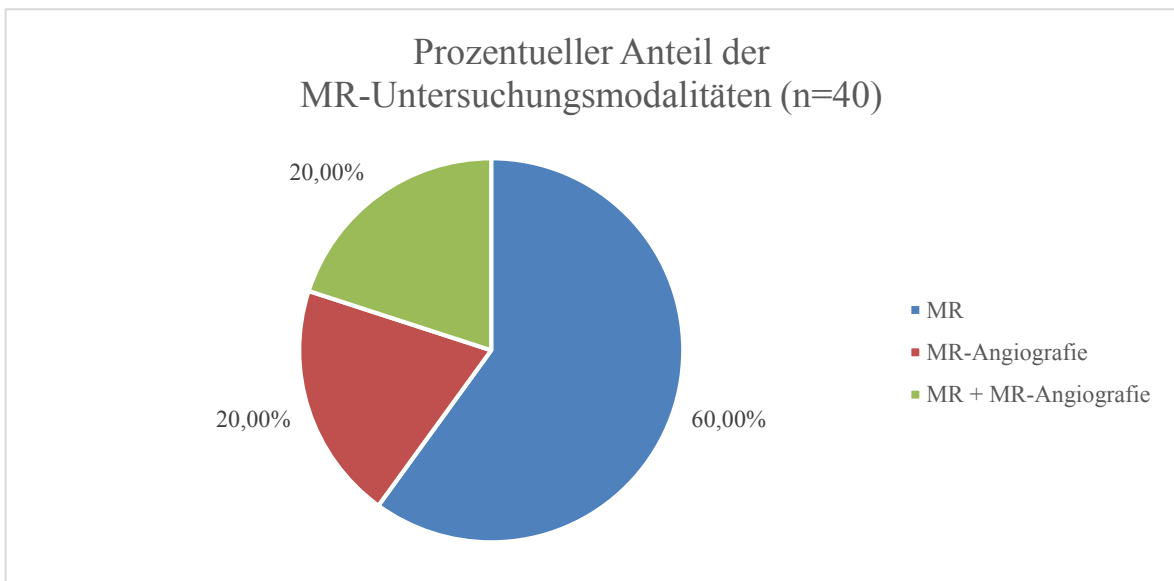


Abbildung 17: Prozentueller Anteil der MR-Untersuchungsmodalitäten

3.1.3.3 Untersuchungsfelder

Das häufigste MR-Untersuchungsfeld war der Schädel mit 15 Untersuchungen (37,50%), gefolgt von Hals und der Kombination Becken- und Extremitäten-MR mit jeweils sechs Untersuchungen (15,00%) (siehe **Abbildung 18**)

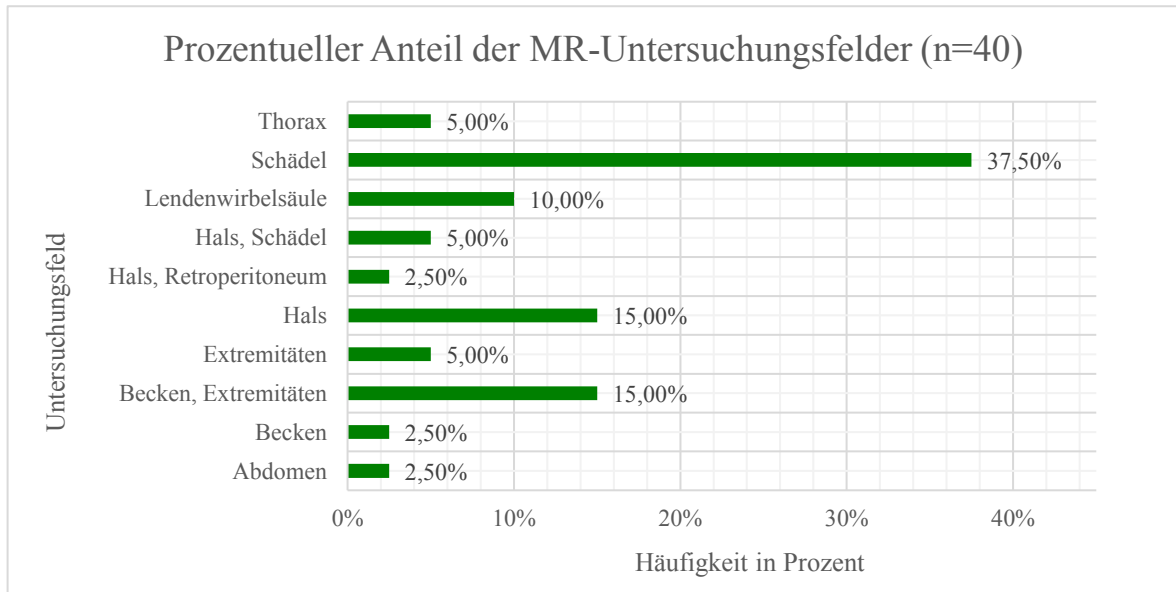


Abbildung 18: Prozentueller Anteil der MR-Untersuchungsfelder

3.1.3.4 MR-Indikationen

Die Indikationen der MR-Untersuchungen (n=40) setzten sich aus unterschiedlichsten Fragestellungen zusammen und werden in **Tabelle 6** dargestellt.

Untersuchungsfeld	MR-Indikation	Anzahl
<i>Abdomen</i>	Keine Angabe	1
<i>Becken</i>	Tumornachweis Prostata	1
<i>Becken und Extremitäten</i>	Diabetische arterielle Verschlusskrankheit	2
	Keine Angabe	4
<i>Extremitäten</i>	Claudicatio intermittens	1
	Keine Angabe	1
<i>Hals</i>	Abszess	1
	Gefäßstatus A. carotis und A. vertebralis	1
	Re-Staging Epipharynxkarzinom	1
	Keine Angabe	3
<i>Hals und Retroperitoneum</i>	Gefäßstatus A. carotis und A. vertebralis + Raumforderung unterer Nierenpol links	1
<i>Hals und Schädel</i>	Gefäßstatus A. carotis und A. vertebralis + Ischämie A. cerebri media - Gebiet	1
	Keine Angabe	1
<i>Lendenwirbelsäule</i>	Intraspinales Hämatom	1
	Discusprotrusion/-prolaps	2
	Keine Angabe	1
<i>Schädel</i>	Ischämie A. cerebri media - Gebiet	1
	Läsion im Gyrus cinguli	1
	Remissionskontrolle bei ZNS-Lymphom	2
	Tumorausmaß Gehirn	1
	Vaskuläre Läsion	1
	Verlaufskontrolle nach Hirnstammencephalitis	1
	Keine Angabe	8
<i>Thorax</i>	Biventrikuläre Größe und Auswurfraction	1
	Herzschrittmachersondenperforation	1

Tabelle 6: MR-Indikationen

3.1.3.5 Magnetfeldstärke und Dauer der MR-Untersuchung

Alle MR-Untersuchungen (n=39) wurden mit einem 1,5T Gerät der Firma Siemens® durchgeführt. Am häufigsten kam MAGNETOM® Espree zum Einsatz (36 Untersuchungen \cong 92,31%) (siehe **Abbildung 19**).

Die Dauer der MR-Untersuchung (n=39) lag zwischen 00:17:54 und 01:15:40 Stunden. Mittelwert, Standardabweichung und Median der Untersuchungsdauer ergaben 00:32:58 \pm 00:09:32 Stunden und 00:33:15 Minuten. Berechnet wurde die Dauer der MR-Untersuchungen aus der Summe aller Sequenzzeiten und eines geschätzten 10-minütigen Zeitraums für Monitoring und Lagerung der PatientInnen.

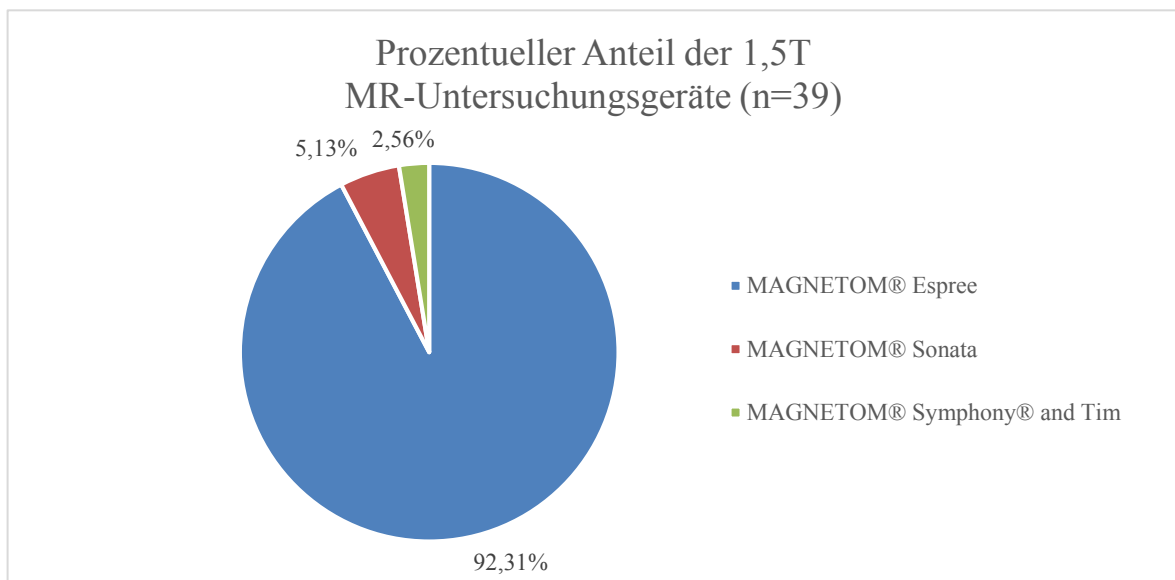


Abbildung 19: Prozentueller Anteil der 1,5T MR-Untersuchungsgeräte

3.1.3.6 Kontrastmittel

Die bei der MR-Untersuchung verabreichten Kontrastmittel waren ProHance® (14 Untersuchungen $\hat{=}$ 35,90%), Gadovist® (9 Untersuchungen $\hat{=}$ 23,08%) und DOTAREM® (3 Untersuchungen $\hat{=}$ 7,69%). 13 MR-Untersuchungen (33,33%) wurden ohne Kontrastmittel durchgeführt (siehe **Abbildung 20**).

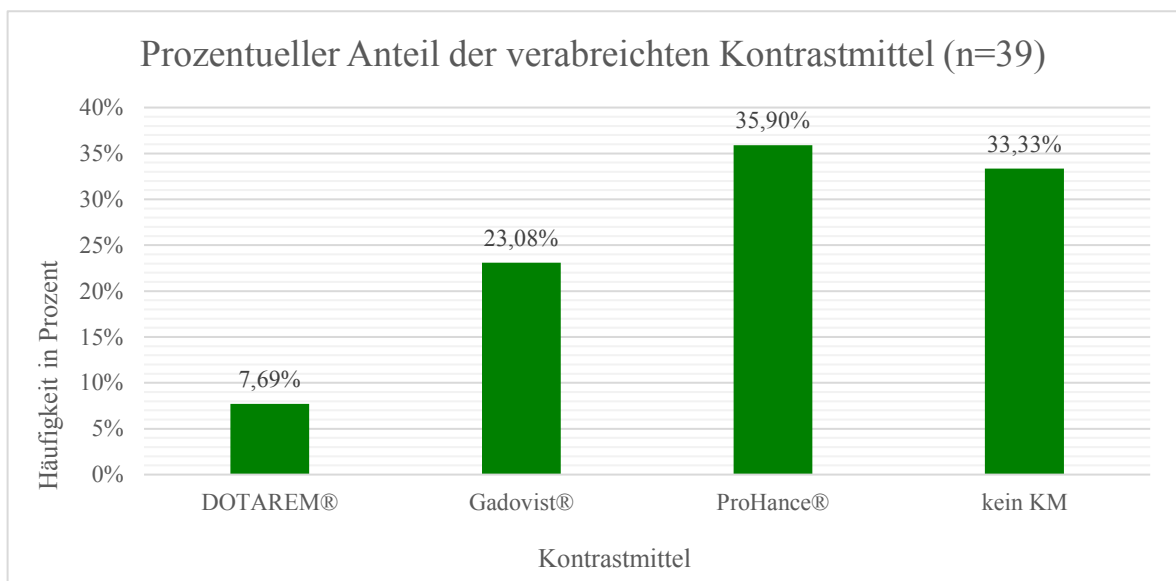


Abbildung 20: Prozentueller Anteil der verabreichten Kontrastmittel

3.1.3.7 Spezifische Absorptionsrate

Die SAR-Gesamtwerte der einzelnen MR-Untersuchungen lagen bei Untersuchungen von Kopf oder Rumpf zwischen 0,452W/kg und 31,409W/kg, bei Untersuchungen der Extremitäten zwischen 1,066W/kg und 22,526W/kg (siehe **Abbildung 21**). Median bzw. arithmetischem Mittel und Standardabweichung der Untersuchungen von Kopf oder Rumpf betragen 3,249W/kg bzw. $5,382 \pm 6,087$ W/kg, jene der Extremitäten lagen bei 17,463W/kg bzw. $14,948 \pm 7,111$ W/kg.

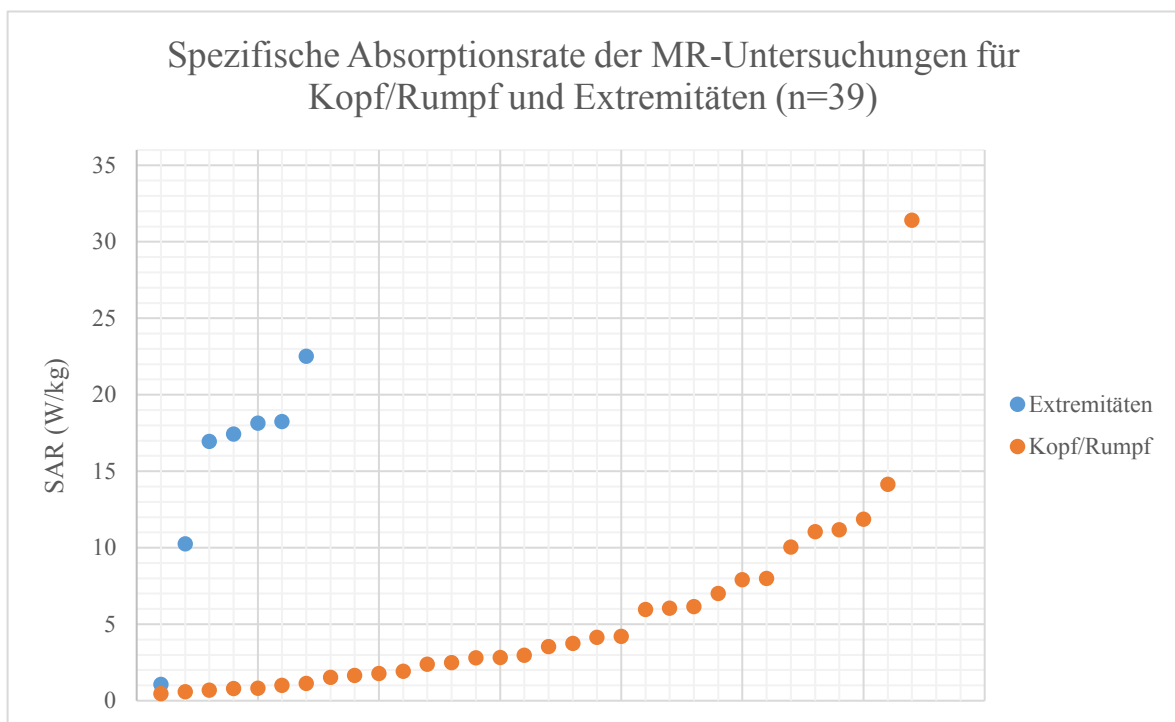


Abbildung 21: Spezifische Absorptionsrate der MR-Untersuchungen für Kopf/Rumpf und Extremitäten

3.2 Artefakten und Beurteilbarkeit

3.2.1 Deskriptive Statistik von Artefakten und Beurteilbarkeit

3.2.1.1 Artefakte und Beurteilbarkeit

In 32 von 39 MR-Untersuchungen (82,05%) traten keine Artefakte durch den MR-kompatiblen Herzschrittmacher auf. Bei fünf MR-Untersuchungen (12,82%) war der Herzschrittmacher Ursache von Artefakten, bei zwei Untersuchungen (5,13%) ist fraglich, ob die Artefakte (nur) durch den Herzschrittmacher entstanden sind (siehe **Abbildung 22**: MR-Untersuchungen mit Artefakten durch den Herzschrittmacher). Die fünf, durch den Herzschrittmacher ausgelösten Artefaktgeschehen, sowie die beiden fraglichen Artefaktgeschehen führten zu keiner Einschränkung der Beurteilbarkeit der Fragestellung (siehe **3.2.2**).

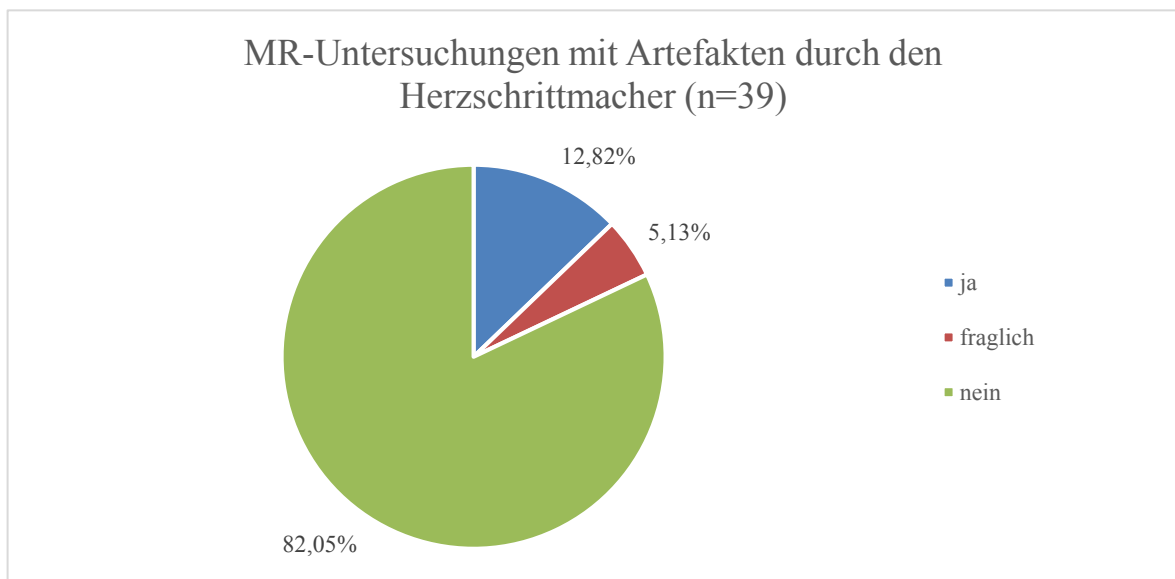


Abbildung 22: MR-Untersuchungen mit Artefakten durch den Herzschrittmacher

3.2.1.2 Untersuchungsfelder mit Artefaktgeschehen

Im Untersuchungsfeld Hals traten bei vier (57,14%), im Feld Thorax bei zwei MR-Untersuchungen (28,57%) und im Feld Lendenwirbelsäule bei einer MR-Untersuchung (14,29%) Artefakte auf. In keinem anderen Untersuchungsfeld (siehe 3.1.3.3) traten Artefakte auf (siehe **Abbildung 23**: Prozentueller Anteil der MR-Untersuchungsfelder mit Artefakten **Abbildung 23**).

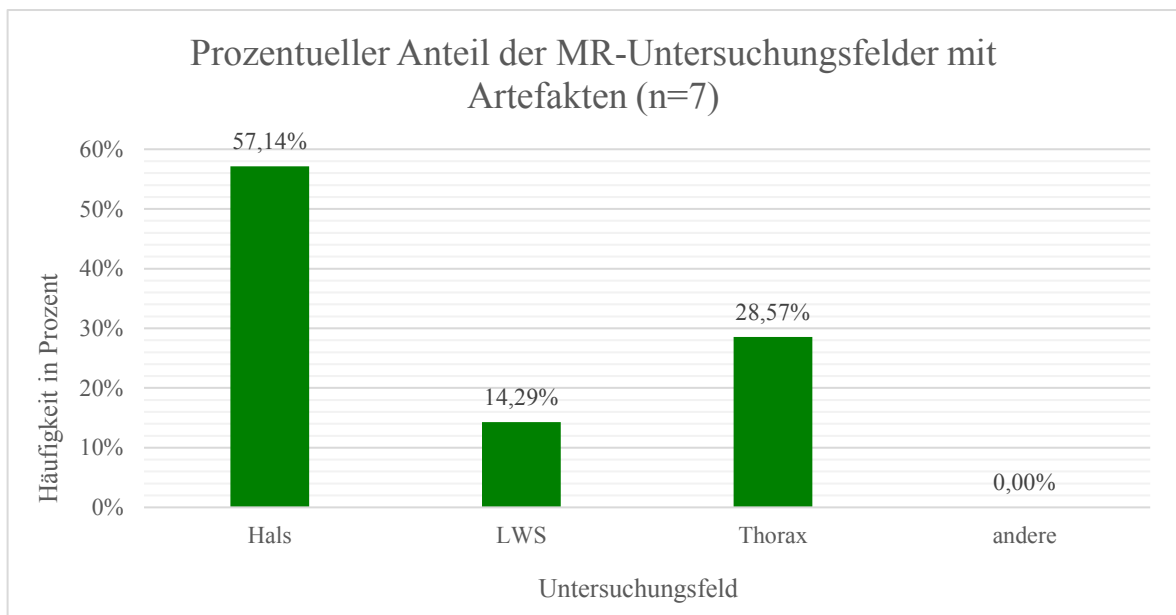


Abbildung 23: Prozentueller Anteil der MR-Untersuchungsfelder mit Artefakten

3.2.1.3 Herzschrittmacher mit Artefaktgeschehen

Bei Herzschrittmacher der Reihe St. Jude Medical® Accent MRI™ waren bei drei (42,86%), bei Medtronic® Advisa MRI™ bei zwei MR-Untersuchungen (28,57%) und bei Biotronik® Evia und Medtronic® EnRhythm MRI™ bei jeweils einer MR-Untersuchung (jeweils 14,29%) Artefakte zu sehen (siehe **Abbildung 24**).

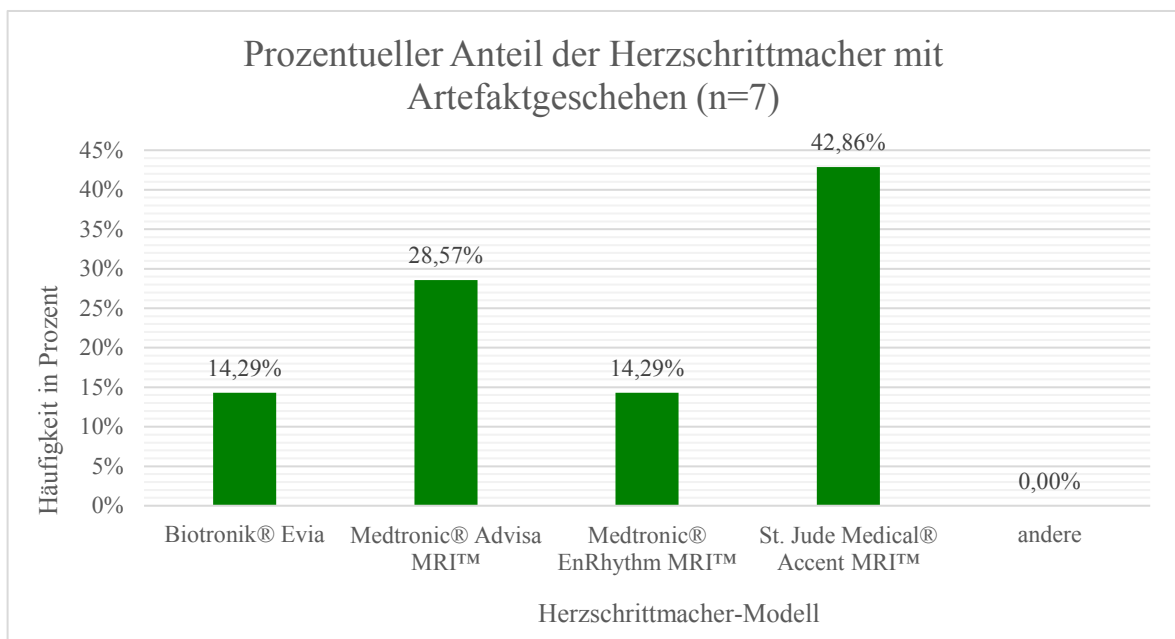


Abbildung 24: Prozentueller Anteil der Herzschrittmacher mit Artefaktgeschehen

3.2.2 Beschreibung der Artefakte und Beurteilbarkeit

3.2.2.1 Untersuchungsfeld Hals

Vier von sechs PatientInnen wiesen bei der MR-Untersuchung des Untersuchungsfeldes Hals Artefakte auf.

Bei *PatientIn 1* (DDD, St. Jude Medical® Accent MRI™) traten Artefakte in neun von neun Sequenzen, betreffend die obere Thoraxapertur, auf, wobei diese nur oberflächlich waren und Sequenzen mit Fettsättigung intensivere Artefakte als die übrigen zeigten. Es kam zu keiner eingeschränkten Beurteilbarkeit der Fragestellung „Abszess“, gut zu beurteilen waren Tonsillenlymphom und pathologisch vergrößerte Lymphknoten (siehe **Abbildung 25**). In folgenden Sequenzen kam es zu Artefakten:

- Localizer
- T1_tse_tra_4mm
- T1_tse_tra_fs_4mm_KM (siehe **Abbildung 26**)
- T1_tse_cor_p2_4mm
- T1_tse_cor_p2_4mm_KM
- T1_tse_sag_fs_4mm_KM
- T2_tse_tra_320_pt3_4mm
- T2_tse_tra_fs_320_pt3_4mm
- Ep2d_diff_3scan

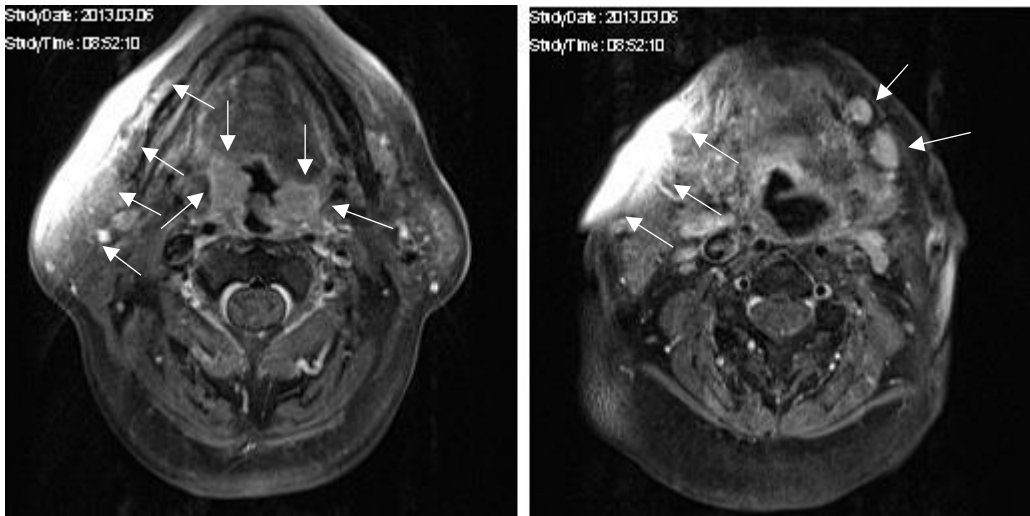


Abbildung 25: PatientIn 1: Tonsillenlymphom, pathologisch vergrößerte Lymphknoten und Artefakte der Sequenz T1_tse_tra_fs_4mm_KM im Untersuchungsfeld Hals



Abbildung 26: PatientIn 1: Artefakte der Sequenz T1_tse_tra_fs_4mm_KM im Untersuchungsfeld Hals

Bei *PatientIn 2* (DDD-R, Medtronic® Advisa DR MRI™) war die Beurteilbarkeit der MR-Angiographie der A. subclavia nicht eingeschränkt (siehe **Abbildung 27**), in neun von neun Sequenzen traten Artefakte auf:

- Localizer
- T1_vibe_tra_fs (siehe **Abbildung 28**)
- T2_trufi2d_cor_bh
- T2_trufi2d_sag_bh
- T2_trufi2d_tra_bh
- T2_haste_tra_fs_navi
- Fl3d_cor_aorta_nativ (siehe **Abbildung 29**)
- Fl3d_cor_aorta_KM (siehe **Abbildung 27**)
- Fl3d_cor_HR_Thorax



Abbildung 27: *PatientIn 2:* Kontrastmittelaussparung der V. jugularis in der Äquilibriumphase durch einen Thrombus

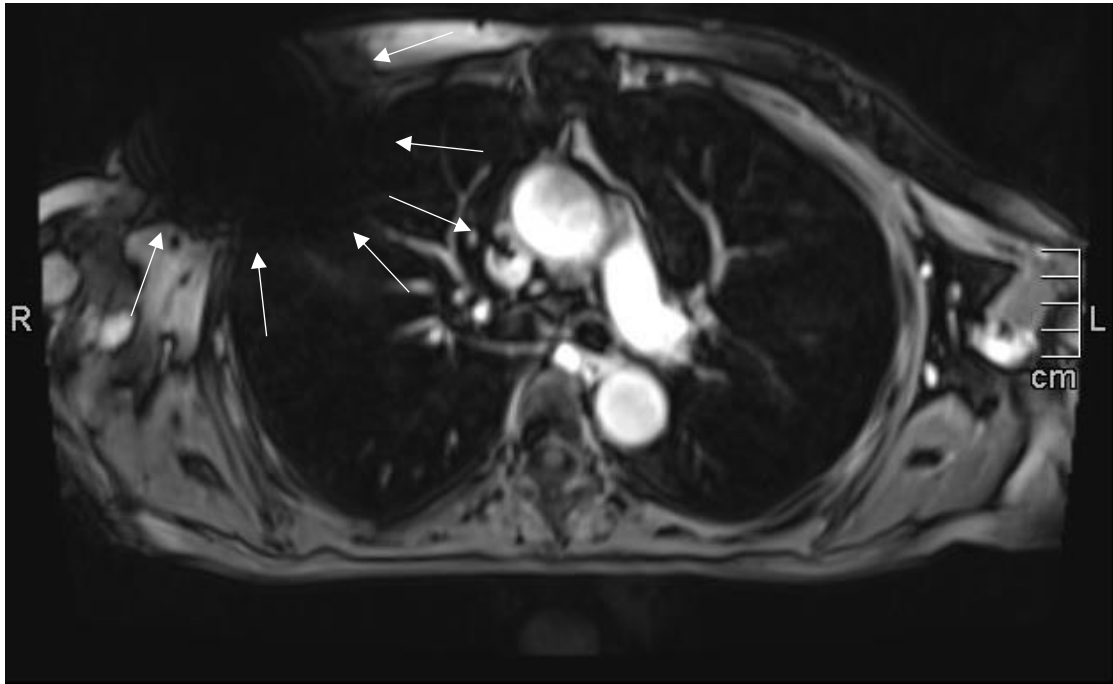


Abbildung 28: PatientIn 2: Thrombus und Artefakt der Sequenz T1_yibe_tra_fs im Untersuchungsfeld Hals



Abbildung 29: PatientIn 2: Thrombusausdehnung, Artefakte durch Herzschrittmacher und Schrittmachersonden ohne Beeinträchtigung der Beurteilbarkeit

PatientIn 3 (DDD, Medtronic® Advisa DR MRI™) wies Artefakte in sechs von sieben Sequenzen auf, jedoch nicht in der zu untersuchenden Region. Somit hatten die Artefakte keine Auswirkung auf die Beurteilbarkeit der Fragestellung „Re-Staging nach Resektion eines Epipharynxkarzinoms und Radiochemotherapie“. In folgenden Sequenzen traten Artefakte auf:

- Localizer
- T1_tse_tra_4mm
- T1_tse_tra_fs_KM
- T1_tse_cor_fs_4mm_KM (siehe **Abbildung 30**)
- T2_tse_tra
- T2_tse_tra_fs

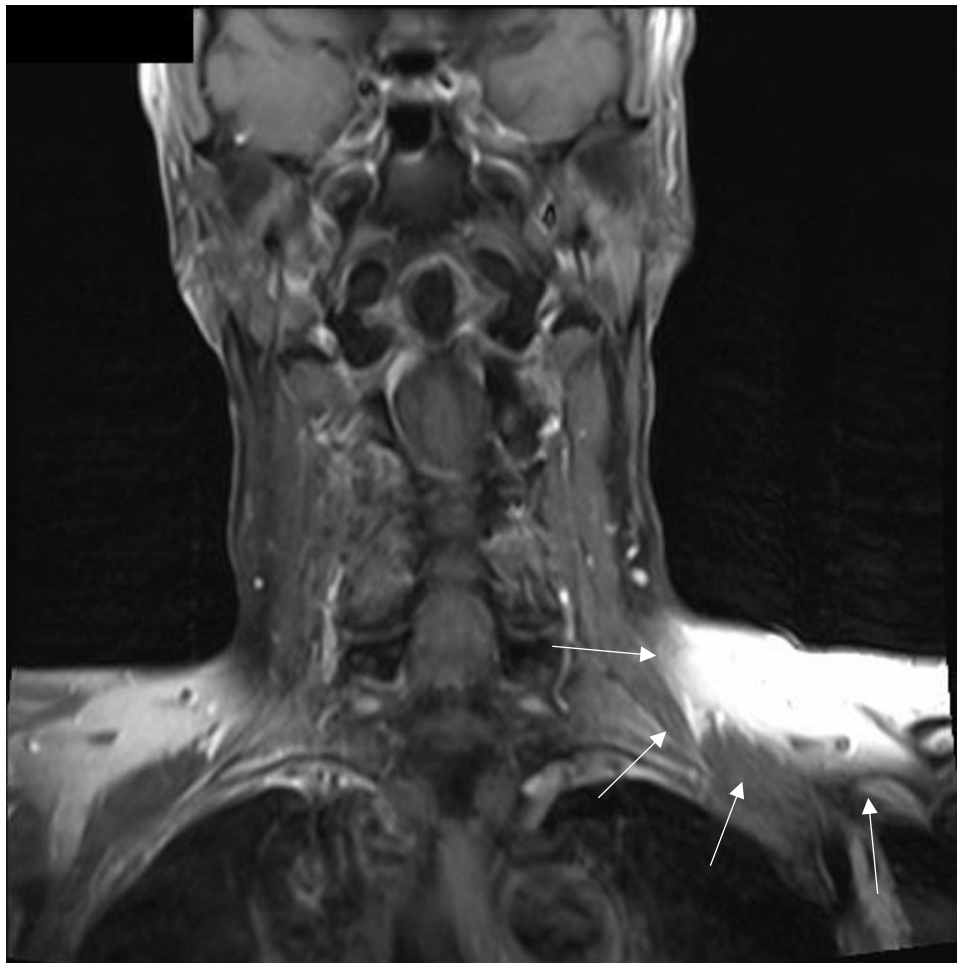


Abbildung 30: *PatientIn 3:* Artefakt der Sequenz T1_tse_cor_fs_4mm_KM im Untersuchungsfeld Hals

Bei *PatientIn 4* (VVI-R, Biotronik® Evia SR-T MRI™) wies keine eingeschränkte Beurteilbarkeit der Fragestellung „Gefäßstatus A. carotis und A. vertebralis“ auf. Artefakte traten in zwei von sieben Sequenzen auf, wobei der Artefakt in **Abbildung 32** nicht eindeutig auf den Herzschrittmacher zurückzuführen war, sondern auch durch liegende Sternum-Cerclagen (siehe **Abbildung 31**) oder die Kombination von Herzschrittmacher und Sternum-Cerclagen verursacht sein können. Die Sequenzen mit Artefakten waren:

- Fl3d_cor_carotis_nativ
- Fl3d_cor_carotis_KM (siehe **Abbildung 32**, **Abbildung 33**, **Abbildung 34**)



Abbildung 31: *PatientIn 4:* Röntgenbild mit Sternum-Cerclagen und Herzschrittmacher

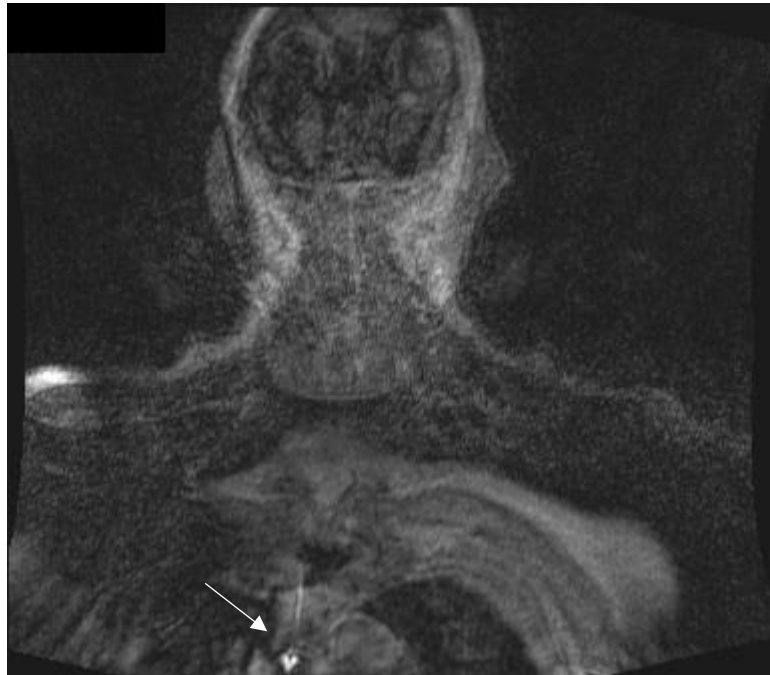


Abbildung 32: PatientIn 4: fraglicher Schrittmacher-Artefakt der Sequenz Fl3d_cor_carotis_KM im Untersuchungsfeld Hals



Abbildung 33: PatientIn 4: Schrittmacherartefakt der Sequenz Fl3d_cor_carotis_KM im Untersuchungsfeld Hals

3 Ergebnisse

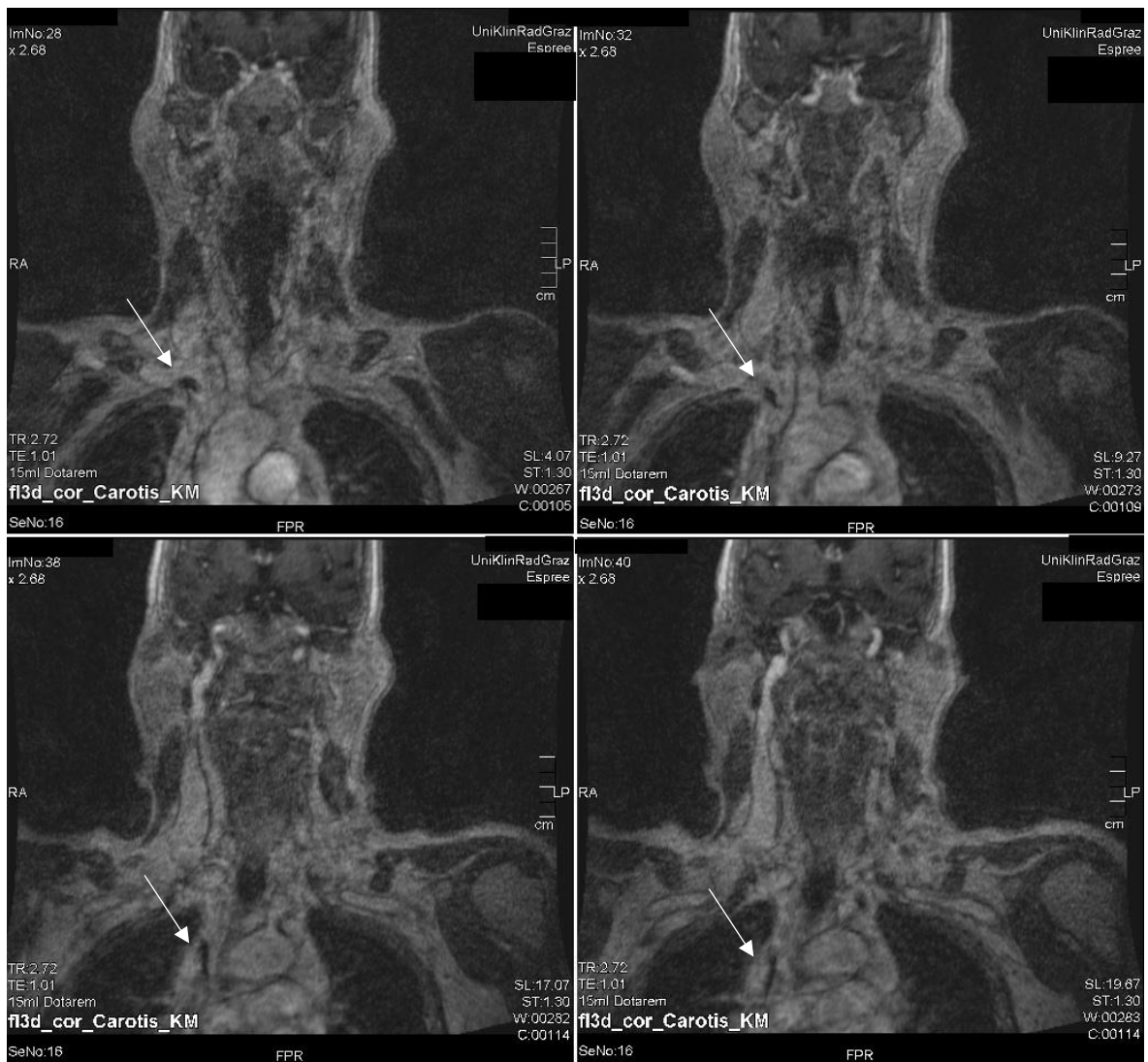


Abbildung 34: PatientIn 4: Verlauf der Herzschrittmachersonde

3.2.2.2 Untersuchungsfeld Thorax

Zwei von zwei PatientInnen wiesen bei der MR-Untersuchung des Untersuchungsfeldes Thorax Artefakte auf.

PatientIn 5 (DDD-R, Medtronic® EnRhythm MRI™) hatte keine eingeschränkte Beurteilbarkeit der Fragestellung „Biventrikuläre Größe und Auswurffraktion“, im Vergleich zu einer MR-Untersuchung vor Herzschrittmacherimplantation waren kaum Unterschiede zu erkennen (siehe **Abbildung 35**). Artefakte waren in 16 von 22 Sequenzen vorhanden, wobei diese nicht eindeutig auf den Herzschrittmacher zurückzuführen waren, sondern auch durch die Kombination von Herzschrittmacheraggregat, Schrittmachersonden, Thorax-Cerclagen und Bewegungen entstanden sein könnten. In folgenden Sequenzen traten Artefakte auf:

- Trufi_loc_multi_iPAT
- Trufi_loc_multi_iPAT@c
- Trufi_cor
- Trufi_sag
- Trufi_tra
- Haste_tra_db_2bh_iPAT
- Tf2d15_retro_iPAT_Aorta (siehe **Abbildung 36**)
- Tf2d15_retro_iPAT_rvot
- Tf2d15_retro_iPAT_lvot (siehe **Abbildung 37**)
- Tf2d15_retro_iPAT_pulm
- Tf2d22_retro_Volumetrie
- Tf2d22_retro_Volumetrie_4CH (siehe **Abbildung 38**)
- Tf2d25_retro_3slices_tricuspidalis+mitralis
- Flussmessung_tricuspidals+mitralis_v=150
- Native_TrueFisp_sag/obl_1.3
- Argus

3 Ergebnisse



Abbildung 35: PatientIn 5: Vergleich dreier MR-Schnittbilder vor und nach Herzschrittmarkerimplantation (linke Spalte nach Schrittmarkerimplantation, rechte Spalte vor Schrittmarkerimplantation)

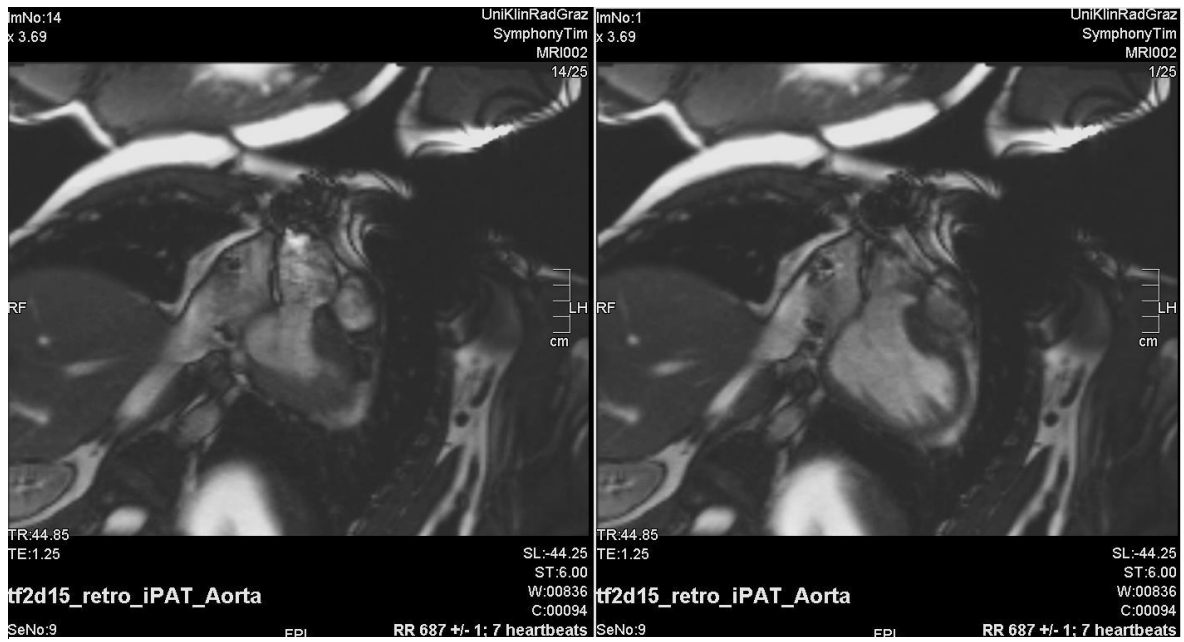


Abbildung 36: PatientIn 5: Einsehbarkeit des linksventrikulären Ausflusstraktes und der Aorta während systolischer (links) und diastolischer (rechts) linksventrikulären Füllung trotz Artefakt

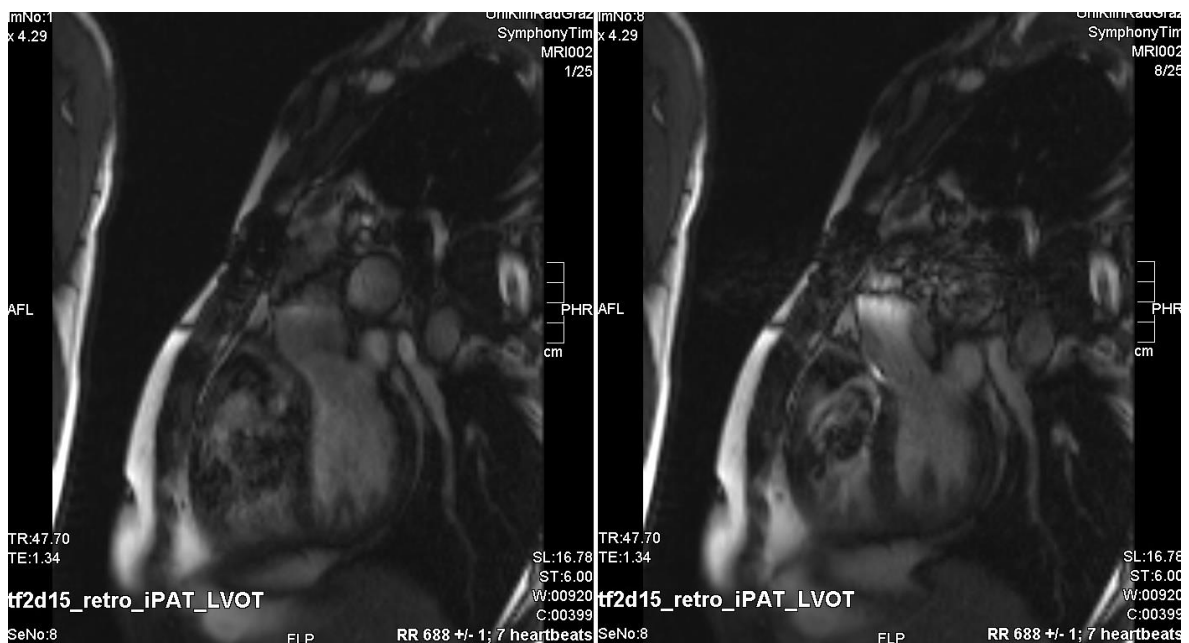


Abbildung 37: PatientIn 5: Signallose Areale im rechten Ventrikel, wahrscheinlich durch turbulenten Fluss im Rahmen einer Pulmonalklappeninsuffizienz, während der maximalen diastolischen Füllung (links) und der systolischen Füllung (rechts)

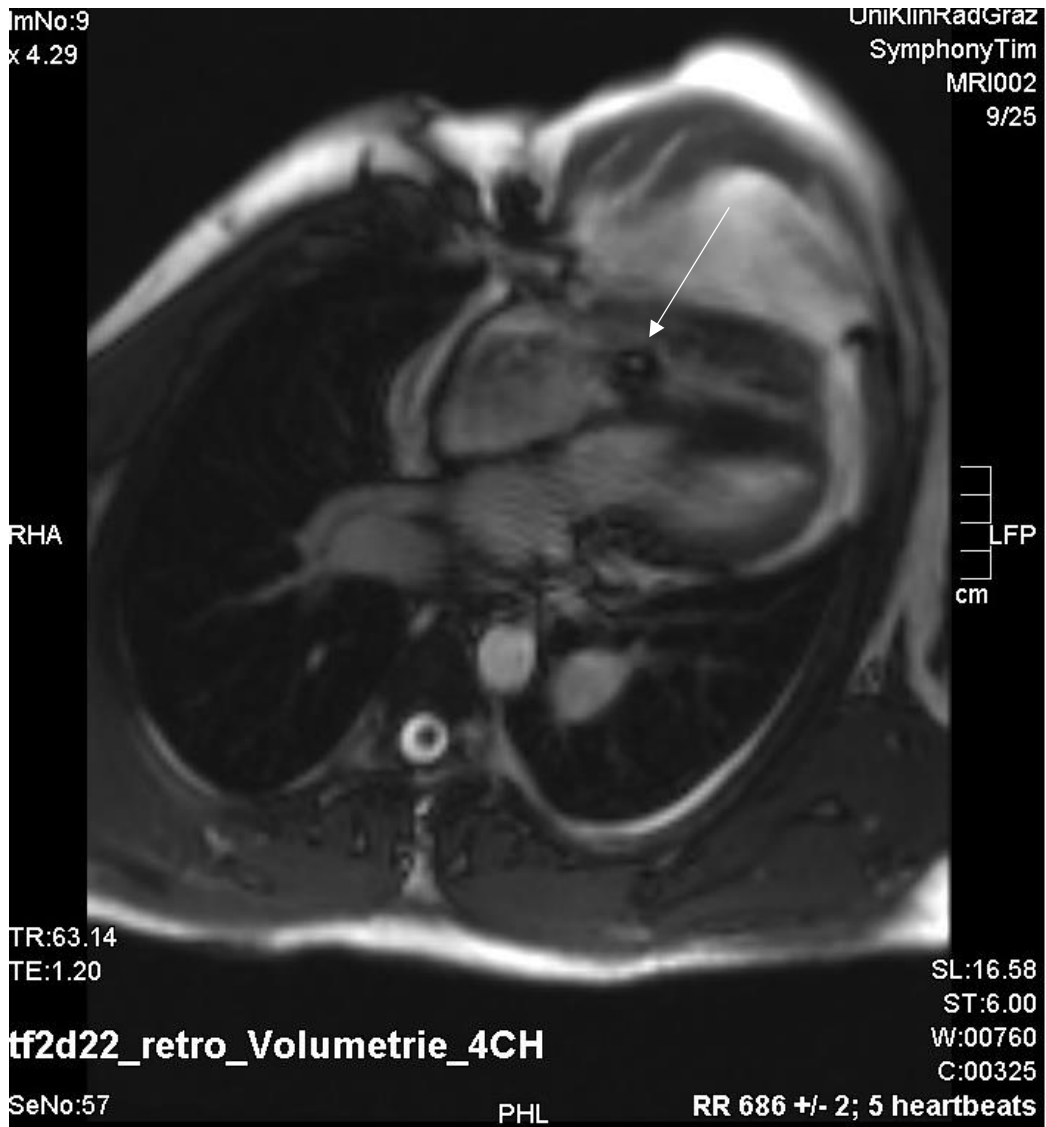


Abbildung 38: PatientIn 5: Vierkammerblick des Herzens mit Sondenartefakt im rechten Ventrikel

PatientIn 6 (DDD-R, St. Jude Medical® Accent MRI™) wies minimale Artefakte ohne Einschränkung der Beurteilbarkeit der Fragestellung „Herzschrittmachersondenperforation“ in zwei von 16 Sequenzen auf:

- Trufi2d_t1_psir_segmented_MAG (siehe **Abbildung 39**)
- Tfl_sr_dyn_160_4sl_iPAT

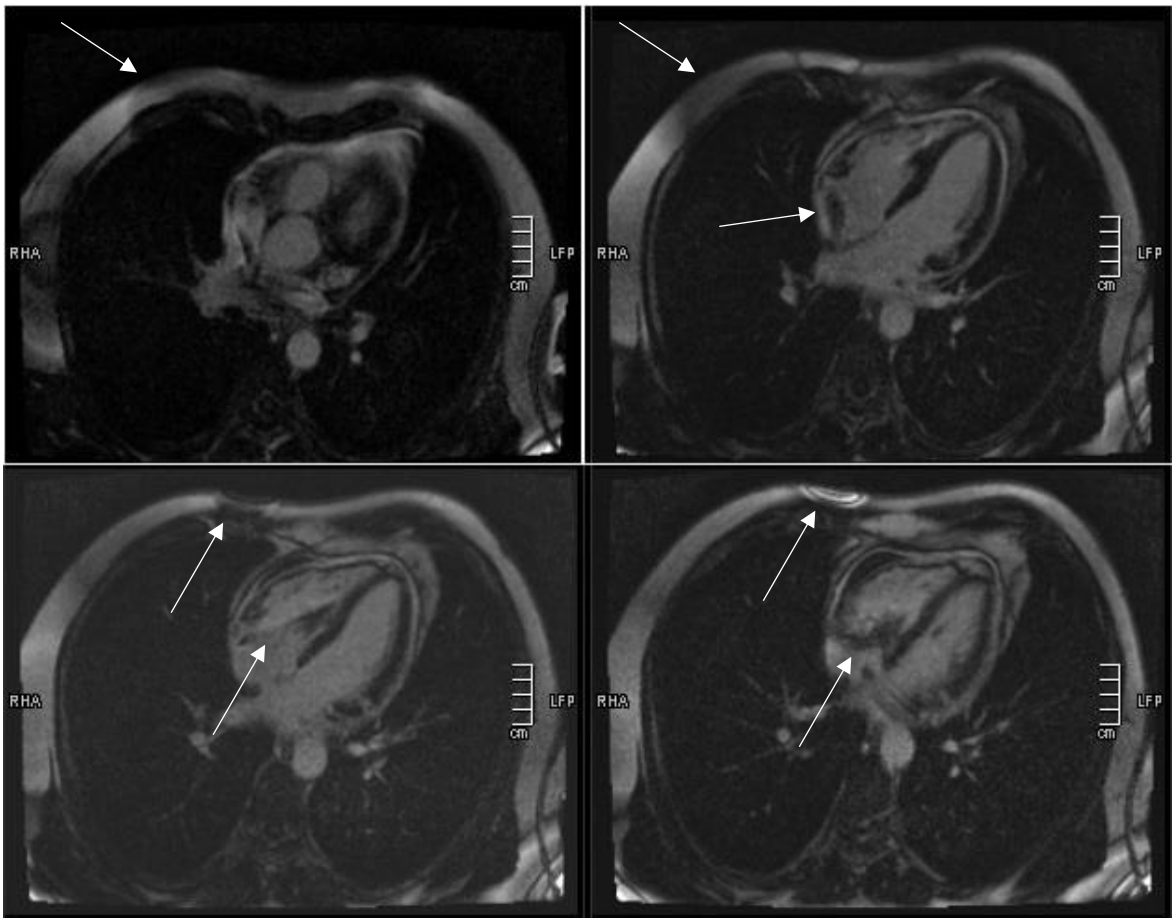


Abbildung 39: *PatientIn 6:* Artefakt der Sequenz *Trufi2d_t1_psir_segmented_MAG* im Untersuchungsfeld Thorax

3.2.2.3 Untersuchungsfeld Lendenwirbelsäule

Eine(r) von vier PatientInnen wies bei der MR-Untersuchung des Untersuchungsfeldes Lendenwirbelsäule Artefakte auf.

Bei *PatientIn 7* (DDD-R, St. Jude Medical® Accent MRI™) kam es bei der MR-Untersuchung der Lendenwirbelsäule zu Artefakten in einer von sieben Sequenzen, jedoch nicht im Untersuchungsfeld und somit ohne Einschränkung der Beurteilbarkeit der Fragestellung „intraspinale Hämatom“. Folgende Sequenz wies Artefakte auf:

- Localizer (siehe **Abbildung 40**)

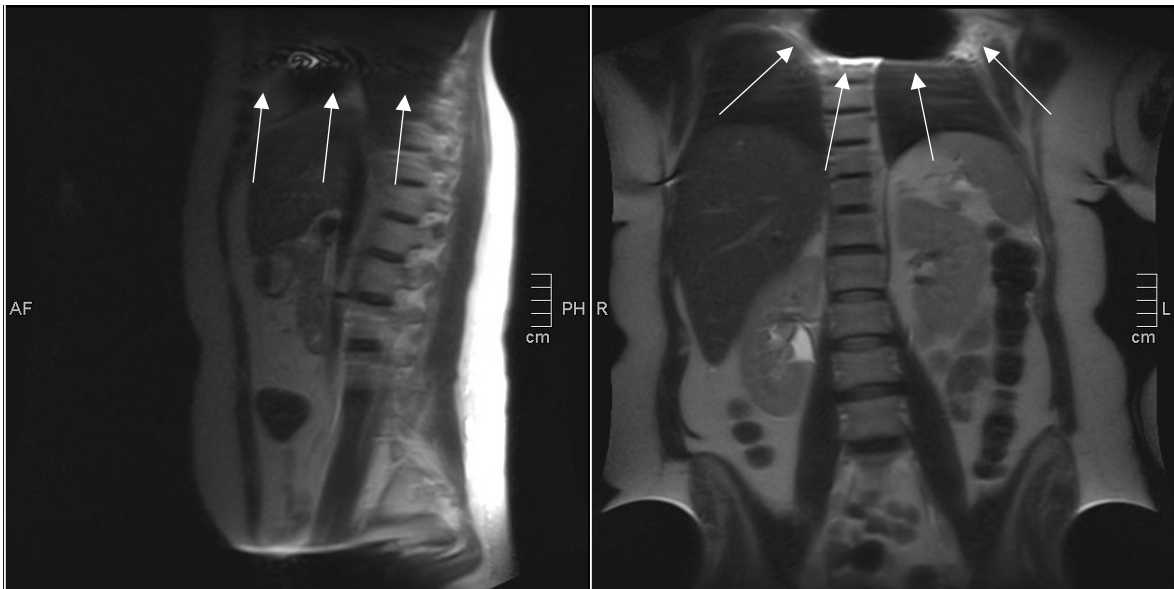


Abbildung 40: PatientIn 7: Artefakt der Sequenz „Localizer“ im Untersuchungsfeld Lendenwirbelsäule

3.3 Statistische Auswertung der Fragebogenuntersuchung

Von insgesamt 39 versendeten Fragebögen wurden 23 (58,97%) beantwortet und zurückgeschickt, 16 (41,03%) wurden nicht beantwortet. Es handelte sich um 5 Frauen ($\hat{=}$ 21,74%) und 18 Männer ($\hat{=}$ 78,26%). Das Alter der teilnehmenden PatientInnen lag zum Zeitpunkt der Fragebogenuntersuchung zwischen 34 Jahre und 88 Jahre. Mittelwert und Standardabweichung sowie Median betragen $64,82 \pm 15,17$ Jahre sowie 69 Jahre. Dabei waren neun PatientInnen ($\hat{=}$ 39,13%) 70 Jahre und älter, 14 PatientInnen ($\hat{=}$ 60,87%) waren jünger als 70 Jahre. Die Zusammensetzung entspricht dem Gesamtkollektiv (siehe **Abbildung 6** und **Abbildung 7**).

PatientInneninformation und Einwilligungserklärung zur Teilnahme an der Beobachtungsstudie sowie der Fragebogen mit Duke Aktivitätsindex und MR-Untersuchung, Lebensqualität können dem **Anhang** entnommen werden.

3.3.1 Duke Aktivitätsindex

Die Gesamtpunktezahll des Duke Aktivitätsindex lag bei 58,20 Punkten, je höher die Punktezahll umso besser die körperliche Leistungsfähigkeit. Vier (17,39%) der 23 an der Fragebogenuntersuchung teilgenommenen PatientInnen erreichten diese Gesamtpunktezahll.

Die körperliche Leistungsfähigkeit mittels metabolischer Äquivalente (MET), berechnet aus dem Duke Aktivitätsindex (DASI) (siehe **2.2.4.1**), lag bei vier PatientInnen (17,39%) < 4 MET („geringe körperliche Leistungsfähigkeit“), bei 19 PatientInnen (82,61%) > 4 MET („moderate oder exzellente körperliche Leistungsfähigkeit“) (siehe **Abbildung 41**).

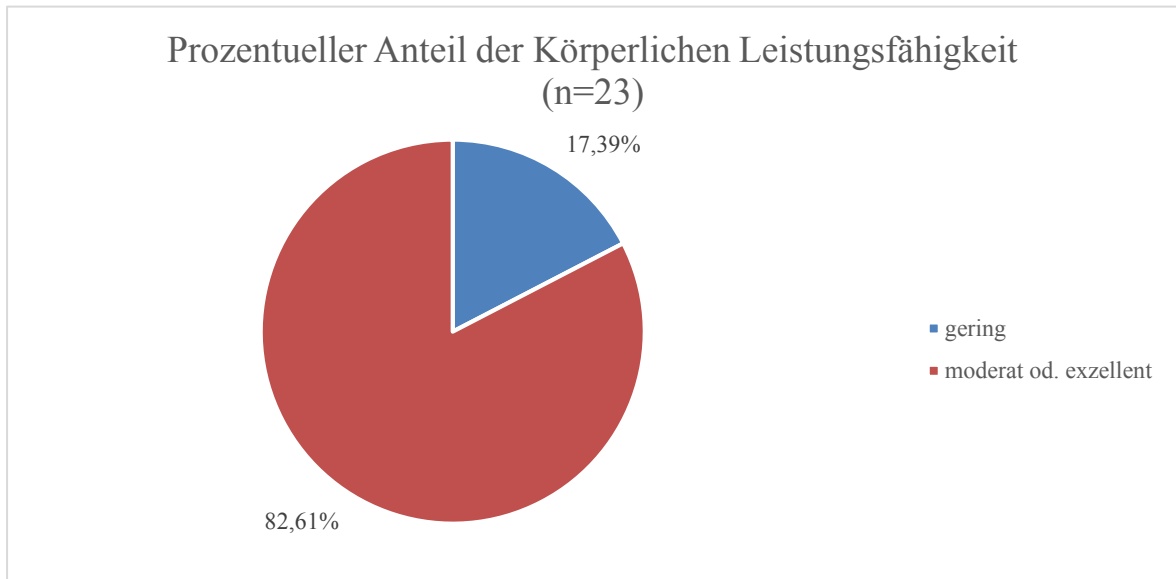


Abbildung 41: Prozentueller Anteil der körperlichen Leistungsfähigkeit

3.3.2 MR-Untersuchung und Lebensqualität

3.3.2.1 Beschwerden im Rahmen der MR-Untersuchung

11 PatientInnen (47,83%) blieben während der MR-Untersuchung subjektiv beschwerdefrei. Die am häufigsten aufgetretene Beschwerde (sieben PatientInnen $\hat{=}$ 30,43%) war Beklemmung, keine(r) der PatientInnen gab Hitzegefühl, Lebensangst oder Luftnot an (siehe **Abbildung 42**).

Unter dem Punkt „sonstige Beschwerden“ wurde von zwei PatientInnen „Platzangst“ angegeben. Weiters führte ein Patient „Unwohlsein“ an, eine andere Patientin „Angst, unangenehmes Gefühl“.

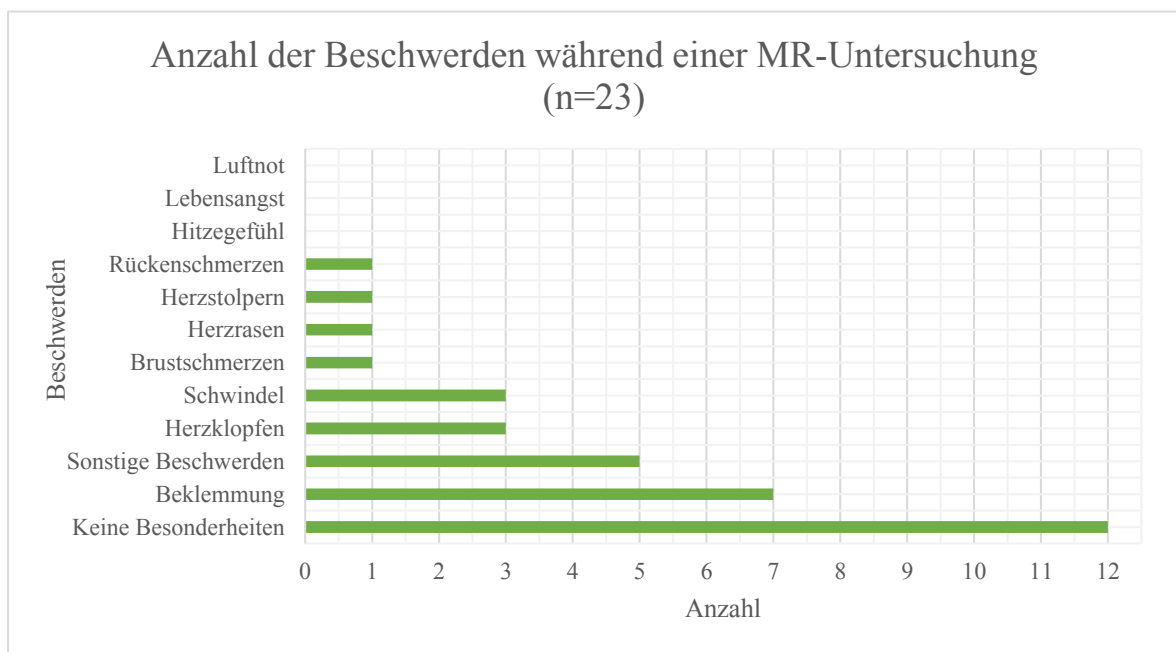


Abbildung 42: Anzahl der Beschwerden während einer MR-Untersuchung

3.3.2.2 Unterschied von MR-Untersuchungen vor und nach Herzschrittmacher-implantation

17 PatientInnen (73,91%), die bereits vor ihrer Schrittmacherimplantation eine oder mehrere MR-Untersuchungen hatten, gaben an, keinen Unterschied zwischen den MR-Untersuchungen mit bzw. ohne Herzschrittmacher bemerkt zu haben. Sechs PatientInnen (26,09%) verspürten einen Unterschied (siehe **Abbildung 43**). Drei der PatientInnen, die Unterschiede wahrnahmen, beschrieben diese im Feld Bemerkung: Ein Patient beschrieb ein „kurzzeitig unangenehmes Gefühl nach der ersten Umprogrammierung“, ein weiterer erwähnte, dass die „MR-Untersuchung laut Biotronik erst vom Bauch abwärts zugelassen“ und „2 Umstellungen in der Cardiologie“ erforderlich seien. Eine weitere Patientin meinte, die MR-Untersuchung mit Herzschrittmacher sei „kürzer“ und „nicht so genau“.

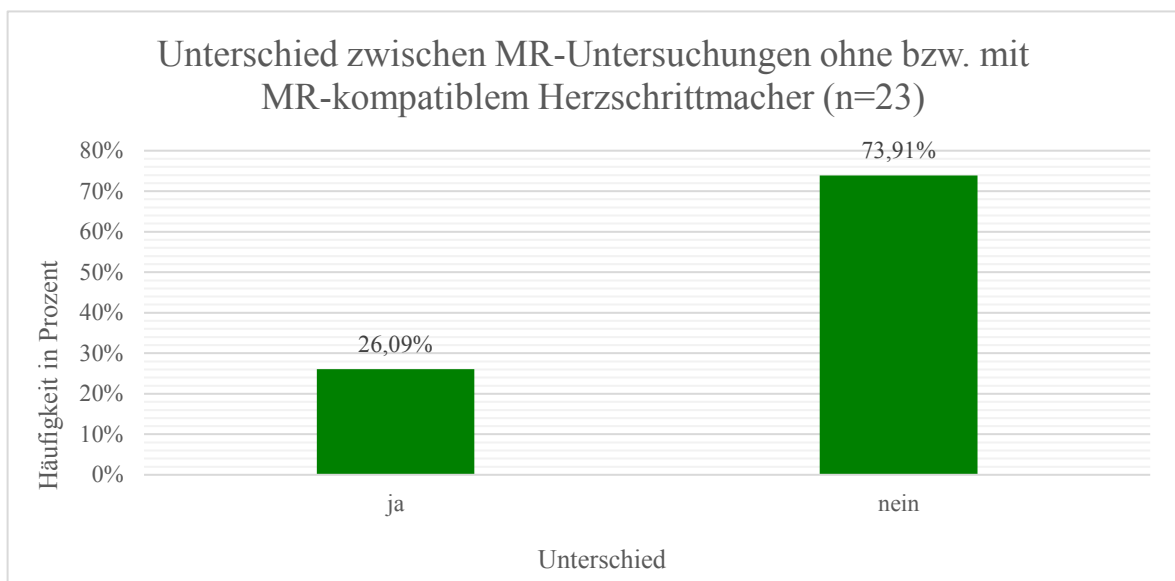


Abbildung 43: Unterschied zwischen MR-Untersuchung ohne bzw. mit MR-kompatiblen Herzschrittmacher

3.3.2.3 Lebensqualität mit MR-kompatiblen Herzschrittmacher

Die am häufigsten vergebene Gesamtnote der Lebensqualität mit MR-kompatiblen Herzschrittmacher war gut (9 PatientInnen \cong 39,13%), gefolgt von sehr gut (7 PatientInnen \cong 30,43%). Keine(r) der PatientInnen vergab die Gesamtnote sehr schlecht (siehe **Abbildung 44**).

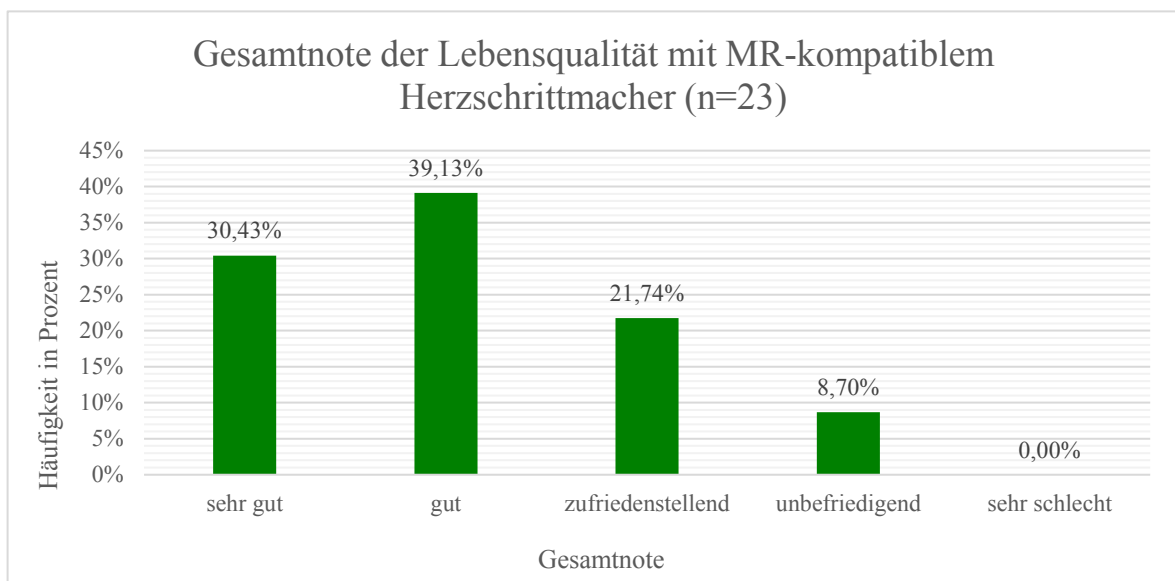


Abbildung 44: Gesamtnote der Lebensqualität mit MR-kompatiblen Herzschrittmacher

4 DISKUSSION

4.1 Interpretation der Ergebnisse

Diese Arbeit wurde durchgeführt, um eine bessere Kenntnis über Indikationen, MR-Beurteilbarkeit, Auftreten von diagnoselimitierenden Artefakten und eventuelle Nebenwirkungen im Rahmen von MR-Untersuchungen zu erhalten. Ebenso sollte die Lebensqualität mit MR-tauglichen CIEDs untersucht werden.

Die Daten der PatientInnen beruhen auf einer vorgefertigten Liste, die alle MR-Untersuchungen bei PatientInnen mit MR-kompatiblen CIED an der Klinischen Abteilung für Radiologie des Universitätsklinikum Graz enthielt. Ein Patient hatte zwei MR-Untersuchungen zu unterschiedlichen Zeitpunkten und mit unterschiedlicher Indikationsstellung. Somit ergab sich eine Gesamtzahl von 39 PatientInnen und 40 MR-Untersuchungen.

4.1.1 Indikationen

Die Indikationen der Herzschrittmacherimplantation waren sehr unterschiedlich. Daher wurden sie einer der folgenden drei Gruppen zugeteilt: Bradykardie, Tachykardie und Bradykardie-Tachykardie-Syndrom (siehe **3.1.2.1**). Am häufigsten erfolgte die Implantation eines MR-kompatiblen CIED bei PatientInnen mit Bradykardie.

Eine Vereinheitlichung der MR-Indikationen war nicht möglich, da einerseits viele Indikationen nicht angegeben waren, andererseits alle angegebenen Indikationen stark variierten. Somit erfolgte die Zuteilung der MR-Indikationen zu den jeweiligen Untersuchungsfeldern (siehe **3.1.3.4**).

4.1.2 Ergebnisse

4.1.2.1 Herzschrittmacher-Modi

Die Auswertung der Programmierungen zeigten, dass drei der 40 MR-Untersuchungen bei einem ICD mit VDD-Schrittmachermodus durchgeführt wurden (siehe **3.1.2.2**). Die Studie hat somit mehr Aussagekraft über MR-Untersuchungen bei TrägerInnen eines MR-kompatiblen Herzschrittmachers als über MR-Untersuchungen bei TrägerInnen eines MR-kompatiblen ICDs.

4.1.2.2 Messwerte

Die Auswertung der Messwerte (Sondenimpedanz, Reizschwelle, P- bzw. R-Welle sowie Batteriestatus; siehe **3.1.2.5** bis **3.1.2.8**) ergab eine regelrechte Schrittmacherfunktion vor und nach der MR-Untersuchung und somit keine Veränderung der Schrittmacherfunktion durch MR-Untersuchungen. Dies ist auch mit der Literatur von Wilkoff et. al. aus dem Jahr 2011 vereinbar (34).

4.1.2.3 Intervall zwischen Herzschrittmacherimplantation und MR-Untersuchung

Die meisten MR-Untersuchungen fanden innerhalb von 12 Monaten nach Herzschrittmacherimplantation statt (52,50%) (siehe **3.1.3.1**). Bei einem Patienten wurde die MR-Untersuchung 5,86 Wochen nach Herzschrittmacherimplantation durchgeführt. Hier wurde der in der Literatur beschriebene Mindestabstand von sechs Wochen zwischen Implantation und MR-Untersuchung knapp unterschritten (2,29). Diese MR-Untersuchung (Medtronic® Advisa DR MRI™, DDD-R, Untersuchungsfeld Schädel) verlief jedoch ohne Zwischenfälle, es waren keine Artefakte nachweisbar. Bei der Fragebogenuntersuchung gab die/der PatientIn keine Besonderheiten bzw. keinen Unterschied zu MR-Untersuchung vor der Herzschrittmacherimplantation an.

4.1.2.4 Spezifisches Absorptionsrate

Die Untersuchungsfelder wurden auf zehn Körperregionen zusammengefasst. Da die spezifische Absorptionsrate laut IEC und FDA bezogen auf Kopf, Rumpf und Extremitäten angegeben wird (19,20), erfolgte zusätzlich die Zuteilung dieser zehn Körperregionen zu jenen drei Bereichen. Die Auswertung der spezifischen Absorptionsrate ergab Werte von 0,452W/kg bis 31,409W/kg im Bereich von Kopf oder Rumpf und Werte von 1,066W/kg bis 22,526W/kg im Bereich der Extremitäten (siehe 3.1.3.7). Die von der IEC vorgegebenen maximalen Grenzwerte für normale Untersuchungslevel von MR-Untersuchungen liegen bei Kopf und Rumpf jedoch bei 10 W/kg und bei Extremitäten bei 20W/kg (19).

Insgesamt überschritten sechs MR-Untersuchungen den maximalen Grenzwert für Kopf bzw. Rumpf, eine den für Extremitäten. Fünf dieser PatientInnen beantworteten den Fragebogen und gaben Herzklopfen (1 PatientIn), Herzstolpern (1 PatientIn), Herzrasen (1 PatientIn), Beklemmung (2 PatientInnen), Brustschmerzen (1 PatientIn), Rückenschmerzen (1 PatientIn) oder Schwindel (1 PatientIn) an. Zwei PatientInnen gaben an, „nichts Besonderes“ verspürt zu haben. Drei PatientInnen gaben an, einen Unterschied zwischen MR-Untersuchungen vor und nach Herzschrittmacherimplantation verspürt zu haben.

Drei dieser sieben MR-Untersuchungen wiesen Artefakte auf (PatientIn 5, PatientIn 6, PatientIn 7; siehe 3.2.2.2 und 3.2.2.3), wobei die Beurteilbarkeit bei keiner Untersuchung eingeschränkt war.

Möglicherweise hat ein einmaliges Überschreiten der SAR-Werte keine Auswirkungen auf die Funktion des CIED. Man könnte somit eventuell auch eine MR-Untersuchung im first level Modus (siehe 1.4.4) in Erwägung ziehen.

4.1.2.5 Artefakte und Beurteilbarkeit

Bei sieben von 39 MR-Untersuchungen waren Artefakte erkennbar, keine davon wies eine eingeschränkte Beurteilbarkeit auf (siehe 3.2.1 und 3.2.2). Die Magnetfeldstärke betrug in allen 39 MR-Untersuchungen 1,5T.

Von insgesamt sechs MR-Untersuchungen des *Untersuchungsfeldes Hals* wiesen vier davon Artefakte auf, jedoch ohne Beeinträchtigung der Beurteilbarkeit der Fragestellung. Es konnte kein Zusammenhang zwischen Artefakten und Herzschrittmachergeräten nachgewiesen werden, da zum Beispiel mit Medtronic® Advisa DR MRI™ bei einer Untersuchung Artefakte auftraten, bei einer weiteren Untersuchung jedoch nicht.

Im *Untersuchungsfeld Lendenwirbelsäule* traten bei einer von insgesamt vier MR-Untersuchungen Artefakte auf, wobei die Beurteilbarkeit nicht eingeschränkt war. Hier handelte es sich um das Gerät St. Jude Medical® Accent MRI™, während es sich bei jenen Untersuchungen ohne Artefaktgeschehen um die Geräte Biotronik® Evia DR-T MRI™, Medtronic® Advisa DR MRI™ und Medtronic® EnRhythm MRI™ handelte.

Insgesamt wurden zwei MR-Untersuchungen im *Untersuchungsfeld Thorax* durchgeführt. Beide Male wurden Bilder des Herzens aufgenommen, beide Male traten Artefakte auf, wobei bei einer MR-Untersuchung die Artefakte viel geringer ausfielen als bei der zweiten. Die Beurteilbarkeit der Fragestellung war jedoch in beiden Fällen nicht eingeschränkt. Beim Herzschrittmacher der MR-Untersuchung mit deutlicheren Artefakten handelte es sich um Medtronic® EnRhythm MRI™, das MR-Untersuchungsgerät war MAGNETOM® Symphony® and Tim. Der andere Patient war Träger des Geräts St. Jude Medical® Accent MRI™ und erhielt die MR-Untersuchung mittels MAGNETOM® Espree. Ein weiterer Unterschied liegt in der Lage der Herzschrittmachertasche. Die Schrittmachertasche des Patienten mit geringeren Artefakten war sehr hoch rechts angelegt, während jene der Untersuchung mit deutlicheren Artefakten links und tiefer präpariert wurde (siehe **Abbildung 45**). Das bestätigt die Empfehlung von Khal et. al. aus dem Jahr 2013, Herzschrittmacher oder ICDs rechtsseitig zu implantieren, um Artefakte einer MR-Untersuchung zu reduzieren (35).

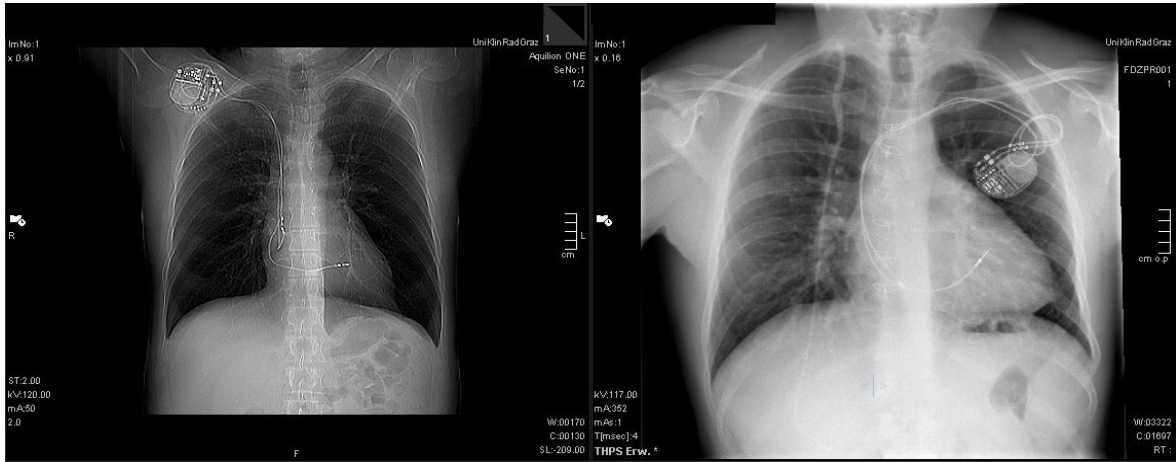


Abbildung 45: Lage der Schrittmachertasche mit geringerem Artefaktgeschehen (links) und Lage der Schrittmachertasche bei deutlicherem Artefaktgeschehen (rechts)

4.1.3 Langzeitverlauf

An der Fragebogenuntersuchung bezüglich der Lebensqualität nach Implantation eines MR-kompatiblen Herzschrittmachers nahmen 23 von 39 ($\cong 58,97\%$) PatientInnen teil (siehe **3.3**). Keiner vergab die Note sehr schlecht, nur zwei PatientInnen im Alter von 81 Jahren und 88 Jahren empfanden ihre Lebensqualität mit MR-kompatiblen Herzschrittmacher, ohne Angabe von Details, als unbefriedigend.

Sowohl die Schrittmacherimplantation als auch die MR-Untersuchung erfolgten am häufigsten in der 8. Lebensdekade (siehe **Abbildung 6** und **Abbildung 7**) weshalb eine Aufschlüsselung in Fragen bezüglich möglicher Einschränkungen der körperlichen Aktivität einerseits und der Lebensqualität mit MR-tauglichem Herzschrittmacher andererseits durchgeführt wurde.

Elf PatientInnen ($\cong 47,83\%$) verspürten während der MR-Untersuchung „Nichts Besonderes“. Nur sechs der 23 PatientInnen ($\cong 26,09\%$) gaben an, einen Unterschied zwischen den MR-Untersuchungen vor und nach Herzschrittmacherimplantation verspürt zu haben, zehn der 23 PatientInnen ($\cong 43,48\%$) klagten jedoch über konkrete Beschwerden (siehe **Abbildung 42**). Aus den empfundenen Beschwerden der PatientInnen während der

MR-Untersuchung lässt sich schwer rückschließen, ob diese Beschwerden nicht auch ohne MR-kompatiblen Herzschrittmacher aufgetreten wären.

4.2 Limitationen

Eine Limitation dieser Studie ist die geringe Fallzahl von 40 MR-Untersuchungen bei 39 PatientInnen mit MR-tauglichem Herzschrittmacher. Dies ist auf die, erst seit 2008 bestehenden, MR-kompatiblen Herzschrittmacher sowie in erster Linie auf die Verteilung von MR-Untersuchungen auf mehrere Institute in Graz bzw. in der Steiermark zurückzuführen. Ein weiteres Problem bezüglich Datenakquisition stellte zusätzlich der eingeschränkte Zugriff des openMedocs-Einstiegs für Studenten/Diplomanten dar, da viele Arztbriefe oder Dokumentationen anderer Abteilungen nicht eingesehen werden konnten. Zusätzlich erschwerte wurde die Arbeit durch fehlende genaue Dokumentation implantierter Sondentypen und Messdaten in älteren OP-Berichten der Herzschrittmacherimplantation. In der jährlichen Kontrolluntersuchung des Herzschrittmachers waren die zu bestimmenden Parameter (Sondenimpedanz, Batteriestatus usw.) immer qualitativ, aber oftmals nicht quantitativ angegeben.

Ein/e PatientIn hatte im untersuchten Zeitraum eine weitere MR-Untersuchung, die jedoch nicht auf der vorgefertigten, zur Datenauswertung herangezogenen, Liste aufgeführt war. Möglicherweise fanden noch mehr MR-Untersuchungen bei PatientInnen mit MR-kompatiblen Herzschrittmacher im untersuchten Zeitraum statt, die nicht auf der Liste dokumentiert wurden.

Aufgrund der hohen Anzahl an Sequenzen einer MR-Untersuchung und der damit verbundenen Werte (u.a. SAR) können, trotz gewissenhaftester Arbeit, Fehler im Rahmen der Daten-Akquisition nicht ausgeschlossen werden.

4.3 Conclusio

In dieser Studie wurde dargelegt, dass es während der MR-Untersuchung bei den PatientInnen zu keinerlei Funktionsstörungen der MR-kompatiblen Herzschrittmacher kam. Die Auswertung entsprach dabei den in der Literatur beschriebenen Ergebnisse (34). Somit ist von einem komplikationslosen Verlauf bei MR-Untersuchungen von MR-kompatiblen HerzschrittmacherpatientInnen unter Einhaltung der Sicherheitsrichtlinien auszugehen.

Ein Problem stellt das Auftreten von Artefakten, speziell bei thorakalen MR-Untersuchungen, dar. Diese könnten jedoch nach Möglichkeit durch Anwendung bestimmter, weniger störungsanfälliger Sequenzen und durch ein hohes, subclaviculäres, und rechtsseitiges Anlegen der Herzschrittmachertasche minimiert werden.

5 LITERATURVERZEICHNIS

- (1) Aquilina O. A brief history of cardiac pacing. *Images Paediatr Cardiol* 2006 Apr-Jun;8(2):17-81.
- (2) Bhandiwad AR, Cummings KW, Crowley M, Woodard PK. Cardiovascular magnetic resonance with an MR compatible pacemaker. *J Cardiovasc Magn Reson* 2013 Feb 15;15:18.
- (3) Kalin R, Stanton MS. Current clinical issues for MRI scanning of pacemaker and defibrillator patients. *Pacing Clin Electrophysiol* 2005 Apr;28(4):326-328.
- (4) Nordbeck P, Ertl G, Ritter O. Magnetic resonance imaging safety in pacemaker and implantable cardioverter defibrillator patients: how far have we come? *Eur Heart J* 2015 Jun 21;36(24):1505-1511.
- (5) Ferreira A, Costa F, Tralhão A, Marques H, Cardim N, Adragão P. MRI-conditional pacemakers: current perspectives. *Med Devices (Auckl)* 2014;7:115-124.
- (6) Fröhlig G, Carlsson J, Jung J, et al editors. *Herzschrittmacher- und Defibrillator-Therapie - Indikation-Programmierung-Nachsorge. 2., vollständig überarbeitete und aktualisierte Auflage* ed. Stuttgart: Georg Thieme Verlag KG; 2013.
- (7) Werner J editor. *Biomedizinische Technik - Automatisierte Therapiesysteme. Band 9* ed. Berlin: Walter de Gruyter; 2014.
- (8) Hombach V editor. *Interventionelle Kardiologie, Angiologie und Kardiovaskularchirurgie - Technik-Klinik-Therapie*. Stuttgart: F.K. Schattauer Verlagsgesellschaft mbH; 2001.
- (9) Markewitz A, Hemmer W. *Handbuch der Schrittmacher-Therapie*. München: medplan Verlag; 1992.
- (10) Brignole M, Auricchio A, Baron-Esquivias G, Bordachar P, Boriani G, Breithardt O, et al. 2013 ESC Guidelines on cardiac pacing and cardiac resynchronization therapy. *Eur Heart J* 2013 The Oxford University Press;34(29):2281-2329.
- (11) Bernstein AD, Daubert JC, Fletcher RD, Hayes DL, Lüderitz B, Reynolds DW, et al. The revised NASPE/BPEG generic code for antibradycardia, adaptive-rate, and multisite pacing. *North American Society of Pacing and Electrophysiology/British*

- Pacing and Electrophysiology Group. *Pacing Clin Electrophysiol* 2002 Feb;25(2):260-264.
- (12) Schuster HP, Trappe HJ. *EKG-Kurs für Isabel*. 5. überarbeitete und erweiterte Auflage ed. Stuttgart: Georg Thieme Verlag KG; 2009.
- (13) Epstein AE, DiMarco JP, Ellenbogen KA, Estes NAM 3rd, Freedman RA, Gettes LS, et al. 2012 ACCF/AHA/HRS focused update incorporated into the ACCF/AHA/HRS 2008 guidelines for device-based therapy of cardiac rhythm abnormalities: a report of the American College of Cardiology Foundation/American Heart Association Task Force on Practice Guidelines and the Heart Rhythm Society. *Circulation* 2013 Jan 22;127(3):e283-352.
- (14) Bernstein AD, Camm AJ, Fisher JD, Fletcher RD, Mead RH, Nathan AW, et al. North American Society of Pacing and Electrophysiology policy statement. The NASPE/BPEG defibrillator code. *Pacing Clin Electrophysiol* 1993 Sep;16(9):1776-1780.
- (15) Schwarzmüller-Erber G, Silberstein E editors. *Angewandte Magnetresonanztomographie - Grundlagen und Anwendungen*. Wien: Facultas Verlags- und Buchhandels AG; 2010.
- (16) Reiser M, Kuhn FP, Debus J editors. *Duale Reihe Radiologie*. 3. vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage ed. Stuttgart: Georg Thieme Verlag KG; 2011.
- (17) © Siemens AG. MR-Glossar. 2008; Available at: http://www.healthcare.siemens.com/siemens_hwem-hwem_sxxa_websites-context-root/wcm/idc/groups/public/@global/@imaging/@mri/documents/download/mdaw/mtm3/~edisp/mr_glossar-00016928.pdf. Accessed 02/15, 2016.
- (18) © Siemens AG. *Magnete, Spins und Resonanzen - Eine Einführung in die Grundlagen der Magnetresonanztomographie*. 2003; Available at: http://www.healthcare.siemens.com/siemens_hwem-hwem_sxxa_websites-context-root/wcm/idc/groups/public/@global/@imaging/@mri/documents/download/mdaw/mtu3/~edisp/magnete_spins_und_resonanzen-00016931.pdf. Accessed 02/15, 2016.
- (19) Bottomley PA. Turning Up the Heat on MRI. *J Am Coll Radiol* 2008 Jul;5(7):853-855.
- (20) Lin JC editor. *Electromagnetic fields in biological systems*. Boca Raton, Florida: CRC Press Taylor & Francis Group; 2012.

- (21) Brown MA, Semelka RC. MR imaging abbreviations, definitions, and descriptions: a review. *Radiology* 1999 Dec;213(3):647-662.
- (22) Currie S, Hoggard N, Craven IJ, Hadjivassiliou M, Wilkinson ID. Understanding MRI: basic MR physics for physicians. *Postgrad Med J* 2013 Apr;89:209-223.
- (23) Bitar R, Leung G, Perng R, Tadros S, Moody AR, Sarrazin J, et al. MR pulse sequences: what every radiologist wants to know but is afraid to ask. *Radiographics* 2006 Mar-Apr;26(2):513-537.
- (24) Forsting M, Uhlenbrock D, Wanke I. MRT der Wirbelsäule und des Spinalkanals. In: Mödder U, editor. *Referenz-Reihe Radiologie. 2. vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage* ed. Stuttgart: Georg Thieme Verlag KG; 2009.
- (25) Krupa K, Bekiesińska-Figatowska M. Artifacts in Magnetic Resonance Imaging. *Pol J Radiol* 2015;80:93-106.
- (26) Shokrollahi H. Contrast agents for MRI. *Mater Sci Eng C Mater Biol Appl* 2013 Dec 1;33(8):4485-4497.
- (27) Schubert R editor. *Indikationen zur MRT - Leitfaden für Zuweiser*. Berlin: ABW Wissenschaftsverlag GmbH; 2008.
- (28) Roguin A, Schwitter J, Vahlhaus C, Lombardi M, Brugada J, Vardas P, et al. Magnetic resonance imaging in individuals with cardiovascular implantable electronic devices. *Europace* 2008 Mar;10(3):336-346.
- (29) Sommer T, Luechinger R, Barkhausen J, Gutberlet M, Quick HH, Fischbach K. German Roentgen Society Statement on MR Imaging of Patients with Cardiac Pacemakers. *Rofo* 2015 Sep;187(9):777-787.
- (30) Shinbane JS, Colletti PM, Shellock FG. Magnetic resonance imaging in patients with cardiac pacemakers: era of "MR Conditional" designs. *J Cardiovasc Magn Reson* 2011 Oct 27;13:63.
- (31) Hlatky MA, Boineau RE, Higginbotham MB, Lee KL, Mark DB, Califf RM, et al. A brief self-administered questionnaire to determine functional capacity (the Duke Activity Status Index). *Am J Cardiol* 1989 Sep 15;64(10):651-654.
- (32) Osterhues HH, Baer FM, Kelm M, Irmer M, Ivens K, Leschke M, et al. Kommentar zu den Leitlinien zur perioperativen kardiovaskulären Evaluation bei nichtkardialer Chirurgie der ACC/AHA - Leitlinien-Update 2002. *Der Kardiologe* 2007;1(1):18-30.

- (33) World Health Organization. BMI classification. 2016; Available at: http://apps.who.int/bmi/index.jsp?introPage=intro_3.html. Accessed 03/21, 2016.
- (34) Wilkoff BL, Bello D, Taborsky M, Vymazal J, Kanal E, Heuer H, et al. Magnetic resonance imaging in patients with a pacemaker system designed for the magnetic resonance environment. *Heart Rhythm* 2011 Jan;8(1):65-73.
- (35) Khan JN, Singh A, Pakkal MV, McCann GP. MRI-safe pacemakers and reduction of cardiac MRI artefacts with right-sided implantation. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging* 2013 Aug;14(8):830.
- (36) Weishaupt D, Bremerich J, Duru F, Hoppe H, Rizzo E, Votik P, et al. Pacemakers and magnetic resonance imaging: Current status and survey in Switzerland. *Swiss Med Wkly* 2011 Feb 3;141:w13147.

ANHANG

Duke Aktivitätsindex

Name: _____

Frage	Aktivität	Ja	Nein
1	Können Sie sich selbst versorgen (Essen, Anziehen, Baden, Toilettenbesuch)?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2	Können Sie sowohl in der Wohnung/Haus als auch rund um Ihre Wohnung/Haus gehen?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3	Können Sie einen oder zwei Häuserblöcke weit in der Ebene gehen?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4	Können Sie ein Stockwerk hoch oder einen Hügel bergauf gehen?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5	Können Sie eine kurze Strecke laufen?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6	Können Sie leichte Hausarbeit durchführen, wie Staubwischen oder Geschirr abwaschen?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7	Können Sie mittelschwere Hausarbeit durchführen, wie Staubsaugen, Boden wischen oder das Tragen von Einkäufen?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8	Können Sie schwere Hausarbeit durchführen, wie den Boden schrubben oder schwere Möbel heben und bewegen?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
9	Können Sie Gartenarbeit durchführen, wie Laub rechnen, Unkraut jäten oder Rasenmähen?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
10	Können Sie an mittelschweren Freizeitaktivitäten teilnehmen, wie Golf spielen, Tanzen, Tennis (Doppel-), Bowling oder Fußball spielen?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
11	Können Sie an anstrengenden Freizeitaktivitäten teilnehmen, wie Schwimmen, Tennis (Einzel-), Fußball, Basketball oder Schifahren?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

MR-Untersuchung, Lebensqualität

Frage

- 1 Während der MR-Untersuchung verspürte ich:
- Herzklopfen Herzstolpern (unregelmäßigen Herzschlag) Herzrasen (sehr schnellen Herzschlag)
- Beklemmung Hitzegefühl Luftnot Lebensangst
- Brustschmerzen Rückenschmerzen Schwindelgefühl
- Sonstiges: _____ Nichts besonderes
- 2 Wieviele MR-Untersuchungen hatten Sie bisher? _____
- 3 Hatten Sie bereits vor Implantation eines MR-tauglichen Herzschrittmachers eine MR-Untersuchung Ja Nein
- 4 Wenn ja, gab es einen Unterschied zwischen MR-Untersuchung ohne beziehungsweise mit Herzschrittmacher? Ja Nein
- Bemerkung: _____
- 5 Vergeben Sie bitte eine Gesamtnote für Ihre Lebensqualität mit MR-Schrittmacher:
- Sehr gut Gut Zufriedenstellend Unbefriedigend Sehr schlecht

PatientInneninformation und Einwilligungserklärung zur Teilnahme an der Beobachtungsstudie

MR-Indikation, Ergebnisse und Langzeitverlauf bei PatientInnen nach Implantation eines MR-tauglichen Herzschrittmachersystems

Sehr geehrte Teilnehmerin, sehr geehrter Teilnehmer!

Wir laden Sie ein an der oben genannten Beobachtungsstudie teilzunehmen. Dieses Schreiben dient dazu Sie zu benachrichtigen, dass Sie in Kürze einen Brief des LKH Graz (Abteilung für Herzchirurgie) erhalten werden, in welchem Ihnen einige Fragen gestellt werden. Dieser Brief bildet einen wesentlichen Beitrag zur oben genannten Studie und Sie könnten mit Ihrer Teilnahme den Behandlungserfolg zukünftiger Patienten optimieren.

Ihre Teilnahme an dieser Studie erfolgt freiwillig. Sie können jederzeit ohne Angabe von Gründen aus der Studie ausscheiden. Die Ablehnung der Teilnahme oder ein vorzeitiges Ausscheiden aus dieser Studie hat keine nachteiligen Folgen für Ihre medizinische Betreuung.

Zu dieser Beobachtungsstudie, sowie zur Patienteninformation und Einwilligungserklärung wurde von der zuständigen Ethikkommission eine befürwortende Stellungnahme abgegeben.

1. Was ist der Zweck dieser Studie?

Wir möchten in dieser Studie den Langzeitverlauf und das chirurgische und radiologische Management, sowie die Lebensqualität von PatientInnen nach Implantation eines MRT-kompatiblen Herzschrittmachers untersuchen.

2. Wie läuft die Beobachtungsstudie ab?

Die Studie wird an unserer Klinik durchgeführt. Insgesamt werden etwa 100 Personen daran teilnehmen. Ihr zeitlicher Aufwand beträgt maximal 10 Minuten (Fragebogen). Es werden keine zusätzlichen Maßnahmen durchgeführt, sondern lediglich Daten aufgezeichnet und ausgewertet, die im Rahmen Ihrer medizinischen Versorgung angefallen sind.

Sie werden gebeten, einen Fragebogen auszufüllen und diesen an uns kostenfrei zu retournieren.

3. Worin liegt der Nutzen einer Teilnahme an der Beobachtungsstudie?

Es ist nicht zu erwarten, dass Sie aus Ihrer Teilnahme an dieser Studie gesundheitlichen Nutzen ziehen werden, aber möglicherweise werden künftige Patienten mit der gleichen Erkrankung von den Ergebnissen profitieren.

4. Gibt es Risiken, Beschwerden und Begleiterscheinungen?

Nein.

5. In welcher Weise werden die im Rahmen dieser Beobachtungsstudie gesammelten Daten verwendet?

Sofern gesetzlich nicht etwas anderes vorgesehen ist, haben nur die Studienärzte und deren Mitarbeiter Zugang zu den vertraulichen Daten, in denen Sie namentlich genannt werden („personenbezogene“ Daten). Weiters können ggf. Beauftragte von in- und ausländischen Gesundheitsbehörden, der zuständigen Ethikkommission und Personen, die vom Studienleiter der Studie mit der Kontrolle der Datenqualität beauftragt wurden, Einsicht in diese Daten nehmen, um die Richtigkeit der Aufzeichnungen zu überprüfen. Diese Personen sind zur Verschwiegenheit verpflichtet.

Die Weitergabe der Daten erfolgt ausschließlich zu statistischen Zwecken und Sie werden ausnahmslos nicht namentlich genannt. Auch in etwaigen wissenschaftlichen Veröffentlichungen der Daten dieser Studie werden Sie nicht namentlich genannt.

Die Bestimmungen des Datenschutzgesetzes in der geltenden Fassung werden eingehalten.

Name der Kontaktperson für weitere Fragen: Univ. Ass. OA Dr. Ingeborg Keeling
Erreichbar unter: 0316 385 82820

6. Einwilligungserklärung

Name des Patienten: Geb.Datum:

Ich habe dieses Informationsblatt gelesen und verstanden. Alle meine Fragen wurden beantwortet und ich habe zurzeit keine weiteren Fragen mehr.

Mit meiner persönlich datierten Unterschrift gebe ich hiermit freiwillig mein Einverständnis, dass meine Daten gespeichert und ohne direkten Personenbezug für wissenschaftliche Zwecke verwendet werden dürfen. Mir ist bekannt, dass zur Überprüfung der Richtigkeit der Datenaufzeichnung Beauftragte der zuständigen Behörden und der Ethikkommission, sowie mit der Kontrolle der Datenqualität beauftragte Personen Einblick in meine personenbezogenen Krankheitsdaten nehmen dürfen.

Ich weiß, dass ich diese Zustimmungen jederzeit und ohne Angabe von Gründen widerrufen kann.

.....
(Datum und Unterschrift des Patienten)

.....
(Datum, Name und Unterschrift des verantwortlichen Arztes)

Wir möchten uns schon im Voraus für Ihre Teilnahme bedanken und verbleiben mit freundlichen Grüßen

Univ. Ass. OA Dr. Ingeborg Keeling
Ass. Prof. Dr. Manuela Aschauer
Alexandra Hirn, cand. med.