

Aus der Herzchirurgischen Abteilung des
Chirurgischen Klinikums München Süd
Akademisches Lehrkrankenhaus
der Universität München
Direktor: PD Dr. Peter Lamm

**Vergleich von Impedanz-Messungen an
Herzschrillmacher-Sonden vor und nach
Niederfeld-MRT-Untersuchung**

Dissertation zum Erwerb des Doktorgrades der Medizin
an der Medizinischen Fakultät der
Ludwig-Maximilians-Universität
zu München

vorgelegt von
Bettina Isolde Hüttl
geb. Knobloch
aus
München
2023

Mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät der
Universität München

Berichterstatter:	PD Dr. Peter Lamm
Mitberichterstatter:	Prof. Dr. Heidi L. Estner Prof. Dr. Olaf Dietrich
Mitbetreuung durch den promovierten Mitarbeiter:	Dr. Michael Hinz
Dekan:	Prof. Dr. med. Thomas Gudermann
Tag der mündlichen Prüfung:	02.02.2023

Meinen Eltern

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	2
2	Zielsetzung.....	5
3	Material und Methoden.....	6
3.1	Auswahl des Patientenkollektivs.....	6
3.2	Ablauf der MR-Untersuchung	6
3.3	Datenerfassung	7
3.3.1	Basisdaten	7
3.3.2	Abgeleitete Daten.....	7
3.4	Statistische Auswertung.....	8
3.4.1	Allgemeines	8
3.4.2	Testmethodik.....	8
4	Ergebnisse.....	10
4.1	Deskriptive Daten des Patientenkollektivs.....	10
4.2	Impedanzänderungen beim gesamten Patientenkollektiv	11
4.3	Impedanzänderungen bei Untergruppen des Patientenkollektivs	15
4.3.1	Impedanzänderungen in Abhängigkeit vom Geschlecht.....	15
4.3.2	Impedanzänderungen in Abhängigkeit von der Sondenlokalisierung.....	17
4.3.3	Impedanzänderungen in Abhängigkeit von Geschlecht und Sondenlokalisierung	19
4.3.4	Impedanzänderungen in Abhängigkeit von der MR-Untersuchungsregion.....	25
4.3.5	Impedanzänderungen in Abhängigkeit vom Alter bei MR-Untersuchung	28
4.3.6	Impedanzänderungen in Abhängigkeit von der Schrittmacher-Verweildauer	29
4.4	Zusammenfassung der Ergebnisse	30
4.4.1	Abhängigkeit der Ergebnisse von der Testmethodik.....	31
5	Diskussion.....	33
6	Zusammenfassung.....	35
7	Abbildungsverzeichnis.....	37
8	Danksagung	38
9	Literaturverzeichnis.....	39

1 Einleitung

Die erste Implantation eines voll implantierbaren Herzschrittmachers am Menschen erfolgte im Jahre 1958 durch den Chirurgen Åke Senning in Zusammenarbeit mit dem Ingenieur und Erfinder Rune Elmqvist am Karolinska Institut in Schweden[1].

Die Implantation wurde am 43-jährigen Patienten Arne Larsson durchgeführt, der aufgrund einer ausgeprägten Bradykardie an häufigen Bewusstlosigkeitsattacken litt. Letztere therapierte seine Frau mit einem Schlag gegen die Brust – zum Teil mehrmals täglich[2].

Sein erster Herzschrittmacher hielt nur wenige Stunden, der zweite ein paar Wochen. Insgesamt wurden Arne Larsson im Laufe seines Lebens 26 Schrittmacher implantiert. Er starb mit 86 Jahren und überlebte damit sowohl seinen Operateur als auch den Erfinder des ersten voll implantierbaren Herzschrittmachers.

Heutzutage ist die Implantation eines Herzschrittmachers weitgehend eine Routineoperation, und die Herzschrittmacher-Therapie gilt als ein etabliertes Verfahren im Rahmen der Behandlung von Herzrhythmusstörungen. In Deutschland werden jährlich ca. 75.000 Herzschrittmacher neu implantiert, mit steigender Tendenz[3]. Auch in den anderen Ländern Europas steigt die Anzahl der Implantationen von Herzschrittmachern seit Jahren kontinuierlich[4].

In den achtziger Jahren des letzten Jahrhunderts hielt die Magnetresonanztomographie (MR) Einzug in den klinischen Alltag. Gegenüber der Computertomographie bietet die MR einen besseren Weichteilkontrast und ist nicht mit schädlicher ionisierender Strahlung behaftet. MR-Untersuchungen wurden deshalb auch an Patienten mit Herzschrittmachern vorgenommen. In den Folgejahren wurde wiederholt über MR-assoziierte Komplikationen berichtet und in Einzelfällen sogar über mögliche Todesfälle bei Schrittmacherpatienten spekuliert[5, 6].

Auch wenn moderne Schrittmacher als bedingt MR-tauglich („MR conditional“) gelten, so sind zumindest bei älteren Schrittmachern, die nicht mit „MR conditional“ gekennzeichnet sind, Schädigungen der Schrittmacherkomponenten im Rahmen von MR-Untersuchung bekannt. Induzierte Spannungen können zu einer dauerhaften Beschädigung von elektronischen Bauteilen führen, Schrittmacheraufzeichnungen können gelöscht werden, ein irreversibler Abfall der Batteriespannung kann die Indikation zum elektiven Schrittmacher-Aggregatwechsel nach sich ziehen. Bei nicht „MR conditional“ Kardioverter-Defibrillator-Systemen kann ein Electrical Reset im Rahmen einer MR-Untersuchung sogar zu einem kompletten und permanenten Funktionsausfall des Systems führen[7].

Neben Schäden an den Schrittmacherkomponenten können bei MR-Untersuchungen an Schrittmacher-Patienten auch Herzrhythmusstörungen ausgelöst werden.

Bradykarde Herzrhythmusstörungen entstehen beispielsweise, wenn induzierte Spannungsimpulse der gepulsten MR-Felder vom Schrittmacher fehlerhafterweise als Eigenaktionen des Herzens interpretiert werden und infolgedessen die Schrittmacher-Stimulation gehemmt wird[7].

Tachykarde Herzrhythmusstörungen, wie z.B. ventrikuläre Tachykardien oder auch Kammerflimmern, können in den MR-Feldern durch Spannungsinduktion in den Schrittmacherelektroden ausgelöst werden, beispielsweise in der vulnerablen Phase[7].

Es kann auch die Situation eintreten, dass ein Schrittmacher nicht zwischen den Eigenaktionen des Herzens und der Interferenz mit den MR-Feldern unterscheiden kann. Je nach Schrittmachertyp und -einstellung kann es dabei zu einem Modus mit asynchroner Stimulation kommen, verbunden mit der Gefahr einer „R auf T“- Stimulation mit konsekutivem Kammerflimmern oder eines Neustarts des Schrittmachers („electrical reset“)[7].

Von besonderem Interesse sind Gewebeschäden am Herzmuskel. Schrittmachersonden können das MR-Hochfrequenzsignal ähnlich wie Antennen empfangen und dessen Energie an der Sondenspitze an das Herzmuskelgewebe abgeben, was zu thermischen Gewebeschäden des Herzmuskels, Änderung der Impedanz (Wechselstromwiderstand) der Sonden oder unter Umständen auch zu irreversiblen Reizschwellenanstieg führen kann[7].

Jahrelang galt deshalb die Durchführung von MR-Untersuchungen bei Patienten mit implantiertem Schrittmacher als absolute Kontraindikation[7, 8].

Wie im Konsensuspapier der Deutschen Gesellschaft für Kardiologie (DGK) und der Deutschen Röntgengesellschaft (DRG) aus dem Jahre 2017 dargelegt, konnten jedoch verschiedene Arbeitsgruppen in den letzten Jahren zeigen, dass die Durchführung von MR-Untersuchungen bei Patienten mit nicht „MR conditional“ Schrittmacher- bzw. Kardioverter-Defibrillator-Systemen (ICD) „unter Abwägung des individuellen Nutzen/Risiko-Profiles als Einzelfallentscheidung und als zulassungsüberschreitende Anwendung („off-label use“) unter dezidierten Sicherheitsvorkehrungen mit einem vertretbaren Risiko möglich ist“[7]. In diesem Zusammenhang wird auch auf ein internationales Konsensuspapier hingewiesen, das im gleichen Jahr von Indik et. al. veröffentlicht wurde[9].

In der Radiologie der Tagesklinik München-Nord wurden in den letzten Jahren zahlreiche MR-Untersuchungen an Patienten mit Schrittmachern, die nicht mit „MR conditional“ gekennzeichnet waren, unter kontrollierten Bedingungen durchgeführt. Die implantierten Schrittmacher des in dieser Arbeit untersuchten Patientenkollektivs waren allesamt Ein- oder Zweikammer-Schrittmacher, die nicht mit „MR conditional“ gekennzeichnet waren. Die Sonden dieser Patienten waren alle im rechten Vorhof oder im rechten Ventrikel lokalisiert. Keine der Sonden war links- oder epikardial lokalisiert.

Dabei wurden insbesondere die Impedanzen der Schrittmachersonden vor und nach der MR-Untersuchung gemessen. Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, dieses umfangreiche Datenmaterial im Hinblick auf Impedanzänderungen zu untersuchen und zu bewerten.

2 Zielsetzung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich retrospektiv mit folgenden Fragestellungen:

- A. Unterschieden sich die Impedanzen der Schrittmacher-Sonden vor und nach MR-Untersuchung in signifikanter Weise?
- B. Waren Impedanzänderungen in signifikanter Weise abhängig von der Sondenlokalisierung, dem Geschlecht, der MR-Untersuchungsregion, dem Alter des Patienten oder der Schrittmacher-Verweildauer?

3 Material und Methoden

3.1 Auswahl des Patientenkollektivs

Das untersuchte Patientenkollektiv umfasste 185 Schrittmacher-Patienten aus dem gesamten Bundesgebiet, die zwischen 2009 und 2014 von Fachärzten an die Radiologie der Tagesklinik München-Nord zur MR-Untersuchungen überwiesen wurden.

Die implantierten Schrittmacher des untersuchten Patientenkollektivs waren allesamt Ein- oder Zweikammer-Schrittmacher, die nicht mit „MR conditional“ gekennzeichnet waren. Die Sonden dieser Patienten waren alle im rechten Vorhof oder im rechten Ventrikel lokalisiert. Keine der Sonden war links- oder epikardial lokalisiert.

Die Indikation zur MR-Untersuchung erfolgte unter sorgfältiger Abwägung des individuellen Nutzen-Risiko Verhältnisses und nach umfassender Aufklärung des Patienten über den „off-label use“ und die patientenspezifischen Risiken.

Ausgeschlossen von MR-Untersuchungen wurden insbesondere Patienten

- die schrittmacherabhängig waren,
- mit Kardioverter-Defibrillator-Systemen (ICD Systemen),
- mit einer Schrittmacher-Verweildauer von weniger als einem Monat,
- wenn die MR-Untersuchungsregion in unmittelbarer Nähe des Schrittmacheraggregats lag,
- mit metallischen Fremdkörpern (z.B. Metallsplitters, chirurgische Nägel, Drähte, Schrauben, Platten, Gelenk-Endoprothesen, magnetische Zahnprothesen, Cochlea-Implantate, bestimmte Intrauterinpressare, neurale Stimulatoren, Insulin-bzw. Medikamentenpumpen, metallische Gefäßclips, Aneurysmaclips, Stents, Starr-Edwards-Herzklappen-Prothesen, Vena-Cava-Schirmchen, Hirnwassershunts etc.),
- mit großflächigen Tätowierungen (wegen möglicher Hitzeentwicklung durch metallhaltige Farbpigmente) oder mit nicht-entfernbarem metallischem Körperschmuck,
- mit psychischen Erkrankungen, die mit einer MR-Untersuchung nicht vereinbar waren (z.B. Klaustrophobie),
- in der Schwangerschaft,
- die jünger als 18 Jahre alt waren.

3.2 Ablauf der MR-Untersuchung

Die MR-Untersuchungen erfolgten bei allen 185 Patienten des Patientenkollektivs in einem offenen Niederfeld MRT mit 0.2 Tesla (Siemens Magnetom Concerto 0.2T).

Vor der MR-Untersuchung wurde eine Schrittmacher-Kontrolle durchgeführt und die Messdaten entsprechend dokumentiert. Gegebenenfalls erfolgte ein Umprogrammieren des Schrittmachers in einen sichereren Modus.

Während der MR-Untersuchung erfolgte eine kontinuierliche Überwachung des Patienten durch EKG und Pulsoxymetrie. Dabei wurde sichergestellt, dass qualifiziertes Fachpersonal in Reanimationsbereitschaft und entsprechende Notfallausrüstung verfügbar waren.

Nach der MR-Untersuchung erfolgte eine erneute Schrittmacher-Kontrolle mit Dokumentation der Messdaten und gegebenenfalls Rückprogrammieren in den ursprünglichen Modus.

Bei den MR-Untersuchungen lag die Ganzkörper-SAR (Specific Absorption Rate) unter 2 W/kg.

3.3 Datenerfassung

3.3.1 Basisdaten

Für die vorliegende Arbeit wurde folgender Datensatz pro Schrittmachersonde in Excel 2013 erfasst:

- Patientenummer (anonymisiert)
- Geburtsdatum
- Geschlecht
- Schrittmachertyp (Ein- oder Zweikammer SM)
- Sondenlokalisierung (Vorhof oder Kammer)
- Datum der Erstimplantation
- MR-Untersuchungsdatum
- MR-Untersuchungsregion
- Impedanz vor MR-Untersuchung (in Ohm)
- Impedanz nach MR-Untersuchung (in Ohm)

In wenigen Fällen wurde beim demselben Patienten mehr als eine MR-Untersuchung durchgeführt. Bei der Datenerfassung wurden dann nur die Daten der MR-Erstuntersuchung in der Radiologie München-Nord berücksichtigt. Dies geschah um eine einheitliche Datengewichtung und Vorgehensweise auf alle Patienten in gleicher Weise anzuwenden.

3.3.2 Abgeleitete Daten

Für Auswertungszwecke wurden folgende Daten aus den Basisdaten wie folgt abgeleitet:

- Absolute Impedanzänderung = Impedanz nach MR Untersuchung minus Impedanz vor MR Untersuchung (in Ohm)
- Relative Impedanzänderung = Absolute Impedanzänderung / Impedanz vor MR Untersuchung (in %)

- Schrittmacher-Verweildauer = Differenz zwischen MR-Untersuchungsdatum und dem Datum der SM-Implantation
- Alter bei MR-Untersuchung = Differenz zwischen MR Untersuchungsdatum und Geburtsdatum

3.4 Statistische Auswertung

3.4.1 Allgemeines

Die erfassten Daten wurden mit dem Statistikprogramm IBM SPSS Statistics Version 27 ausgewertet.

Ein statistischer Test in SPSS liefert als Ergebnis einen p-Wert ($0\% \leq p \leq 100\%$). Der p-Wert gibt die Irrtumswahrscheinlichkeit für das Verwerfen der zu testenden Hypothese (Nullhypothese) an. Solange der p-Wert das zuvor festgelegte Signifikanzniveau α überschreitet ($p > \alpha$) wird die Nullhypothese angenommen. Wenn der p-Wert kleiner oder gleich dem Signifikanzniveau α ist ($p \leq \alpha$), so wird die Nullhypothese verworfen.

Die vorliegende Arbeit basiert auf einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0.05$.

3.4.2 Testmethodik

Zur Auswertung der beiden Messgrößen „Impedanz vor MR-Untersuchung“ und „Impedanz nach MR-Untersuchung“ kamen die nachfolgenden Tests zur Anwendung:

Deskriptive Statistik

Mit Hilfe der explorativen Datenanalyse in SPSS wurden Mittelwert bzw. Median und Standardabweichung für beide Messgrößen ermittelt.

Test auf Normalverteilung

Der Test auf Normalverteilung erfolgte mit dem Shapiro-Wilk-Test. Die SPSS Nullhypothese des Tests lautet: „Die Messgröße ist normalverteilt.“. Ergab sich ein p-Wert größer als $\alpha = 0.05$, so galt die Messgröße als normalverteilt, anderenfalls als nicht normalverteilt.

Vergleich von Messgrößen

Um festzustellen, ob sich die gepaarten Messwerte für die Impedanzen vor und nach MR-Untersuchung signifikant unterscheiden, wurde vorgegangen wie folgt:

Falls beide Messgrößen normalverteilt waren, wurde ein t-Test für verbundene Stichproben durchgeführt. Die SPSS Nullhypothese des Tests lautet: „Die Mittelwerte der Messgrößen unterscheiden sich nicht.“.

Wenn jedoch zumindest eine der beiden Messgrößen nicht normalverteilt war, wurde ein Wilcoxon-Test durchgeführt. Die SPSS Nullhypothese des Tests lautet: „Der Median der Differenzen der beiden Messgrößen ist Null.“.

Resultierte ein p-Wert kleiner oder gleich $\alpha = 0.05$, so wurde davon ausgegangen, dass sich die beiden Messgrößen signifikant unterscheiden. Bei einem p-Wert größer als $\alpha = 0.05$ wurde davon ausgegangen, dass sich die beiden Messgrößen nicht signifikant unterscheiden.

Korrelationen

Um potentielle Zusammenhänge zwischen den metrischen Größen Impedanzänderungen und Schrittmacher-Verweildauer bzw. Patientenalter zu identifizieren, wurden bivariate Korrelationen mit Korrelationskoeffizienten nach Pearson berechnet. Für Korrelationen lautet die SPSS Nullhypothese: „Die beiden Messgrößen sind voneinander unabhängig.“. Resultierte ein p-Wert größer als $\alpha = 0.05$, so wurde davon ausgegangen, dass die beiden Messgrößen nicht auf signifikante Weise korrelieren. Bei einem p-Wert kleiner oder gleich $\alpha = 0.05$ wurde davon ausgegangen, dass die beiden Messgrößen signifikant korrelieren.

4 Ergebnisse

4.1 Deskriptive Daten des Patientenkollektivs

Das untersuchte Patientenkollektiv umfasste 185 SM-Patienten, davon waren 51 Frauen (28%) und 134 Männer (72 %).

Das Durchschnittsalter (\pm Standardabweichung) des Patientenkollektivs zum Zeitpunkt der MR-Untersuchung betrug 71.3 Jahre (\pm 11.7). Das Durchschnittsalter der Frauen lag bei 70.5 (\pm 13.3) Jahren, das der Männer bei 71.6 (\pm 11.1) Jahren. Der jüngste Patient war 28.1 Jahre alt, der älteste 90.5 Jahre alt.

156 Patienten (84 %) des Patientenkollektivs hatten einen Zweikammer-SM, 29 Patienten (16 %) einen Einkammer-SM. 46 Frauen (25 %) und 110 Männer (59%) hatten einen Zweikammer-SM, 5 Frauen (3 %) und 24 Männer (13%) einen Einkammer-SM.

Insgesamt wurden also Messdaten für Impedanzen an 341 Schrittmacher-Sonden erfasst ($341 = 156 \times 2 + 29$). An dieser Stelle sei nochmals erwähnt: Falls bei demselben Patient in der Radiologie München-Nord mehrfach einer MR-Untersuchung durchgeführt wurde, was nur in wenigen Fällen der Fall war, so wurden bei der Datenerfassung nur die Daten der MR-Erstuntersuchung berücksichtigt. Dies geschah um eine einheitliche Datengewichtung und Vorgehensweise auf alle Patienten in gleicher Weise anzuwenden.

Bei keinem der Patienten kam es im Rahmen der MR-Untersuchung zu Komplikationen wie z.B. einer Sondendislokation, einer Sondenperforation, einer Verbrennung oder einer Dysfunktion des Schrittmachers.

4.2 Impedanzänderungen beim gesamten Patientenkollektiv

Eingangs wurden die Impedanzänderungen des gesamten Patientenkollektivs unabhängig von weiteren Parametern betrachtet. Dazu wurden die Messdaten aller 341 Sonden vor und nach MR-Untersuchung ausgewertet.

Bei den 341 MR-Messungen des gesamten Patientenkollektivs ergaben sich in 69 % der Fälle (235 Messungen) keine Impedanzänderungen. Die verbleibenden 31 % der Fälle (106 Messungen) teilten sich in 10 % Impedanzzunahmen (35 Messungen) und 21 % Impedanzabnahmen (71 Messungen) auf.

Die gemittelte Impedanz (Mittelwert \pm Standardabweichung) über das gesamte Patientenkollektiv betrug vor MR-Untersuchung $544.10 \Omega (\pm 353.10 \Omega)$ und nach MR-Untersuchung $543.44 \Omega (\pm 352.42 \Omega)$. Die Differenz der Impedanz-Mittelwerte betrug somit -0.66Ω (bzw. -0.12%).

Der minimale Impedanzwert des gesamten Patientenkollektivs vor MR-Untersuchung betrug 239Ω , der maximale 5076Ω bei einem Medianwert von 500Ω , der minimale Impedanzwert nach MR-Untersuchung betrug 254Ω , der maximale 5076Ω bei einem Medianwert von 500Ω (siehe Abbildung 1 und Abbildung 2). Die Spannweite der Impedanzänderungen reichte von -61Ω bis $+131 \Omega$ bzw. von -10.35% bis $+26.16 \%$ (siehe Abbildung 3 und Abbildung 4).

Impedanzen größer als 2000Ω wurden an zwei Sonden gemessen. Dabei handelte es sich um die Vorhofsonde (5076Ω) und die Ventrikelsonde (4092Ω) eines einzigen männlichen Patienten. Bei beiden Sonden betrug die Impedanzänderung vor und nach MR-Untersuchung 0Ω . Derart hohe Impedanzen deuten im Allgemeinen auf einen Sondenbruch oder ein Konnektionsproblem hin. Im Rahmen der begleitenden Schrittmacher-Kontrolle der MR-Untersuchung ergab sich überraschenderweise jedoch kein Hinweis auf eine Dysfunktion der Sonden oder des Herzschrittmachers des Patienten. Ähnliche sehr selten auftretende Fälle sind auch in der Literatur beschrieben [10].

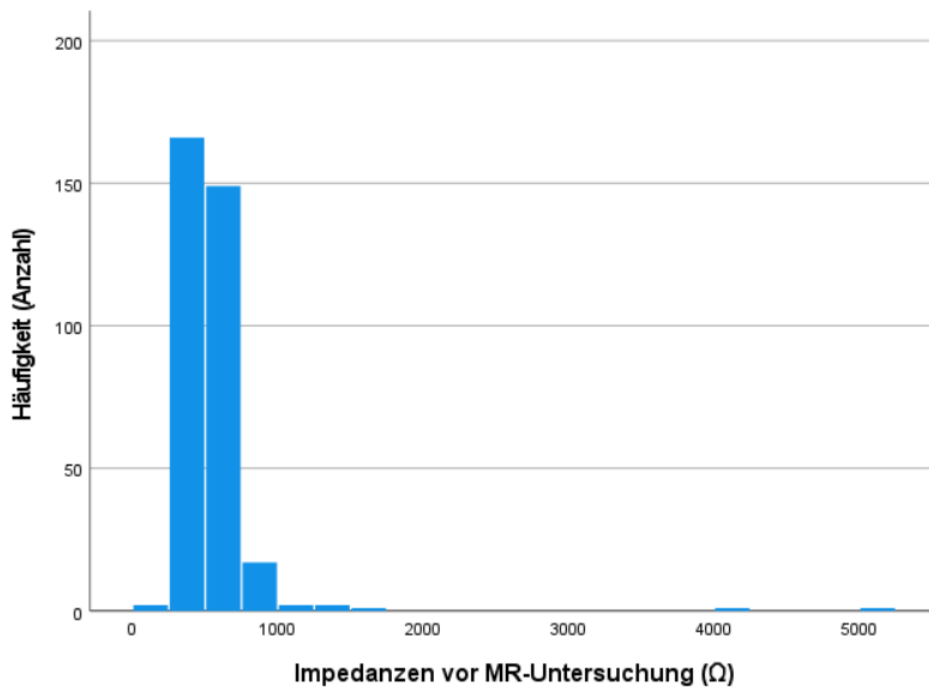


Abbildung 1 - Gesamtes Patientenkollektiv – Impedanzen vor MR-Untersuchung (Ω)

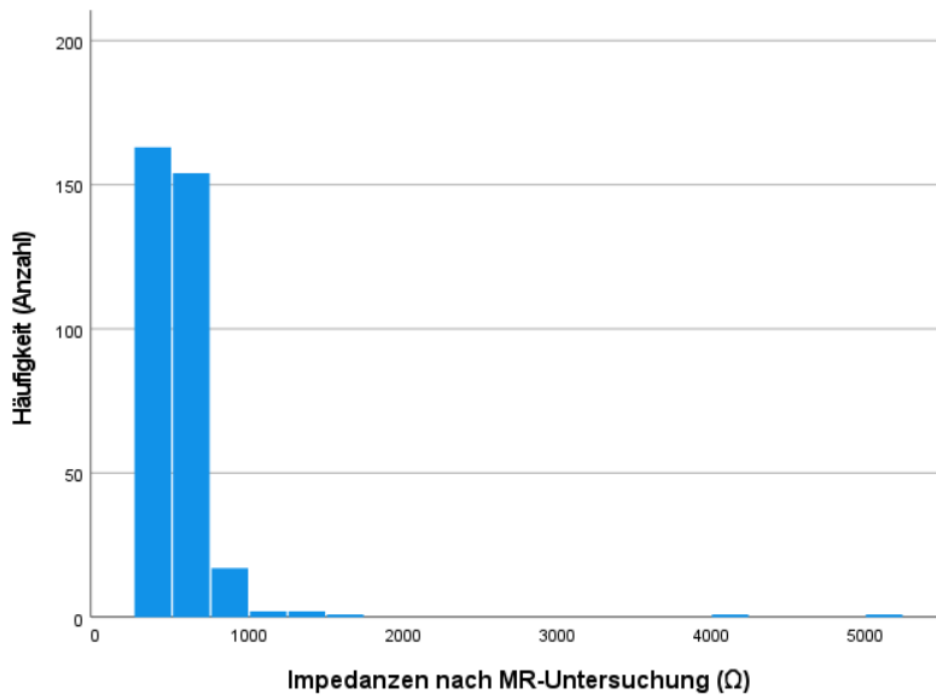


Abbildung 2 – Gesamtes Patientenkollektiv – Impedanzen nach MR-Untersuchung (Ω)

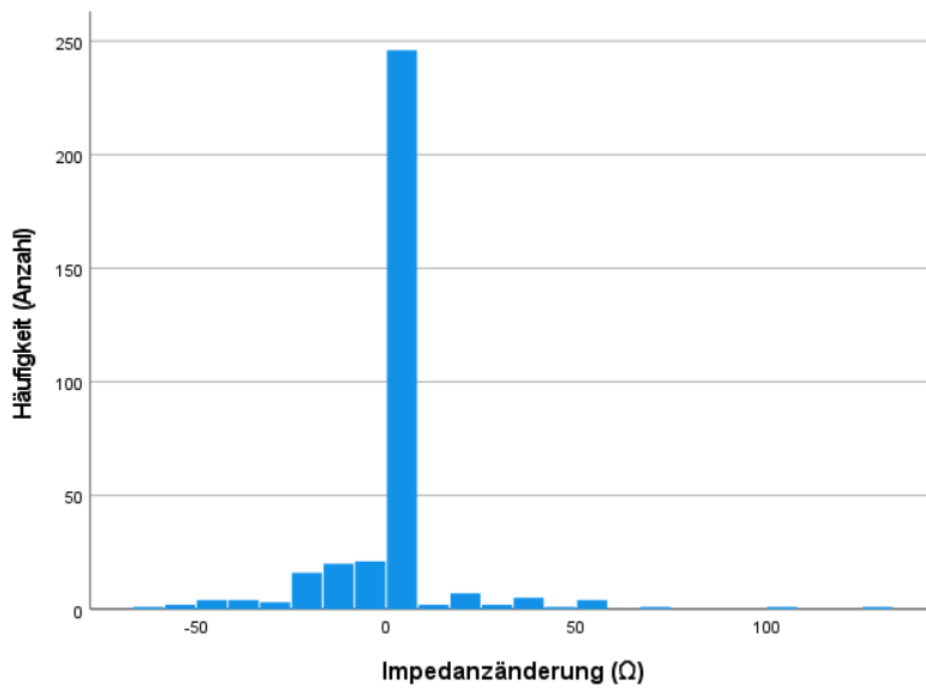


Abbildung 3 – Gesamtes Patientenkollektiv – Impedanzänderung (Ω)

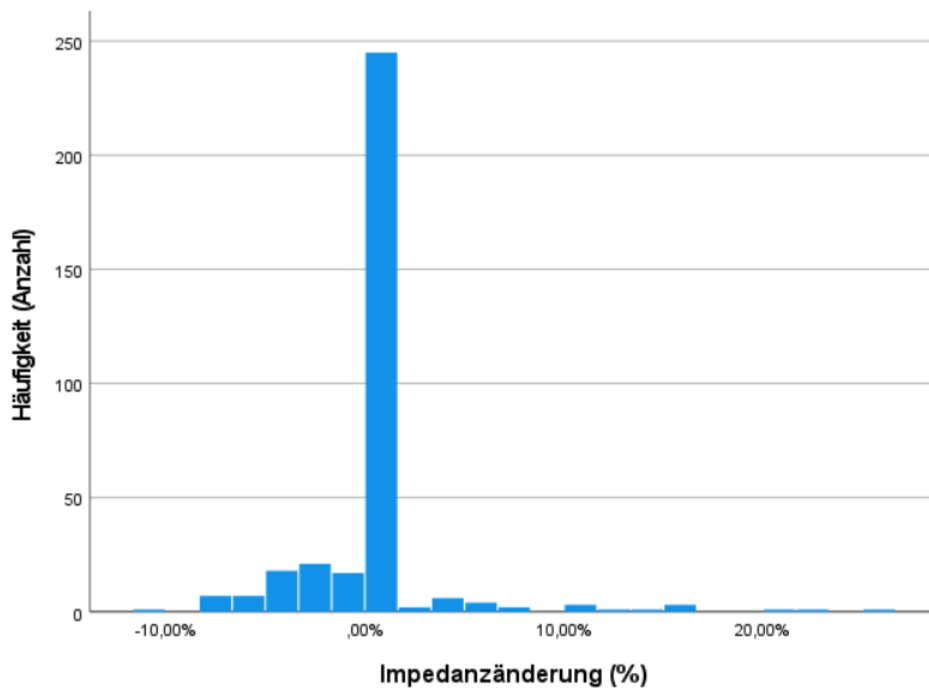


Abbildung 4 – Gesamtes Patientenkollektiv – Impedanzänderung (%)

Der Shapiro-Wilk-Test ergab für die Impedanzen vor und nach MR-Untersuchung jeweils einen p-Wert von 0.000, damit $p \leq 0.05$, so dass die beiden Messgrößen nicht normalverteilt waren. Der t-Test wurde deshalb nicht angewendet und sein p-Wert von 0.470 wird hier nur zu Informationszwecken angegeben. Der Wilcoxon-Test ergab einen p-Wert von 0.023, damit $p \leq 0.05$, so dass sich die beiden Messgrößen in signifikanter Weise unterschieden.

Bei der Betrachtung des gesamten Patientenkollektivs war die gemittelte Impedanz nach MR-Untersuchung somit signifikant niedriger als vor MR-Untersuchung.

4.3 Impedanzänderungen bei Untergruppen des Patientenkollektivs

Zur weiteren Analyse der Impedanzänderungen wurden Untergruppen des Patientenkollektivs im Hinblick auf die Parameter Geschlecht und Sondenlokalisierung ausgewertet.

4.3.1 Impedanzänderungen in Abhängigkeit vom Geschlecht

Es wurden die Impedanzänderungen bei Männern und Frauen gesondert ausgewertet.

Impedanzänderungen bei den Männern

Bei den 244 MR-Messungen der Männer ergaben sich in 68 % der Fälle (167 Messungen) keine Impedanzänderungen. Die verbleibenden 32 % der Fälle (77 Messungen) teilten sich in 12 % Impedanzzunahmen (28 Messungen) und 20 % Impedanzabnahmen (49 Messungen) auf.

Die gemittelte Impedanz betrug vor MR-Untersuchung 546.89Ω ($\pm 404.62 \Omega$) und nach MR-Untersuchung 547.22Ω ($\pm 404.01 \Omega$). Die Differenz der Impedanz-Mittelwerte betrug somit $+0.33 \Omega$ (bzw. $+0.06 \%$).

Bei den Männern war der minimale Impedanzwert vor MR-Untersuchung 239Ω , der maximale 5076Ω bei einem Medianwert von 487Ω , der minimale Impedanzwert nach MR-Untersuchung betrug 254Ω , der maximale 5076Ω bei einem Medianwert von 497.5Ω . Die Spannweite der Impedanzänderungen reichte von -61Ω bis $+131 \Omega$ bzw. von -10.35% bis $+26.16 \%$.

Bei den Männern ergab der Shapiro-Wilk-Test für die Impedanzen vor und nach MR-Untersuchung jeweils einen p-Wert von 0.000, damit $p \leq 0.05$, so dass die beiden Messgrößen nicht normalverteilt waren. Der t-Test wurde deshalb nicht angewendet und sein p-Wert von 0.782 wird hier nur zu Informationszwecken angegeben. Der Wilcoxon-Test ergab einen p-Wert von 0.340, damit $p > 0.05$, so dass sich die beiden Messgrößen bei den Männern nicht in signifikanter Weise unterschieden.

Impedanzänderungen bei den Frauen

Bei den 97 MR-Messungen der Frauen ergaben sich in 70 % der Fälle (68 Messungen) keine Impedanzänderungen. Die verbleibenden 30 % der Fälle (29 Messungen) teilten sich in 7 % Impedanzzunahmen (7 Messungen) und 23 % Impedanzabnahmen (22 Messungen) auf.

Die gemittelte Impedanz betrug vor MR-Untersuchung 537.08Ω ($\pm 164.60 \Omega$) und nach MR-Untersuchung 533.94Ω ($\pm 163.03 \Omega$). Die Differenz der Impedanz-Mittelwerte betrug somit -3.14Ω (bzw. -0.58%).

Bei den Frauen war der minimale Impedanzwert vor MR-Untersuchung 240Ω , der maximale 1493Ω bei einem Medianwert von 534Ω , der minimale Impedanzwert nach MR-Untersuchung betrug 255Ω ,

der maximale 1493 Ω bei einem Medianwert von 526 Ω . Die Spannweite der Impedanzänderungen reichte von -55 Ω bis +40 Ω bzw. von -8.10 % bis +16.67 %.

Bei den Frauen ergab der Shapiro-Wilk-Test für die Impedanzen vor und nach MR-Untersuchung jeweils einen p-Wert von 0.000, damit $p \leq 0.05$, so dass die beiden Messgrößen nicht normalverteilt waren. Der t-Test wurde deshalb nicht angewendet und sein p-Wert von 0.008 wird hier nur zu Informationszwecken angegeben. Der Wilcoxon-Test ergab einen p-Wert von 0.003, damit $p \leq 0.05$, so dass sich die beiden Messgrößen bei den Frauen in signifikanter Weise unterschieden.

Im Gegensatz zu den Männern unterschieden sich die gemittelten Impedanzen bei den Frauen vor und nach MR-Untersuchung in signifikanter Weise. Bei den Frauen war die gemittelte Impedanz nach MR-Untersuchung signifikant niedriger als vor MR-Untersuchung – im Gegensatz zu den Männern, bei denen es zu einer Zunahme der gemittelten Impedanz nach MR-Untersuchung kam.

4.3.2 Impedanzänderungen in Abhängigkeit von der Sondenlokalisation

Es wurden die Impedanzänderungen bei Vorhof- und Ventrikelsonden gesondert ausgewertet.

Impedanzänderungen bei den Vorhofsonden

Bei den 156 MR-Messungen der Vorhofsonden ergaben sich in 71 % der Fälle (110 Messungen) keine Impedanzänderungen. Die verbleibenden 29 % der Fälle (46 Messungen) teilten sich in 9 % Impedanzzunahmen (15 Messungen) und 20 % Impedanzabnahmen (31 Messungen) auf.

Die gemittelte Impedanz betrug vor MR-Untersuchung 497.82Ω ($\pm 395.10 \Omega$) und nach MR-Untersuchung 496.49Ω ($\pm 394.34 \Omega$). Die Differenz der Impedanz-Mittelwerte betrug somit -1.33Ω (bzw. -0.27%).

Bei den Vorhofsonden war der minimale Impedanzwert vor MR-Untersuchung 239Ω , der maximale 5076Ω bei einem Medianwert von 452.5Ω , der minimale Impedanzwert nach MR-Untersuchung betrug 254Ω , der maximale 5076Ω bei einem Medianwert von 452Ω . Die Spannweite der Impedanzänderungen reichte von -48Ω bis $+58 \Omega$ bzw. von -10.35% bis $+22.59 \%$.

Bei den Vorhofsonden ergab der Shapiro-Wilk-Test für die Impedanzen vor und nach MR-Untersuchung jeweils einen p-Wert von 0.000, damit $p \leq 0.05$, so dass die beiden Messgrößen nicht normalverteilt waren. Der t-Test wurde deshalb nicht angewendet und sein p-Wert von 0.221 wird hier nur zu Informationszwecken angegeben. Der Wilcoxon-Test ergab einen p-Wert von 0.074, damit $p > 0.05$, so dass sich die beiden Messgrößen bei den Vorhofsonden nicht in signifikanter Weise unterschieden.

Impedanzänderungen bei den Ventrikelsonden

Bei den 185 MR-Messungen der Ventrikelsonden ergaben sich in 68 % der Fälle (125 Messungen) keine Impedanzänderungen. Die verbleibenden 32 % der Fälle (60 Messungen) teilten sich in 11 % Impedanzzunahmen (20 Messungen) und 21 % Impedanzabnahmen (40 Messungen) auf.

Die gemittelte Impedanz betrug vor MR-Untersuchung 583.13Ω ($\pm 309.09 \Omega$) und nach MR-Untersuchung 583.04Ω ($\pm 308.31 \Omega$). Die Differenz der Impedanz-Mittelwerte betrug somit -0.09Ω (bzw. -0.02%).

Bei den Ventrikelsonden war der minimale Impedanzwert vor MR-Untersuchung 300Ω , der maximale 4092Ω bei einem Medianwert von 531Ω , der minimale Impedanzwert nach MR-Untersuchung betrug 300Ω , der maximale 4092Ω bei einem Medianwert von 526Ω . Die Spannweite der Impedanzänderungen reichte von -61Ω bis $+131 \Omega$ bzw. von -8.10% bis $+26.16 \%$.

Bei den Ventrikelsonden ergab der Shapiro-Wilk-Test für die Impedanzen vor und nach MR-Untersuchung jeweils einen p-Wert von 0.000, damit $p \leq 0.05$, so dass die beiden Messgrößen nicht

normalverteilt waren. Der t-Test wurde deshalb nicht angewendet und sein p-Wert von 0.948 wird hier nur zu Informationszwecken angegeben. Der Wilcoxon-Test ergab einen p-Wert von 0.145, damit $p > 0.05$, so dass sich die beiden Messgrößen bei den Ventrikelsonden nicht in signifikanter Weise unterschieden.

Weder bei den Ventrikel- noch bei den Vorhofsonden unterschieden sich somit die gemittelten Impedanzen vor und nach MR-Untersuchung in signifikanter Weise.

4.3.3 Impedanzänderungen in Abhängigkeit von Geschlecht und Sondenlokalisation

Es wurden die Impedanzänderungen bei Männern und Frauen für Vorhof- und Ventrikelsonden gesondert ausgewertet.

Impedanzänderungen bei den Vorhofsonden der Männer

Bei den 110 MR-Messungen der Vorhofsonden der Männer ergaben sich in 70 % der Fälle (77 Messungen) keine Impedanzänderungen. Die verbleibenden 30 % der Fälle (33 Messungen) teilten sich in 11 % Impedanzzunahmen (12 Messungen) und 19 % Impedanzabnahmen (21 Messungen) auf.

Die gemittelte Impedanz betrug vor MR-Untersuchung 506.85Ω ($\pm 463.49 \Omega$) und nach MR-Untersuchung 505.91Ω ($\pm 462.79 \Omega$). Die Differenz der Impedanz-Mittelwerte betrug somit -0.94Ω (bzw. -0.19%).

Bei den Vorhofsonden der Männer war der minimale Impedanzwert vor MR-Untersuchung 239Ω , der maximale 5076Ω bei einem Medianwert von 450Ω , der minimale Impedanzwert nach MR-Untersuchung betrug 254Ω , der maximale 5076Ω bei einem Medianwert von 450Ω . Die Spannweite der Impedanzänderungen reichte von -48Ω bis $+58 \Omega$ bzw. von -10.35% bis $+22.59 \%$.

Bei den Vorhofsonden der Männer ergab der Shapiro-Wilk-Test für die Impedanzen vor und nach MR-Untersuchung jeweils einen p-Wert von 0.000, damit $p \leq 0.05$, so dass die beiden Messgrößen nicht normalverteilt waren. Der t-Test wurde deshalb nicht angewendet und sein p-Wert von 0.500 wird hier nur zu Informationszwecken angegeben. Der Wilcoxon-Test ergab einen p-Wert von 0.295, damit $p > 0.05$, so dass sich die beiden Messgrößen bei den Vorhofsonden der Männer nicht in signifikanter Weise unterschieden.

Impedanzänderungen bei den Ventrikelsonden der Männer

Bei den 134 MR-Messungen der Ventrikelsonden der Männer ergaben sich in 67 % der Fälle (90 Messungen) keine Impedanzänderungen. Die verbleibenden 33 % der Fälle (44 Messungen) teilten sich in 12 % Impedanzzunahmen (16 Messungen) und 21 % Impedanzabnahmen (28 Messungen) auf.

Die gemittelte Impedanz betrug vor MR-Untersuchung 579.76Ω ($\pm 347.35 \Omega$) und nach MR-Untersuchung 581.13Ω ($\pm 346.59 \Omega$). Die Differenz der Impedanz-Mittelwerte betrug somit $+1.37 \Omega$ (bzw. $+0.24 \%$).

Bei den Ventrikelsonden der Männer war der minimale Impedanzwert vor MR-Untersuchung 300Ω , der maximale 4092Ω bei einem Medianwert von 520Ω , der minimale Impedanzwert nach MR-Untersuchung betrug 300Ω , der maximale 4092Ω bei einem Medianwert von 517Ω . Die Spannweite der Impedanzänderungen reichte von -61Ω bis $+131 \Omega$ bzw. von -8.01% bis $+26.16 \%$.

Bei den Ventrikelsonden der Männer ergab der Shapiro-Wilk-Test für die Impedanzen vor und nach MR-Untersuchung jeweils einen p-Wert von 0.000, damit $p \leq 0.05$, so dass die beiden Messgrößen nicht normalverteilt waren. Der t-Test wurde deshalb nicht angewendet und sein p-Wert von 0.453 wird hier nur zu Informationszwecken angegeben. Der Wilcoxon-Test ergab einen p-Wert von $0.696 > 0.05$, so dass sich die beiden Messgrößen bei den Ventrikelsonden der Männer nicht in signifikanter Weise unterschieden.

Impedanzänderungen bei den Vorhofsonden der Frauen

Bei den 46 MR-Messungen der Vorhofsonden der Frauen ergaben sich in 72 % der Fälle (33 Messungen) keine Impedanzänderungen. Die verbleibenden 28 % der Fälle (13 Messungen) teilten sich in 6 % Impedanzzunahmen (3 Messungen) und 22 % Impedanzabnahmen (10 Messungen) auf.

Die gemittelte Impedanz betrug vor MR-Untersuchung $476.22 \Omega (\pm 129.12 \Omega)$ und nach MR-Untersuchung $473.96 \Omega (\pm 126.93 \Omega)$. Die Differenz der Impedanz-Mittelwerte betrug somit -2.26Ω (bzw. -0.47%).

Bei den Vorhofsonden der Frauen war der minimale Impedanzwert vor MR-Untersuchung 240Ω , der maximale 750Ω bei einem Medianwert von 486Ω , der minimale Impedanzwert nach MR-Untersuchung betrug 255Ω , der maximale 750Ω bei einem Medianwert von 484.5Ω . Die Spannweite der Impedanzänderungen reichte von -44Ω bis $+40 \Omega$ bzw. von -7.47% bis $+16.67 \%$.

Bei den Vorhofsonden der Frauen ergab der Shapiro-Wilk-Test für die Impedanzen vor und nach MR-Untersuchung jeweils einen p-Wert von 0.449 bzw. $0.396 > 0.05$, so dass die beiden Messgrößen normalverteilt waren. Der Wilcoxon-Test wurde deshalb nicht angewendet und sein p-Wert von 0.046 wird hier nur zu Informationszwecken angegeben. Der t-Test ergab einen p-Wert von $0.149 > 0.05$, so dass sich die beiden Messgrößen bei den Vorhofsonden der Frauen nicht in signifikanter Weise unterschieden.

Impedanzänderungen bei den Ventrikelsonden der Frauen

Bei den 51 MR-Messungen der Ventrikelsonden der Frauen ergaben sich in 69 % der Fälle (35 Messungen) keine Impedanzänderungen. Die verbleibenden 29 % der Fälle (16 Messungen) teilten sich in 8 % Impedanzzunahmen (4 Messungen) und 23 % Impedanzabnahmen (12 Messungen) auf.

Die gemittelte Impedanz betrug vor MR-Untersuchung $591.98 \Omega (\pm 174.73 \Omega)$ und nach MR-Untersuchung $588.04 \Omega (\pm 173.89 \Omega)$. Die Differenz der Impedanz-Mittelwerte betrug somit -3.94Ω (bzw. -0.67%).

Bei den Ventrikelsonden der Frauen war der minimale Impedanzwert vor MR-Untersuchung 330Ω , der maximale 1493Ω bei einem Medianwert von 590Ω , der minimale Impedanzwert nach MR-

Untersuchung betrug 330 Ω , der maximale 1493 Ω bei einem Medianwert von 592 Ω (siehe Abbildung 5 und Abbildung 6). Die Spannweite der Impedanzänderungen reichte von -55 Ω bis +20 Ω bzw. von -8.10 % bis +4.08 % (siehe Abbildung 7 und Abbildung 8).

Bei den Ventrikelsonden der Frauen ergab der Shapiro-Wilk-Test für die Impedanzen vor und nach MR-Untersuchung jeweils einen p-Wert von 0.000, damit $p \leq 0.05$, so dass die beiden Messgrößen nicht normalverteilt waren. Der t-Test wurde deshalb nicht angewendet und sein p-Wert von 0.025 wird hier nur zu Informationszwecken angegeben. Der Wilcoxon-Test ergab einen p-Wert von 0.028, damit $p \leq 0.05$, so dass sich die beiden Messgrößen bei den Ventrikelsonden der Frauen in signifikanter Weise unterschieden.

Bei den Ventrikelsonden der Frauen war somit die gemittelte Impedanz nach MR-Untersuchung signifikant niedriger als vor MR-Untersuchung.

Bei der Auswertung der 4 Untergruppen bezüglich Sondenlokalisierung (Ventrikel versus Vorhof) und Geschlecht (männlich versus weiblich) ergab sich nur in der Untergruppe der Ventrikelsonden der Frauen, dass sich die gemittelten Impedanzen vor und nach MR-Untersuchung in signifikanter Weise unterschieden. Die gemittelte Impedanz war in dieser Untergruppe nach MR-Untersuchung signifikant niedriger.

Alle 4 Untergruppen bildeten zusammen das gesamte Patientenkollektiv. Im Sinne einer Gegenprüfung wurden deshalb auch die Impedanzänderungen beim gesamten Patientenkollektiv unter Ausschluss der Ventrikelsonden der Frauen ausgewertet. Diese Auswertung umfasste also die 3 Untergruppen der

- Ventrikelsonden der Männer,
- Vorhofsonden der Männer,
- Vorhofsonden der Frauen,

jedoch nicht die Untergruppe der Ventrikelsonden der Frauen.

Bei den 290 MR-Messungen des gesamten Patientenkollektivs ohne Ventrikelsonden der Frauen ergaben sich in 69 % der Fälle (200 Messungen) keine Impedanzänderungen. Die verbleibenden 31 % der Fälle (90 Messungen) teilten sich in 11 % Impedanzzunahmen (31 Messungen) und 20 % Impedanzabnahmen (59 Messungen) auf.

Die gemittelte Impedanz betrug vor MR-Untersuchung 535.68 Ω (\pm 375.40 Ω) und nach MR-Untersuchung 535.60 Ω (\pm 374.80 Ω). Die Differenz der Impedanz-Mittelwerte betrug somit -0.08 Ω (bzw. -0.01%).

Beim gesamten Patientenkollektiv ohne Ventrikelsonden der Frauen war der minimale Impedanzwert vor MR-Untersuchung 239 Ω , der maximale 5076 Ω bei einem Medianwert von 487 Ω , der minimale

Impedanzwert nach MR-Untersuchung betrug 254 Ω , der maximale 5076 Ω bei einem Medianwert von 492.5 Ω . Die Spannweite der Impedanzänderungen reichte von -61 Ω bis +131 Ω bzw. von -10.35 % bis +26.16 %.

Beim gesamten Patientenkollektiv ohne Ventrikelsonden der Frauen ergab der Shapiro-Wilk-Test für die Impedanzen vor und nach MR-Untersuchung jeweils einen p-Wert von 0.000, damit $p \leq 0.05$, so dass die beiden Messgrößen nicht normalverteilt waren. Der t-Test wurde deshalb nicht angewendet und sein p-Wert von 0.936 wird hier nur zu Informationszwecken angegeben. Der Wilcoxon-Test ergab einen p-Wert von 0.124, damit $p > 0.05$, so dass sich die beiden Messgrößen beim gesamten Patientenkollektiv ohne Ventrikelsonden der Frauen nicht in signifikanter Weise unterschieden.

Bei der Auswertung der 4 Untergruppen bezüglich Sondenlokalisierung (Ventrikel versus Vorhof) und Geschlecht (männlich versus weiblich) ergab sich nur in der Untergruppe der Ventrikelsonden der Frauen, dass sich die Impedanzen vor und nach MR-Untersuchung in signifikanter Weise unterschieden. Die gemittelte Impedanz war nach MR-Untersuchung signifikant niedriger. Im Sinne einer Gegenprüfung ergab die Auswertung des gesamten Patientenkollektivs unter Ausschluss der Ventrikelsonden der Frauen, dass sich die gemittelten Impedanzen vor und nach MR-Untersuchung dagegen nicht in signifikanter Weise unterschieden.

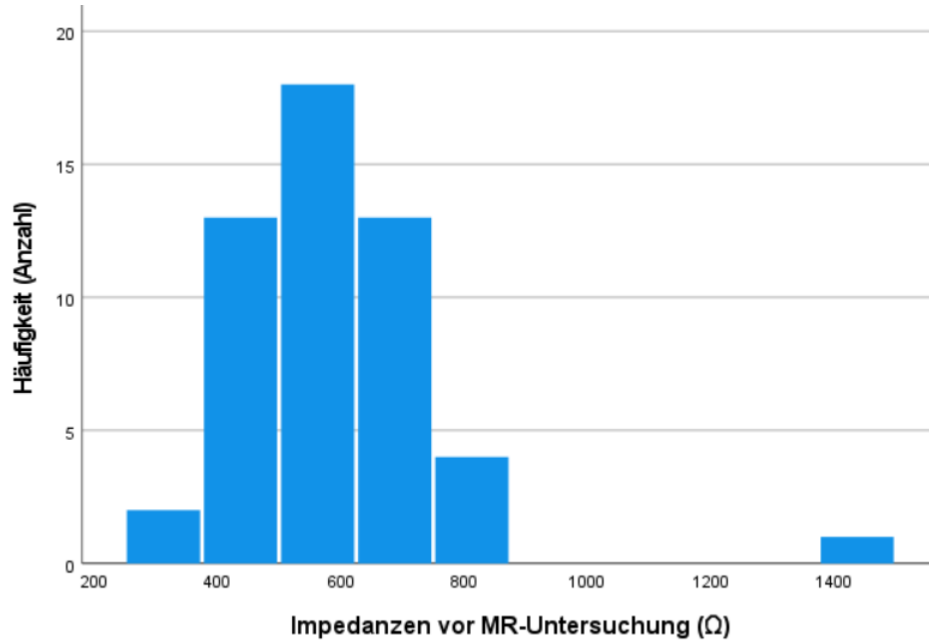


Abbildung 5 – Ventrikelsonden der Frauen – Impedanzen vor MR-Untersuchung (Ω)

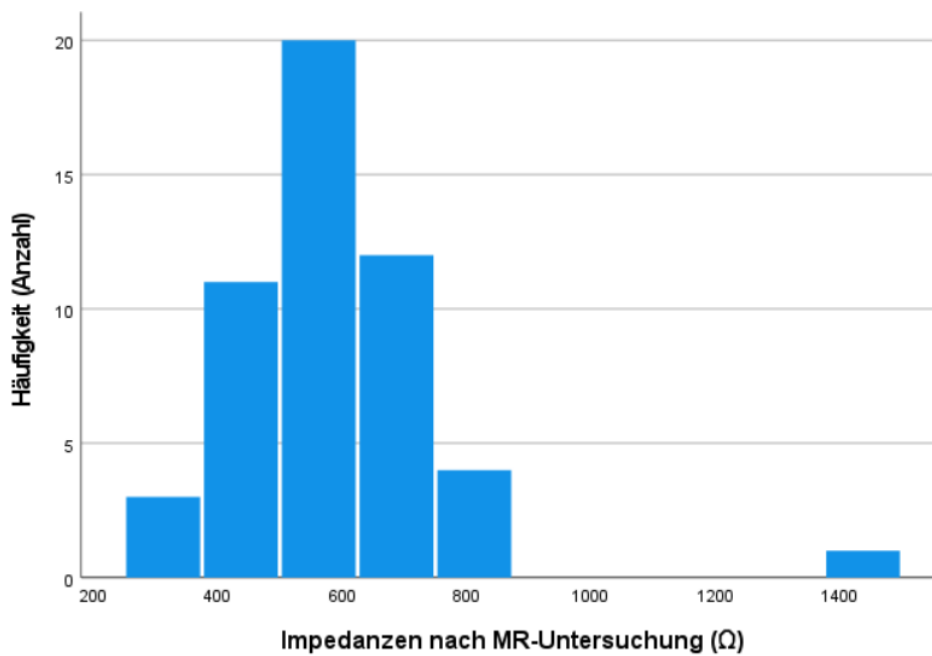


Abbildung 6 – Ventrikelsonden der Frauen – Impedanzen nach MR-Untersuchung (Ω)

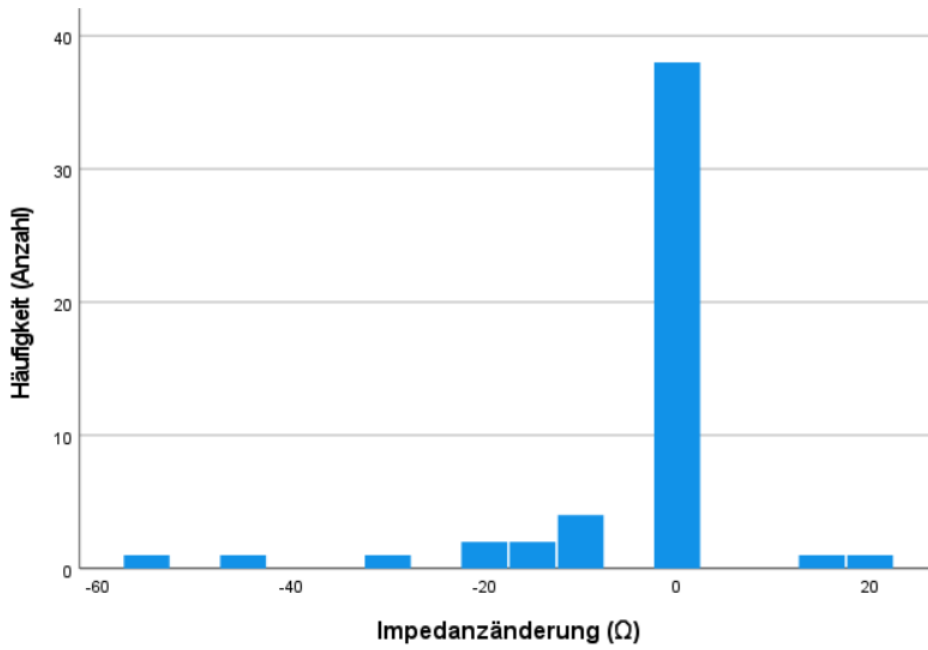


Abbildung 7 – Ventrikelsonden der Frauen – Impedanzänderung (Ω)

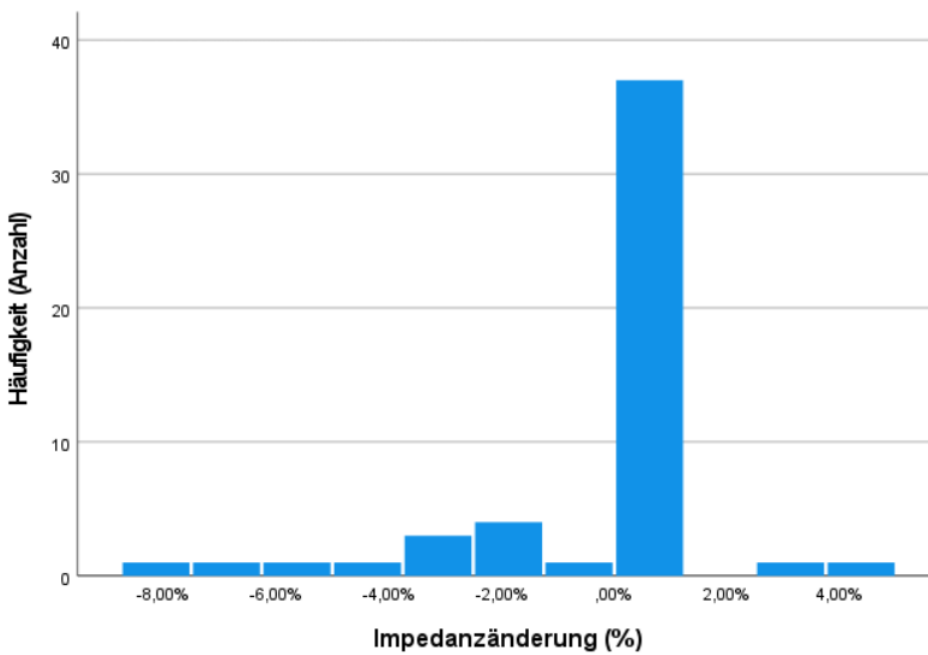


Abbildung 8 – Ventrikelsonden der Frauen – Impedanzänderung (%)

4.3.4 Impedanzänderungen in Abhängigkeit von der MR-Untersuchungsregion

Um Impedanzänderungen in Abhängigkeit von der Untersuchungsregion auswerten zu können, wurden die Untersuchungsregionen folgendermaßen aufgeteilt:

- Kopf- und Halsbereich
- Oberer Rumpfbereich
- Unterer Rumpfbereich
- Extremitäten

Impedanzänderungen bei MR-Untersuchungen im Kopf- und Halsbereich

Bei den 99 MR-Messungen im Kopf- und Halsbereich ergaben sich in 66 % der Fälle (65 Messungen) keine Impedanzänderungen. Die verbleibenden 34 % der Fälle (34 Messungen) teilten sich in 11 % Impedanzzunahmen (11 Messungen) und 23 % Impedanzabnahmen (23 Messungen) auf.

Die gemittelte Impedanz betrug vor MR-Untersuchung 503.11Ω ($\pm 158.23 \Omega$) und nach MR-Untersuchung 501.01Ω ($\pm 155.51 \Omega$). Die Differenz der Impedanz-Mittelwerte betrug somit -2.1Ω (bzw. -0.42%).

Bei den MR-Untersuchungen im Kopf- und Halsbereich war der minimale Impedanzwert vor MR-Untersuchung 240Ω , der maximale 1367Ω bei einem Medianwert von 470Ω , der minimale Impedanzwert nach MR-Untersuchung betrug 270Ω , der maximale 1367Ω bei einem Medianwert von 468Ω . Die Spannweite der Impedanzänderungen reichte von -61Ω bis $+58 \Omega$ bzw. von -8.10% bis $+16.76 \%$.

Bei den MR-Untersuchungen im Kopf- und Halsbereich ergab der Shapiro-Wilk-Test für die Impedanzen vor und nach MR-Untersuchung jeweils einen p-Wert von 0.000, damit $p \leq 0.05$, so dass die beiden Messgrößen nicht normalverteilt waren. Der t-Test wurde deshalb nicht angewendet und sein p-Wert von 0.190 wird hier nur zu Informationszwecken angegeben. Der Wilcoxon-Test ergab einen p-Wert von 0.062, damit $p > 0.05$, so dass sich die beiden Messgrößen bei den MR-Untersuchungen im Kopf- und Halsbereich nicht in signifikanter Weise unterschieden.

Impedanzänderungen bei MR-Untersuchungen im oberen Rumpfbereich

Bei den 39 MR-Messungen im oberen Rumpfbereich ergaben sich in 74 % der Fälle (29 Messungen) keine Impedanzänderungen. Die verbleibenden 26 % der Fälle (10 Messungen) teilten sich in 13 % Impedanzzunahmen (5 Messungen) und 13 % Impedanzabnahmen (5 Messungen) auf.

Die gemittelte Impedanz betrug vor MR-Untersuchung 502.38Ω ($\pm 117.88 \Omega$) und nach MR-Untersuchung 502.69Ω ($\pm 114.62 \Omega$). Die Differenz der Impedanz-Mittelwerte betrug somit $+0.31 \Omega$ (bzw. $+0.06 \%$).

Bei den MR-Untersuchungen im oberen Rumpfbereich war der minimale Impedanzwert vor MR-Untersuchung 282 Ω , der maximale 850 Ω bei einem Medianwert von 492 Ω , der minimale Impedanzwert nach MR-Untersuchung betrug 282 Ω , der maximale 850 Ω bei einem Medianwert von 490 Ω . Die Spannweite der Impedanzänderungen reichte von -53 Ω bis +38 Ω bzw. von -8.01 % bis +10.53 %.

Bei den MR-Untersuchungen im oberen Rumpfbereich ergab der Shapiro-Wilk-Test für die Impedanzen vor und nach MR-Untersuchung jeweils einen p-Wert von 0.221 bzw. 0.196, damit $p > 0.05$, so dass die beiden Messgrößen normalverteilt waren. Der Wilcoxon-Test wurde deshalb nicht angewendet und sein p-Wert von 0.721 wird hier nur zu Informationszwecken angegeben. Der t-Test ergab einen p-Wert von 0.892, damit $p > 0.05$, so dass sich die beiden Messgrößen bei den MR-Untersuchungen im oberen Rumpfbereich nicht in signifikanter Weise unterschieden.

Impedanzänderungen bei MR-Untersuchungen im unteren Rumpfbereich

Bei den 112 MR-Messungen im unteren Rumpfbereich ergaben sich in 68 % der Fälle (76 Messungen) keine Impedanzänderungen. Die verbleibenden 32 % der Fälle (36 Messungen) teilten sich in 11 % Impedanzzunahmen (12 Messungen) und 21 % Impedanzabnahmen (24 Messungen) auf.

Die gemittelte Impedanz betrug vor MR-Untersuchung 516.48 Ω ($\pm 153.91 \Omega$) und nach MR-Untersuchung 516.00 Ω ($\pm 153.74 \Omega$). Die Differenz der Impedanz-Mittelwerte betrug somit -0.48 Ω (bzw. -0.09 %).

Bei den MR-Untersuchungen im unteren Rumpfbereich war der minimale Impedanzwert vor MR-Untersuchung 263 Ω , der maximale 1493 Ω bei einem Medianwert von 500 Ω , der minimale Impedanzwert nach MR-Untersuchung betrug 254 Ω , der maximale 1493 Ω bei einem Medianwert von 500 Ω . Die Spannweite der Impedanzänderungen reichte von -48 Ω bis +131 Ω bzw. von -10.35 % bis +20.99 %.

Bei den MR-Untersuchungen im unteren Rumpfbereich ergab der Shapiro-Wilk-Test für die Impedanzen vor und nach MR-Untersuchung jeweils einen p-Wert von 0.000, damit $p \leq 0.05$, so dass die beiden Messgrößen nicht normalverteilt waren. Der t-Test wurde deshalb nicht angewendet und sein p-Wert von 0.775 wird hier nur zu Informationszwecken angegeben. Der Wilcoxon-Test ergab einen p-Wert von 0.184, damit $p > 0.05$, so dass sich die beiden Messgrößen bei den MR-Untersuchungen im unteren Rumpfbereich nicht in signifikanter Weise unterschieden.

Impedanzänderungen bei MR-Untersuchungen an Extremitäten

Bei den 91 MR-Messungen an Extremitäten ergaben sich in 71 % der Fälle (65 Messungen) keine Impedanzänderungen. Die verbleibenden 29 % der Fälle (26 Messungen) teilten sich in 8 % Impedanzzunahmen (7 Messungen) und 21 % Impedanzabnahmen (19 Messungen) auf.

Die gemittelte Impedanz betrug vor MR-Untersuchung 640.57Ω ($\pm 629.05 \Omega$) und nach MR-Untersuchung 640.85Ω ($\pm 628.44 \Omega$). Die Differenz der Impedanz-Mittelwerte betrug somit $+0.28 \Omega$ (bzw. $+0.04 \%$).

Bei den MR-Untersuchungen an Extremitäten war der minimale Impedanzwert vor MR-Untersuchung 239Ω der maximale 5076Ω bei einem Medianwert von 505Ω , der minimale Impedanzwert nach MR-Untersuchung betrug 255Ω der maximale 5076Ω bei einem Medianwert von 510Ω . Die Spannweite der Impedanzänderungen reichte von -44Ω bis $+107 \Omega$ bzw. von -7.47% bis $+26.16 \%$.

Bei den MR-Untersuchungen an Extremitäten ergab der Shapiro-Wilk-Test für die Impedanzen vor und nach MR-Untersuchung jeweils einen p-Wert von 0.000 , damit $p \leq 0.05$, so dass die beiden Messgrößen nicht normalverteilt waren. Der t-Test wurde deshalb nicht angewendet und sein p-Wert von 0.884 wird hier nur zu Informationszwecken angegeben. Der Wilcoxon-Test ergab einen p-Wert von 0.195 , damit $p > 0.05$, so dass sich die beiden Messgrößen bei den MR-Untersuchungen an Extremitäten nicht in signifikanter Weise unterschieden.

Bei keiner der MR-Untersuchungsregionen unterschieden sich die Impedanzen vor und nach MR-Untersuchung in signifikanter Weise.

4.3.5 Impedanzänderungen in Abhängigkeit vom Alter bei MR-Untersuchung

Um Zusammenhänge zwischen den beiden metrischen Größen Impedanzänderungen (in %) und dem Alter des Patienten bei MR-Untersuchung zu identifizieren, wurden bivariate Korrelationen mit Korrelationskoeffizienten nach Pearson berechnet. Dabei wurden Korrelationen sowohl für das gesamte Patientenkollektiv als auch für Untergruppen - aufgeteilt nach Geschlecht und Sondenlokalisierung - berechnet.

Die Korrelation der beiden Größen ergab beim gesamten Patientenkollektiv einen p-Wert von 0.588, bei der Untergruppe der Männer einen p-Wert von 0.469, bei der Untergruppe der Frauen einen p-Wert von 0.714, bei der Untergruppe der Ventrikelsonden einen p-Wert von 0.948 und bei der Untergruppe der Vorhofsonden einen p-Wert von 0.474.

Für die Untergruppe der Ventrikelsonden der Männer ergab sich ein p-Wert von 0.938, für die Untergruppe der Vorhofsonden der Männer ein p-Wert von 0.325, für die Untergruppe der Ventrikelsonden der Frauen ein p-Wert von 0.812 und für die Untergruppe der Vorhofsonden der Frauen ein p-Wert von 0.790.

Alle berechneten p-Werte waren größer als 0.05, so dass die beiden Messgrößen Impedanzänderungen (in %) und Alter des Patienten bei MR-Untersuchung nicht in signifikanter Weise korrelierten (siehe Abbildung 9).

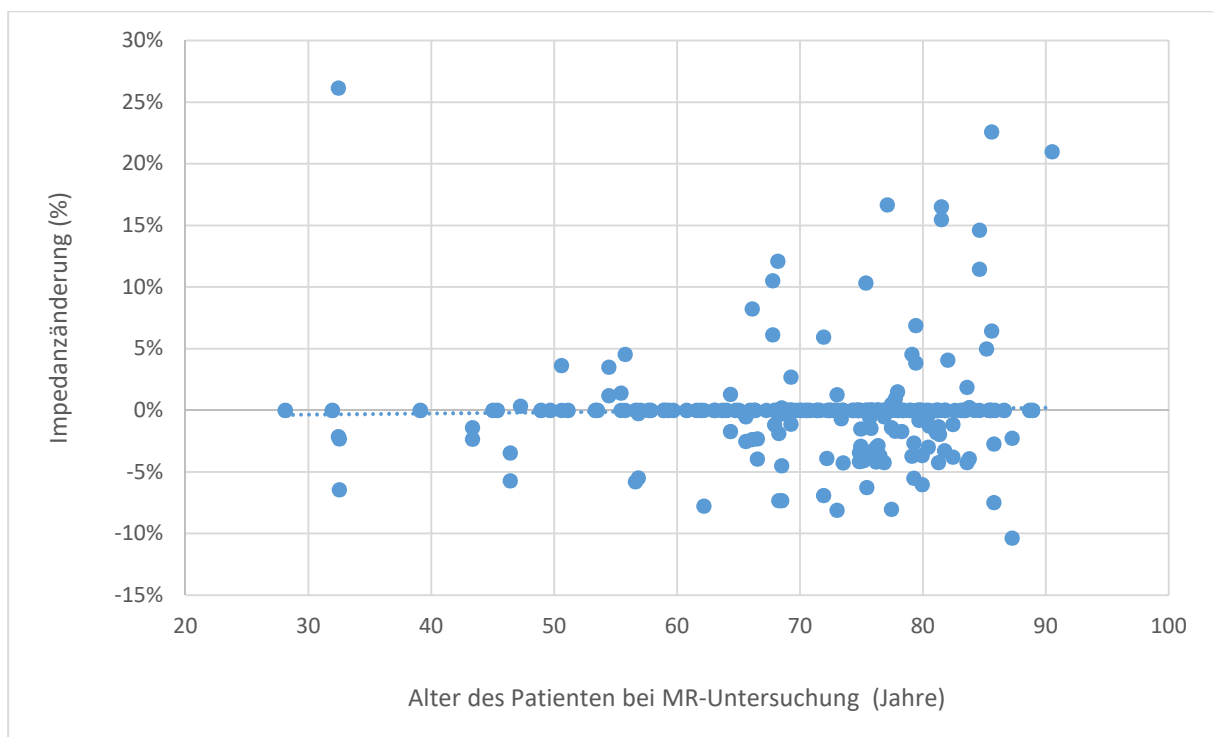


Abbildung 9 – Gesamtes Patientenkollektiv – Impedanzänderung (%) in Abhängigkeit vom Alter des Patienten bei MR-Untersuchung (Jahre)

4.3.6 Impedanzänderungen in Abhängigkeit von der Schrittmacher-Verweildauer

Um Zusammenhänge zwischen den beiden metrischen Größen Impedanzänderungen (in %) und der Schrittmacher-Verweildauer zu identifizieren, wurden bivariate Korrelationen mit Korrelationskoeffizienten nach Pearson berechnet. Dabei wurden Korrelationen sowohl für das gesamte Patientenkollektiv als auch für Untergruppen - aufgeteilt nach Geschlecht und Sondenlokalisierung - berechnet.

Die Korrelation der beiden Größen ergab beim gesamten Patientenkollektiv einen p-Wert von 0.579, bei der Untergruppe der Männer einen p-Wert von 0.688, bei der Untergruppe der Frauen einen p-Wert von 0.311, bei der Untergruppe der Ventrikelsonden einen p-Wert von 0.670 und bei der Untergruppe der Vorhofsonden einen p-Wert von 0.721.

Für die Untergruppe der Ventrikelsonden der Männer ergab sich ein p-Wert von 0.752, für die Untergruppe der Vorhofsonden der Männer ein p-Wert von 0.797, für die Untergruppe der Ventrikelsonden der Frauen ein p-Wert von 0.233 und für die Untergruppe der Vorhofsonden der Frauen ein p-Wert von 0.691.

Alle berechneten p-Werte waren größer als 0.05, so dass die beiden Messgrößen Impedanzänderungen (in %) und Schrittmacher-Verweildauer nicht in signifikanter Weise korrelierten (siehe Abbildung 10).

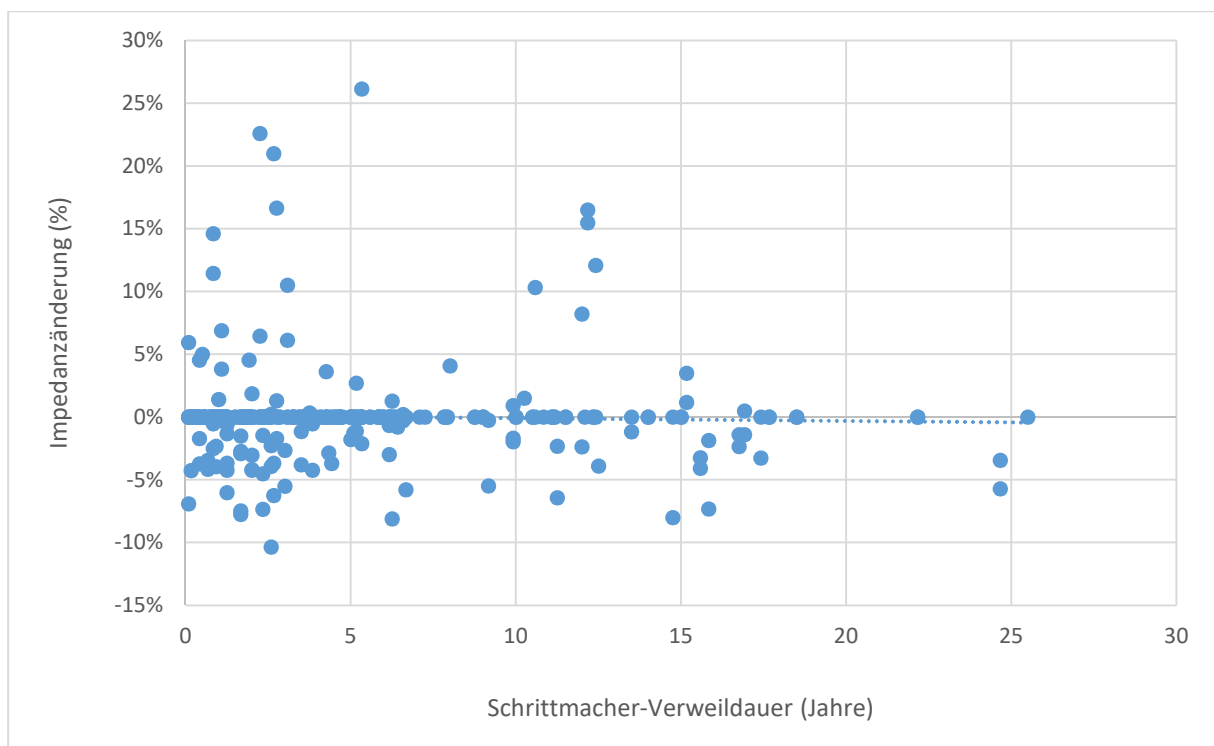


Abbildung 10 - Gesamtes Patientenkollektiv – Impedanzänderung (%) in Abhängigkeit von der Schrittmacher-Verweildauer (Jahre)

4.4 Zusammenfassung der Ergebnisse

Es wurden die Impedanzen der Schrittmacher-Sonden an einem Patientenkollektiv von 185 Patienten (mit 341 Ventrikel- und Vorhofsonden in Summe) vor und nach MR-Untersuchung ausgewertet.

Die Auswertung über das gesamte Patientenkollektiv ergab, dass der Mittelwert der Impedanzen nach MR-Untersuchung um 0.12 % niedriger war als vor MR-Untersuchung. Bei den 341 MR-Messungen ergaben sich in 69 % der Fälle (235 Messungen) keine Impedanzänderungen. Die verbleibenden 31 % der Fälle (106 Messungen) teilten sich in 10 % Impedanzzunahmen (35 Messungen) und 21 % Impedanzabnahmen (71 Messungen) auf. Auch wenn die Abnahme der gemittelten Impedanz um 0.12 % gering erscheint, so ist sie jedoch aufgrund des zugehörigen p-Wertes als signifikant einzustufen ($p = 0.023 \leq \alpha$, Signifikanzniveau $\alpha = 0.05$).

Zur weiteren Analyse wurden Untergruppen des Patientenkollektives ausgewertet - aufgeteilt nach Geschlecht, Sondenlokalisierung und MR-Untersuchungsregion.

Bei der Untergruppe der Frauen war der Mittelwert der Impedanzen nach MR-Untersuchung um 0.58% niedriger. Bei den 97 MR-Messungen der Frauen ergaben sich in 70 % der Fälle (68 Messungen) keine Impedanzänderungen. Die verbleibenden 30 % der Fälle (29 Messungen) teilten sich in 7 % Impedanzzunahmen (7 Messungen) und 23 % Impedanzabnahmen (22 Messungen) auf. Während es bei den Frauen zu einer Abnahme der gemittelten Impedanz (-0.58 %) kam, kam es in der Untergruppe der Männern zu einer Zunahme (+0.06%). Aufgrund der zugehörigen p-Werte ist die Abnahme der gemittelten Impedanz bei den Frauen als signifikant, die Zunahme bei den Männer jedoch als nicht signifikant einzustufen (Frauen $p = 0.003 \leq \alpha$; Männer $p = 0.696 > \alpha$).

Zur weiteren Analyse wurden in der Untergruppe der Frauen die Ventrikel- und Vorhofsonden getrennt ausgewertet.

Bei den Ventrikelsonden der Frauen war der Mittelwert der Impedanzen nach MR-Untersuchung um 0.67% niedriger. Bei den 51 MR-Messungen an den Ventrikelsonden der Frauen ergaben sich in 69 % der Fälle (35 Messungen) keine Impedanzänderungen. Die verbleibenden 29 % der Fälle (16 Messungen) teilten sich in 8 % Impedanzzunahmen (4 Messungen) und 23 % Impedanzabnahmen (12 Messungen) auf. Auch bei den Vorhofsonden der Frauen kam es zu einer Abnahme des Mittelwertes der Impedanzen nach MR-Untersuchungen. Die Abnahme fiel mit 0.47% jedoch geringer aus als bei den Ventrikelsonden der Frauen (0.67%). Aufgrund der zugehörigen p-Werte ist die Abnahme bei den Ventrikelsonden der Frauen als signifikant, jene bei den Vorhofsonden der Frauen jedoch als nicht signifikant einzustufen (Ventrikelsonden der Frauen $p = 0.028 \leq \alpha$; Vorhofsonden der Frauen $p = 0.149 > \alpha$).

Im Sinne einer Gegenprüfung ergab die Auswertung des gesamten Patientenkollektivs unter Ausschluss der Ventrikelsonden der Frauen, dass sich die Impedanzen vor und nach MR-Untersuchung dagegen nicht in signifikanter Weise unterschieden ($p = 0.124 > \alpha$). Der Mittelwert der Impedanzen war hier nach MR-Untersuchung auch nur um 0.01 % geringer als vor MR-Untersuchung.

In der Untergruppe der Männer wurden die Ventrikel- und Vorhofsonden ebenfalls getrennt ausgewertet, und es fanden sich in beiden Subgruppen keine signifikanten Änderungen der gemittelten Impedanz nach MR-Untersuchung. Auch bei Betrachtung des gesamten Patientenkollektivs fanden sich bei getrennter Auswertung von Ventrikel- und Vorhofsonden keine signifikanten Änderungen. Bei Untergruppierung nach MR-Untersuchungsregionen fanden sich ebenfalls keine signifikanten Impedanzänderungen nach MR-Untersuchung.

Vor diesem Hintergrund nimmt die Untergruppe der Ventrikelsonden der Frauen möglicherweise eine gewisse Sonderstellung ein.

Insgesamt korrelierten die Impedanzänderungen nicht in signifikanter Weise mit der Schrittmacher-Verweildauer und auch nicht mit dem Alter des Patienten bei MR-Untersuchung, weder bei der Auswertungen über das gesamte Patientenkollektiv noch bei Auswertungen über Untergruppen - aufgeteilt nach Geschlecht und Sondenlokalisierung.

Bei keinem der Patienten kam es im Rahmen der MR-Untersuchung zu Komplikationen wie z.B. einer Sondendislokation, einer Sondenperforation, einer Verbrennung oder einer Dysfunktion des Schrittmachers.

4.4.1 Abhängigkeit der Ergebnisse von der Testmethodik

Bei jenen Auswertungen, die Impedanzen vor und nach MR-Untersuchung verglichen, wurden stets drei Tests durchgeführt:

- 1) Test auf Normalverteilung für die Impedanzen vor MR-Untersuchung
- 2) Test auf Normalverteilung für die Impedanzen nach MR-Untersuchung
- 3) t-Test, wenn sowohl 1) als auch 2) normalverteilt waren, ansonsten Wilcoxon-Test

Dabei blieb das Thema der Alphafehler-Kumulierung bei multiplem Testens bisher unberücksichtigt. Die nachfolgenden Ansätze berücksichtigen dieses Thema und resultieren in Aussagen unterschiedlichen Differenzierungsgrades:

- A. Adjustierung des Signifikanzniveaus nach der Bonferroni-Methode [11]
- B. Single Test mit Wilcoxon-Test auf einem Signifikanzniveau von 0.05

Gemäß der Bonferroni-Methode sind zur Erzielung eines globalen Signifikanzniveaus von 0.05 die entsprechenden Sub-Tests auf einem adjustierten, lokalen Signifikanzniveau durchzuführen. Das lokale

Signifikanzniveau erhält man, in dem man das angestrebte globale Signifikanzniveau (hier: 0.05) durch die Anzahl der Sub-Tests teilt (hier: 3). Bei Einhaltung eines lokalen Signifikanzniveaus von 0.0167 (= $0.05 / 3$) findet man in den obigen Auswertungen nur noch eine einzige signifikante Impedanzänderung nach MR-Untersuchung, nämlich die Abnahme der gemittelten Impedanz in der Untergruppe der Frauen (im Gegensatz zur Impedanzzunahme bei den Männern). Der p-Wert des durchgeführten Wilcoxon-Tests beträgt für diese Impedanzabnahme 0.003. Da $0.003 \leq 0.01 / 3$, so könnte dieser p-Wert sogar als sehr signifikant eingestuft werden. Die abschließende Aussage nach Bonferroni-Korrektur ist also, dass die gemittelte Impedanz bei den Sonden der Frauen nach MR-Untersuchung in signifikanter Weise abnimmt – jedoch ohne Unterscheidung zwischen Vorhof- und Ventrikelsonden.

Eine Alphafehler-Kumulierung obiger Art kann vermieden werden, indem man anstelle der drei Tests nur einen einzigen Test durchführt. Dieser Test muss dann sowohl auf normal- als auch auf nicht normalverteilte Größen anwendbar sein. Letztere Eigenschaft besitzt der Wilcoxon-Test. Auf einem Signifikanzniveau von 5% unterstützt er damit natürlich die obige Aussage nach Bonferroni-Korrektur. Zudem unterstützt er noch die Aussage, dass sowohl die Abnahme der gemittelten Impedanz bei den Vorhofsonden ($p = 0.046 \leq \alpha$) als auch bei den Ventrikelsonden ($p = 0.028 \leq \alpha$) der Frauen signifikant ist. Auf einem Signifikanzniveau von 0.03 nehmen bei den Frauen die Ventrikelsonden - im Gegensatz zu den Vorhofsonden – möglicherweise eine gewisse Sonderstellung ein.

5 Diskussion

Das untersuchte Patientenkollektiv umfasste 185 Schrittmacher-Patienten, davon waren 28 % Frauen und 72% Männer. Die implantierten Schrittmacher waren allesamt Ein- oder Zweikammer-Schrittmacher, die nicht mit „MR conditional“ gekennzeichnet waren. Bei keinem Patienten war ein Kardioverter-Defibrillator-System (ICD System) implantiert. Die Sonden der Patienten waren alle im rechten Vorhof oder im rechten Ventrikel lokalisiert. Keine der Sonden war links- oder epikardial lokalisiert.

Im Rahmen der Untersuchung wurden die Impedanzen der Schrittmachersonden vor und nach der MR-Untersuchung verglichen. Es wurden auch Untergruppen ausgewertet – aufgeteilt nach Geschlecht, Sondenlokalisierung und MR-Untersuchungsregion.

Die Auswertung ergab, dass die Untergruppe der Frauen hier eine Sonderstellung einnimmt. Bei dieser Untergruppe kam es zu einer Abnahme der Sondenimpedanz nach MR-Untersuchungen, die zwar gering ausfiel ($< 1\%$), aber dennoch als signifikant einzustufen ist. Dabei waren die Impedanzänderungen bei den Frauen an den Ventrikelsonden etwas ausgeprägter als an den Vorhofsonden. In der Untergruppe der Männer kam es – im Gegensatz zu den Frauen – zu einer Impedanzzunahme.

Bei den anderen Untergruppen fanden sich keine signifikanten Impedanzänderungen. Auch korrelierten die Impedanzänderungen nicht in signifikanter Weise mit der Schrittmacher-Verweildauer und auch nicht mit dem Alter des Patienten bei MR-Untersuchung.

Russo et al. untersuchten in einer 2017 veröffentlichten Studie an 1500 Patienten (1000 SM- und 500 ICD-Patienten) unter anderem Impedanzänderung vor und nach MRT-Untersuchung [12]. In der Studie wurden Impedanzänderungen größer oder gleich 50 Ohm als signifikant bezeichnet. Insgesamt kam es bei den SM-Patienten in 3.3% der Fälle zu einer signifikanten Impedanzänderung. Dabei fanden sich Impedanzänderungen bei 1.2 % der Vorhofsonden, bei 4.8 % der rechtsventrikulären Sonden und bei 14.3 % der linksventrikulären Sonden. Insgesamt traten Impedanzabnahmen mehr als doppelt so häufig auf wie Impedanzzunahmen. Auch hier korrelierten die Impedanzänderungen nicht signifikant mit der Schrittmacher-Verweildauer.

In der vorliegenden Arbeit wurden Impedanzänderungen größer oder gleich 50 Ohm in 2.9 % der Fälle gefunden (10 von 341). Impedanzänderungen größer oder gleich 50 Ohm fanden sich bei 1.3 % der Vorhofsonden (2 von 156) und bei 4.3 % der rechtsventrikulären Ventrikelsonden (8 von 185). Bei keinem der Patienten war eine Sonde linkskardial lokalisiert. Auch in der vorliegenden Arbeit traten

Impedanzabnahmen mehr als doppelt so häufig auf wie Impedanzabnahmen. Insgesamt entsprechen somit die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit weitgehend jenen der obigen Arbeit.

Nazarian et al. untersuchten in einer 2017 veröffentlichten Studie an 1509 Patienten (davon 58% SM- und 42% ICD-Patienten) unter anderem Impedanzänderung vor und nach MRT-Untersuchung [13]. In der Studie wurden Impedanzänderungen größer als 20 % betrachtet. Insgesamt kam es bei den SM-Patienten in 0.37% der Fälle zu einer Impedanzänderung größer als 20 %. Dabei fanden sich derartige Impedanzänderungen bei 0.38 % der Vorhofsonden, bei 0.35 % der rechtsventrikulären Sonden und bei 0.50 % der linksventrikulären Sonden. Insgesamt traten Impedanzabnahmen (größer als 20%) fast doppelt (1.8 mal) so häufig auf wie Impedanzzunahmen (größer als 20%).

In der vorliegenden Arbeit wurden Impedanzänderungen größer als 20 % in 0.88 % der Fälle gefunden (3 von 341). Impedanzänderungen größer als 20 % sich fanden sich bei 0.64% der Vorhofsonden (1 von 156) und bei 1.1 % der rechtsventrikulären Ventrikelsonden (2 von 185). Bei keinem der Patienten war eine Sonde linkskardial lokalisiert. Insgesamt entsprechen somit die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit in der Größenordnung jenen der obigen Arbeit.

Rahsepar et al. fanden in einer 2020 veröffentlichten Langzeitstudie mit 1464 Patienten eine statistisch nicht signifikante Impedanzabnahme vor und nach MR-Untersuchung von weniger als 2% [14].

Strach et al. fanden 2010 in einer Studie mit 114 Patienten eine nicht signifikante Impedanzabnahme von weniger als 1% [15]. Zudem wurden in den letzten 15 Jahren noch eine Reihe weiterer, insbesondere auch kleinerer Studien veröffentlicht, die ebenfalls vergleichsweise geringgradige Impedanzänderungen dokumentieren [16-28].

Somit reihen sich die Ergebnisse dieser Arbeit ein in eine Vielzahl von Studien, die zu diesem Thema ebenfalls keine bzw. keine klinisch signifikanten Impedanzänderungen der Schrittmachersonden vor und nach MR-Untersuchungen gefunden haben. Die Ergebnisse dieser Arbeit unterscheiden jedoch insofern, als in den bisher veröffentlichten Studien keine Ergebnisse bezüglich Impedanzänderungen in Abhängigkeit vom Geschlecht vorgelegt wurden.

Die in dieser Arbeit untersuchten Impedanzänderungen bei den Schrittmachersonden der Frauen waren mit $p = 0.003$ sehr signifikant. Wie eingangs erwähnt wurden die Impedanzänderungen im Rahmen von MR-Untersuchungen in einem offenen Niederfeld MRT mit 0.2 Tesla gemessen. Heutzutage werden im Routinebetrieb zunehmend MR-Untersuchungen in MRTs mit 1.5 Tesla durchgeführt. Diese Arbeit könnte daher Anlass sein, im Rahmen von zukünftigen Studien in Hochfeld-MRTs ein besonderes Augenmerk auf Impedanzänderungen bei den Schrittmachersonden der Frauen zu richten.

6 Zusammenfassung

In den achtziger Jahren des letzten Jahrhunderts hielt die Magnetresonanztomographie (MR) Einzug in den klinischen Alltag. Gegenüber der Computertomographie bietet die MR einen besseren Weichteilkontrast und ist nicht mit schädlicher ionisierender Strahlung behaftet. MR-Untersuchungen wurden deshalb auch an Patienten mit Herzschrittmachern vorgenommen. In den Folgejahren wurde wiederholt über MR-assoziierte Komplikationen berichtet und in Einzelfällen sogar über mögliche Todesfälle bei Schrittmacherpatienten spekuliert[5, 6].

MR-Untersuchungen bei Schrittmacherpatienten können zu Schäden an den Schrittmacherkomponenten, zu lebensbedrohlichen Herzrhythmusstörungen sowie zu Gewebeschäden am Herzmuskel führen. Schrittmachersonden können das MR-Hochfrequenzsignal ähnlich wie Antennen empfangen und dessen Energie an der Sondenspitze an das Herzmuskelgewebe abgeben, was zu thermischen Gewebeschäden des Herzmuskels, Änderung der Impedanz (Wechselstromwiderstand) der Sonden oder unter Umständen auch zu irreversiblen Reizschwellenanstiegen führen kann. Jahrelang galt deshalb die Durchführung von MR-Untersuchungen bei Patienten mit implantiertem Schrittmacher (SM) bzw. Kardioverter-Defibrillator-System (ICD) als absolute Kontraindikation[7].

Verschiedene Arbeitsgruppen konnten in den letzten Jahren zeigen, dass die Durchführung von MR-Untersuchungen bei Patienten mit nicht „MR conditional“ Schrittmacher- bzw. Kardioverter-Defibrillator-Systemen „unter Abwägung des individuellen Nutzen/Risiko-Profiles als Einzelfallentscheidung und als zulassungsüberschreitende Anwendung („off-label use“) unter dezidierten Sicherheitsvorkehrungen mit einem vertretbaren Risiko möglich ist“[7].

In der Radiologie der Tagesklinik München-Nord wurden in den letzten Jahren zahlreiche MR-Untersuchungen an Patienten mit Schrittmachern unter kontrollierten Bedingungen in einem offenen Niederfeld MRT mit 0.2 Tesla durchgeführt. Die implantierten Schrittmacher des in dieser Arbeit untersuchten Patientenkollektivs von 185 Patienten waren allesamt Ein- oder Zweikammer-Schrittmacher, die nicht mit „MR conditional“ gekennzeichnet waren. Die Sonden dieser Patienten waren alle im rechten Vorhof oder im rechten Ventrikel lokalisiert. Keine der Sonden war links- oder epikardial lokalisiert.

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, dieses umfangreiche Datenmaterial im Hinblick auf Impedanzänderungen zu untersuchen und zu bewerten. Dabei wurden die Impedanzen der Schrittmachersonden vor und nach der MR-Untersuchung verglichen. Es wurden auch Untergruppen ausgewertet – aufgeteilt nach Geschlecht, Sondenlokalisierung und MR-Untersuchungsregion.

Die Auswertung ergab, dass die Untergruppe der Frauen hier eine Sonderstellung einnimmt. Bei dieser Untergruppe kam es zu einer Abnahme der Sondenimpedanz nach MR-Untersuchungen, die zwar gering ausfiel ($< 1\%$), aber dennoch als signifikant einzustufen ist. Dabei waren die Impedanzänderungen bei den Frauen an den Ventrikelsonden etwas ausgeprägter als an den Vorhofsonden. In der Untergruppe der Männer kam es – im Gegensatz zu den Frauen – zu einer Impedanzzunahme.

Bei den anderen Untergruppen fanden sich keine signifikanten Impedanzänderungen. Auch korrelierten die Impedanzänderungen nicht in signifikanter Weise mit der Schrittmacher-Verweildauer und auch nicht mit dem Alter des Patienten bei MR-Untersuchung.

Die in dieser Arbeit untersuchten Impedanzänderungen bei den Schrittmachersonden der Frauen waren mit $p = 0.003$ sehr signifikant. Wie eingangs erwähnt wurden die Impedanzänderungen im Rahmen von MR-Untersuchungen in einem offenen Niederfeld MRT mit 0.2 Tesla gemessen. Heutzutage werden im Routinebetrieb zunehmend MR-Untersuchungen in MRTs mit 1.5 Tesla durchgeführt. Diese Arbeit könnte daher Anlass sein, im Rahmen von zukünftigen Studien in Hochfeld-MRTs ein besonderes Augenmerk auf Impedanzänderungen bei den Schrittmachersonden der Frauen zu richten.

7 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 - Gesamtes Patientenkollektiv – Impedanzen vor MR-Untersuchung (Ω).....	12
Abbildung 2 – Gesamtes Patientenkollektiv – Impedanzen nach MR-Untersuchung (Ω)	12
Abbildung 3 – Gesamtes Patientenkollektiv – Impedanzänderung (Ω)	13
Abbildung 4 – Gesamtes Patientenkollektiv – Impedanzänderung (%)	13
Abbildung 5 – Ventrikelsonden der Frauen – Impedanzen vor MR-Untersuchung (Ω)	23
Abbildung 6 – Ventrikelsonden der Frauen – Impedanzen nach MR-Untersuchung (Ω)	23
Abbildung 7 – Ventrikelsonden der Frauen – Impedanzänderung (Ω)	24
Abbildung 8 – Ventrikelsonden der Frauen – Impedanzänderung (%)	24
Abbildung 9 – Gesamtes Patientenkollektiv – Impedanzänderung (%) in Abhängigkeit vom Alter des Patienten bei MR-Untersuchung (Jahre).....	28
Abbildung 10 - Gesamtes Patientenkollektiv – Impedanzänderung (%) in Abhängigkeit von der Schrittmacher-Verweildauer (Jahre)	29

8 Danksagung

Zunächst möchte ich allen Menschen danken, die mich im Laufe meiner Dissertation begleitet und unterstützt haben.

Sehr herzlich möchte ich meinem Doktorvater Herrn PD Dr. med. Peter Lamm danken. Er hatte für mich stets ein offenes Ohr und dieses Vorhaben immerzu mit Rat und Tat unterstützt und gefördert.

Meinem Betreuer Herrn Dr. med. Michael Hinz, der den Stein erst ins Rollen brachte und mich zur Durchführung dieser Arbeit inspirierte, gilt mein ganz besonderer Dank für die Zurverfügungstellung der Messdaten - sowohl ihm als auch dem Team der Radiologie München- Nord.

Gedankt sei auch Herrn Dr. Michael Wiseman, dessen SPSS-Kurs am Leibnitz- Rechenzentrum mir bei der statistischen Auswertung der Messdaten außerordentlich geholfen hat. Seine humorvolle Art hat mir den Zugang zu diesem trockenen und doch wichtigen Thema wesentlich erleichtert.

Zuletzt auch ein ganz großes und herzliches Dankeschön an meinen Sohn Martin, meinen Lebensgefährten Thomas und an meine Familie für die unendliche Geduld und die stets liebevollen Aufmunterungen.

9 Literaturverzeichnis

1. MedMuseum, S.H. *A Lifesaver in a Plastic Cup - A history of pacemakers at Siemens*. 2018 February 7, 2021]; Available from: <https://www.medmuseum.siemens-healthineers.com/en/stories-from-the-museum/herzschriftmacher>.
2. Times, T.N.Y. *Arne H. W. Larsson, 86; Had First Internal Pacemaker*. 2002 February 7, 2021]; Available from: <https://www.nytimes.com/2002/01/18/world/arne-h-w-larsson-86-had-first-internal-pacemaker.html>.
3. Markewitz, A. and B. Herzschrittmacher, *Jahresbericht 2017 des Deutschen Herzschrittmacher- und Defibrillator-Registers–Teil 1: Herzschrittmacher*. *Herzschrittmachertherapie+ Elektrophysiologie*, 2019. **30**(4): p. 377-388.
4. Cadieu, R., et al., *Central nervous system MRI and cardiac implantable electronic devices*. *J Neuroradiol*, 2017. **44**(1): p. 1-9.
5. Irnich, W., et al., *Do we need pacemakers resistant to magnetic resonance imaging?* *EP Europace*, 2005. **7**(4): p. 353-365.
6. Bartsch, C., et al., *Postmortale Herzschrittmacherfunktionsdiagnostik*. *Rechtsmedizin*, 2003. **13**(3): p. 147-152.
7. Sommer, T., et al., *MR-Untersuchungen bei Patienten mit Herzschrittmachern und implantierbaren Kardioverter-Defibrillatoren*. *Der Kardiologe*, 2017. **11**(2): p. 97-113.
8. Roguin, A., et al., *Magnetic resonance imaging in individuals with cardiovascular implantable electronic devices*. *Europace*, 2008. **10**(3): p. 336-346.
9. Indik, J.H., et al., *2017 HRS expert consensus statement on magnetic resonance imaging and radiation exposure in patients with cardiovascular implantable electronic devices*. *Heart Rhythm*, 2017. **14**(7): p. e97-e153.
10. Mourad, A.R., M.H. Kim, and M.M. Kirk, *A case series of anomalous high pacing lead impedances in normally functioning leads*. *HeartRhythm Case Reports*, 2015. **1**(6): p. 449-452.
11. Bender, R. and A. Ziegler, *Multipler Testen*. *DMW-Deutsche Medizinische Wochenschrift*, 2002. **127**(Suppl. Statistik): p. T 4-T 7.
12. Russo, R.J., et al., *Assessing the Risks Associated with MRI in Patients with a Pacemaker or Defibrillator*. *New England Journal of Medicine*, 2017. **376**(8): p. 755-764.
13. Nazarian, S., et al., *Safety of magnetic resonance imaging in patients with cardiac devices*. *New England Journal of Medicine*, 2017. **377**(26): p. 2555-2564.
14. Rahsepar, A.A., et al., *The relationship between MRI radiofrequency energy and function of nonconditional implanted cardiac devices: a prospective evaluation*. *Radiology*, 2020. **295**(2): p. 307-313.
15. Strach, K., et al., *Low-field magnetic resonance imaging: increased safety for pacemaker patients?* *Europace*, 2010. **12**(7): p. 952-60.
16. Sommer, T., et al., *Strategy for safe performance of extrathoracic MRI at 1.5 T in the presence of cardiac pacemakers in non-pacemaker dependent patients: A prospective study with 115 examinations*. *Circulation*, 2006. **114**.
17. Nazarian, S., R. Beinart, and H.R. Halperin, *Magnetic resonance imaging and implantable devices*. *Circulation: Arrhythmia and Electrophysiology*, 2013. **6**(2): p. 419-428.
18. Sommer, T., C. Vahlhaus, and G. Lauck, *MR imaging and cardiac pacemakers: in vitro evaluation and in vivo studies in 51 patients at 0.5 T*. *Radiology*, 2000. **215**: p. 869.
19. Naehle, C.P., et al., *Safety of brain 3-T MR imaging with transmit-receive head coil in patients with cardiac pacemakers: pilot prospective study with 51 examinations*. *Radiology*, 2008. **249**(3): p. 991-1001.
20. Naehle, C.P., et al., *Evaluation of cumulative effects of MR imaging on pacemaker systems at 1.5 Tesla*. *Pacing Clin Electrophysiol*, 2009. **32**(12): p. 1526-35.
21. Schmiedel, A., et al., *[Magnetic resonance imaging of the brain in patients with cardiac pacemakers. Experimental and clinical investigations at 1.5 Tesla]*. *Rofo*, 2005. **177**(5): p. 731-44.

22. Nazarian, S., et al., *Clinical utility and safety of a protocol for noncardiac and cardiac magnetic resonance imaging of patients with permanent pacemakers and implantable-cardioverter defibrillators at 1.5 tesla*. *Circulation*, 2006. **114**(12): p. 1277-84.
23. Martin, E.T., et al., *Magnetic resonance imaging and cardiac pacemaker safety at 1.5-Tesla*. *Journal of the American College of Cardiology*, 2004. **43**(7): p. 1315-1324.
24. Mollerus, M., et al., *Magnetic resonance imaging of pacemakers and implantable cardioverter-defibrillators without specific absorption rate restrictions*. *Europace*, 2010. **12**(7): p. 947-51.
25. Shah, A.D., et al., *Magnetic resonance imaging safety in nonconditional pacemaker and defibrillator recipients: A meta-analysis and systematic review*. *Heart Rhythm*, 2018. **15**(7): p. 1001-1008.
26. Strom, J.B., et al., *Safety and utility of magnetic resonance imaging in patients with cardiac implantable electronic devices*. *Heart Rhythm*, 2017. **14**(8): p. 1138-1144.
27. Wilkoff, B.L., D. Bello, and M. Taborsky, *Magnetic resonance imaging in patients with a pacemaker system designed for the magnetic resonance environment*. *Heart Rhythm*, 2011. **8**: p. 65.
28. Gimbel, J.R., et al., *Randomized trial of pacemaker and lead system for safe scanning at 1.5 Tesla*. *Heart Rhythm*, 2013. **10**(5): p. 685-91.



LUDWIG-
MAXIMILIANS-
UNIVERSITÄT
MÜNCHEN

Promotionsbüro
Medizinische Fakultät



Eidesstattliche Versicherung

Hüttl, Bettina

Name, Vorname

Ich erkläre hiermit an Eides statt,

dass ich die vorliegende Dissertation mit dem Titel

**Vergleich von Impedanz-Messungen an Herzschrittmacher-Sonden vor und nach
Niederfeld-MRT-Untersuchung**

selbständig verfasst, mich außer der angegebenen keiner weiteren Hilfsmittel bedient und alle Erkenntnisse, die aus dem Schrifttum ganz oder annähernd übernommen sind, als solche kenntlich gemacht und nach ihrer Herkunft unter Bezeichnung der Fundstelle einzeln nachgewiesen habe.

Ich erkläre des Weiteren, dass die hier vorgelegte Dissertation nicht in gleicher oder in ähnlicher Form bei einer anderen Stelle zur Erlangung eines akademischen Grades eingereicht wurde.

München, den 02.02.2023

Ort, Datum

Bettina Hüttl

Unterschrift Doktorandin bzw. Doktorand