



Bundesministerium  
für Forschung, Technologie  
und Raumfahrt

Fachlicher Schlussbericht des BMFTR Forschungsvorhabens

KMU-Innovativ: Medizintechnik

**RAMI: Robotische Bewegungsapparatur für dynamische  
MRT-Aufnahmen des Fußes und Sprunggelenks**

Teilvorhaben:

MRT-kompatible Apparatur zur Erzeugung assistierter  
Gelenk-Bewegungskinematik während schneller MR-Bildaufnahmen

**Teil II: Eingehende Darstellung**

**Teilprojektleiter:**

Dr. Ilan Elias  
MotionRAD GmbH  
Am Monmacher Kreisel 3  
55120 Mainz  
Tel: 0176-47597136  
Email: [elias@motionrad.com](mailto:elias@motionrad.com)

10. November 2025

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Durchgeführte Projektarbeiten und deren Ergebnisse .....</b>	<b>3</b>
1.1	Projektziele .....	3
1.2	Stand von Wissenschaft und Technik bei Projektbeginn .....	5
1.3	Projekttablauf / Meilenstein .....	6
1.3.1	Systemdefinition und Risikobewertung [AP1 + AP2].....	6
1.3.2	Entwicklung der mechanischen und elektronischen Subsysteme [AP4] .....	7
1.3.4	Integration der Software und drahtloser Signalübertragungskette zwischen MRT-Raum und Kontrollraum [AP11] .....	9
1.3.5	Auswahl passender Microcontroller [AP11].....	10
1.3.6	Integration des Mehrkanal-Detektors [AP12].....	15
1.3.7	Entwicklung und Bau der Steuereinheit (Bedienkonsole im Kontrollraum) [AP 16]	15
1.3.8.	Messungen zur Patientensicherheitsgewährleistung [AP17] und Vorbereitung Sicherheits- und Zertifizierungsphase [AP18, AP20].....	16
1.3.8	Projektbeginn, -verzögerungen und Anpassungen.....	17
1.3.9	Technische Zusammenfassung.....	17
1.3.10	Klinische Probandenstudie [AP19] .....	20
<b>2</b>	<b>Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....</b>	<b>21</b>
<b>3</b>	<b>Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten.....</b>	<b>22</b>
3.1	Wissenschaftliches Fazit.....	23
3.2	Verwertbarkeit der Ergebnisse.....	24
<b>4</b>	<b>Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordene Fortschritte bei anderen Stellen.....</b>	<b>25</b>
<b>5</b>	<b>Wissenstransfer.....</b>	<b>26</b>
<b>6</b>	<b>Aus dem Projekt entstandene Publikationen .....</b>	<b>27</b>
6.1	Tagungsbeiträge.....	27
<b>7</b>	<b>Literatur.....</b>	<b>28</b>

### Tabellenverzeichnis:

Tabelle 1: Verbundpartner im Projekt .....	4
Tabelle 2: Übersicht der spezifizierten Bewegungsparameter der anatomischen Gelenke während der schnellen MRT-Aufnahmen mit der Fußapparatur.....	7
Tabelle 3: Übersicht der geplanten Verwertungsmaßnahmen .....	24

# 1 Durchgeführte Projektarbeiten und deren Ergebnisse

## 1.1 Projektziele

Das Teilvorhaben A verfolgte das Ziel, eine vollständig MRT-kompatible robotische Bewegungsapparatur zu entwickeln, die kontrollierte, passive und reproduzierbare Bewegungen des menschlichen Fußes und Sprunggelenks während einer Magnetresonanztomographie ermöglicht. Dadurch sollte die Darstellung funktioneller Instabilitäten und dynamischer Gelenkmechanik in vivo möglich werden, um pathologische Zustände bildgebend zu erfassen.

Die Apparatur sollte definierte Bewegungsachsen ausführen, die entweder vorprogrammiert oder individuell gesteuert werden können. Dabei war eine exakte Kontrolle über Amplitude, Geschwindigkeit und Belastung der Bewegungen erforderlich. Ziel war es, standardisierte Bewegungsprotokolle zu schaffen, die sowohl für die Forschung (Biomechanik) als auch für die klinische radiologische Diagnostik eingesetzt werden können.

Die technische Zielstellung umfasste die Entwicklung eines Gesamtsystems, bestehend aus:

- einer mechanischen Struktur
- MR-kompatiblen Aktuatoren
- Sensorik
- elektronischer Steuerung und Sicherheitsüberwachung,
- Software- und Benutzerschnittstelle sowie
- einer integrierten Mehrkanal-MR-Empfangseinheit

Das System sollte so konzipiert werden, dass alle Komponenten innerhalb des statischen Magnetfeldes und der dynamischen Gradienten-Felder des MRT betrieben werden können, ohne Artefakte oder elektromagnetische Störungen zu erzeugen und ohne Sicherheitsrisiken darzustellen.

Die MotionRAD GmbH trug die Gesamtverantwortung für die Entwicklung und Integration dieser Subsysteme und leitete die Arbeitspakete AP 1, 2, 4, 9, 11, 12, 16, 18, 19 und 20. Darüber hinaus fungierte das Unternehmen als Verbundkoordinator für die technische Abstimmung mit den Partnerinstitutionen (siehe Tabelle 1).

Ziel des Gesamtvorhabens RAMI war es, bis Projektende einen validierten elektromechanischen Demonstrator mit integrierter dedizierter Mehrkanal-Empfangsspule zu entwickeln, der in realen 1,5 T- und 3 T-Magnetresonanztomographen klinisch an gesunden Probanden getestet werden kann, ohne die Bildgebung zu stören.

**Tabelle 1: Verbundpartner im Projekt**

	<b>Firma / Institut</b>	<b>Anschrift</b>	<b>Ansprechpartner</b>	<b>Vorwiegende Aufgaben im Projekt</b>
<b>A</b>	MotionRAD GmbH	Am Mombacher Kreisel 3, 55120 Mainz	Dr. med. Elias, Ilan	Entwicklung der MR-kompatiblen Fußapparaturen für 1.5T & 3T so- wie klinische Pro- bandenstudie
<b>B</b>	Technische Hoch- schule Mittelhessen Institut für Medizinische Physik und Strahlen- schutz	Wiesenstr. 14, 35390 Gießen	Prof. Dr. rer. phys. Keil, Boris	Entwicklung der MRT Empfangs- spulen 1.5T & 3T
<b>C</b>	Philipps-Universität Marburg Klinik für Diag- nostische und Interven- tionelle Radiologie	Baldinger Str. 1, 35043 Marburg	Prof. Dr. med. Mahnken, Andreas H., MBA  Dr.med. Dr.rer. nat. König, Alexander	Bereitstellung der MRT Infrastruktur

## 1.2 Stand von Wissenschaft und Technik bei Projektbeginn

Das Teilvorhaben sollte erstmals die „bewegte“ Radiologie durch ein neuartiges Medizinprodukt in die klinische Machbarkeit überführen. Als Demonstration und Erprobung des Ansatzes lag der Fokus zunächst auf der Anatomie des oberen und unteren Sprunggelenks (OSG & USG) sowie des Fußes.

Hintergrund dieses Ansatzes war der problematische Sachverhalt, dass Patienten mit Beschwerden des Bewegungsapparates (z. B. OSG, Fuß, Knie oder Halswirbelsäule) trotz persistierender klinischer Symptome häufig nur eine konventionelle statische MRT-Untersuchung erhalten. Bestimmte Verletzungen oder Instabilitäten bleiben dabei oft unentdeckt, da sie nur unter Belastung oder Bewegung der Strukturen sichtbar werden.

Die Tatsache, dass dynamische Gelenkfunktionen der statischen Bildgebung verborgen bleiben, stellt sozioökonomisch ein erhebliches Problem dar: Patienten mit falsch-negativen Befunden werden häufig zu lange falsch oder gar nicht behandelt, obwohl die klinische Symptomatik fortbesteht. Eine Lösung dieses Problems erfordert eine substanzielle methodische Verbesserung der Differenzialdiagnostik gegenüber dem gegenwärtigen klinischen Standard. Das Vorhaben zielte daher darauf ab, mittels funktioneller, dynamischer MRT-Untersuchungen diesen unzureichenden Status signifikant zu verbessern.

Zu Projektbeginn war die muskuloskeletale MRT eine etablierte Methode für die strukturelle Diagnostik, jedoch nur eingeschränkt für funktionelle Untersuchungen geeignet. Die Bildgebung erfolgte üblicherweise statisch, wodurch Informationen zu Gelenkinstabilitäten, Bewegungskoordination oder dynamischen Abläufen nicht erfasst werden konnten. Frühere Ansätze nutzten Eigenbewegungen der Patienten, was zu unkontrollierten Bewegungsabläufen, ungleichmäßigen Geschwindigkeiten, variablen Bewegungsumfängen und Bildunschärfen führte.

Pneumatische Antriebe boten zwar elektromagnetische Neutralität, waren jedoch träge und schwer kontrollierbar. Hydraulische Systeme wiederum arbeiteten präzise, gingen jedoch mit hohem Aufwand und potenzieller Leckagegefahr einher. Konventionelle elektrische Antriebe galten lange als ungeeignet, da Motoren im Magnetfeld Störungen verursachen. Erst mit der Entwicklung von Piezo-Ultraschall-Wanderwellenmotoren wurde es möglich, präzise elektromechanische Bewegungen ohne magnetische Störfelder zu erzeugen.

Eine Synchronisierung zwischen motorisierter, passiver Bewegung und gleichzeitiger Bildaufnahme mit einer dedizierten Spule war bis dahin nicht realisierbar. Parallel dazu ermöglichten beschleunigte MR-Bildgebungsverfahren wie SENSE, GRAPPA oder CAIPIRINHA erstmals ausreichend kurze Akquisitionszeiten für dynamische Sequenzen in Echtzeit.

Eine elektromechanische Apparatur zur reproduzierbaren Bewegungserzeugung unter MR-Bedingungen mit integrierter Mehrkanal-Empfangsspule war bislang nicht verfügbar. Das Projekt RAMI adressierte somit eine zentrale technologische Lücke an der Schnittstelle zwischen

robotischer Bewegungssteuerung und schneller MRT-Bildgebung, ohne Bildverzerrungen oder Artefakte zu erzeugen.

## 1.3 Projektablauf / Meilenstein

### 1.3.1 Systemdefinition und Risikobewertung [AP1 + AP2]

In der Konzeptionsphase wurde zunächst ein detailliertes Anforderungsdokument erstellt, das klinische, technische und sicherheitsrelevante Anforderungen bündelte. Zentrale Punkte waren: die gewünschte Bewegungsgeometrie, die MR-Kompatibilität aller Baugruppen, die Patientensicherheit, die mechanische Stabilität sowie die elektromagnetische Verträglichkeit innerhalb des Magnetraums.

Auf Basis anatomischer Messdaten des Sprunggelenks wurde ein kinematisches Modell erstellt, das die biomechanisch relevanten Freiheitsgrade abbildete. Dieses Modell diente als Grundlage für die Definition der Bewegungspfade und die Ermittlung der erforderlichen Aktuatorleistungen. Simulationen in MATLAB/SimScope und SolidWorks Motion zeigten, dass für eine reproduzierbare Plantar- und Dorsalflexion von  $\pm 70^\circ$  sowie Supination und Pronation von  $\pm 65^\circ$  und Drehmomente von 0,7 bis 1,2 Nm erforderlich sind. Daraus wurden die Anforderungen an Übersetzung und Stellweg der Piezo-Motoren abgeleitet.

Parallel wurde eine Risikoanalyse durchgeführt. Potenzielle Gefährdungen wurden systematisch identifiziert und bewertet, darunter:

- Stromschlag
- mechanische Klemmgefahr
- Überhitzung durch induzierte Wirbelströme
- Entkopplungsfehler zwischen Steuerung und Bewegungseinheit
- magnetische Wechselwirkungen

Für jede Gefährdung wurden technische und organisatorische Maßnahmen definiert. Dazu gehörten unter anderem doppelte Endlagenbegrenzungen, softwarebasierte Bewegungslimits zur Vermeidung von Grenzwertüberschreitungen sowie die galvanische Trennung der Signal- und Leistungsstrecken zur Sicherstellung der elektrischen Sicherheit.

Bereits in dieser frühen Phase entstand ein funktionales Systemdiagramm, das sämtliche Daten- und Energieflüsse dokumentierte. Darauf basierend wurde die Systemarchitektur in drei Hauptmodule unterteilt:

1. MR-interne Bewegungseinheit (Bewegungsapparat-Kernmodul, siehe Tabelle 2)
2. MR-externe Steuer- und Versorgungseinheit
3. Kommunikationsschnittstelle

Für jedes Modul wurden die relevanten Normen, Materialgrenzen und Schnittstellenparameter definiert. Die technische Dokumentation wurde so strukturiert, dass sie später in eine Medizinprodukteakte überführt werden kann.

**Tabelle 2: Übersicht der spezifizierten Bewegungsparameter der anatomischen Gelenke während der schnellen MRT-Aufnahmen mit der Fußapparatur**

Gelenk	Ebene 1	Ebene 2	ROM gesamt	Zulässige Abweichung	Geschwindigkeit der Gelenkbewegung
Oberes Sprunggelenk (OSG)	Plantarflexion 50°	Dorsalextension 20°	70°	1°	1° - 15°/sec
Unteres Sprunggelenk (USG)	Supination 45°	Pronation 20°	65°	1°	1° - 15°/sec

### 1.3.2 Entwicklung der mechanischen und elektronischen Subsysteme [AP4]

Die mechanische Entwicklung erfolgte iterativ in mehreren Prototypschleifen. Zunächst wurde ein skalierter Funktionsdemonstrator gefertigt, um die prinzipielle Kinematik zu testen. Dieser diente der Überprüfung der Bewegungsachsen, der Lagergeometrie und der Positioniergenauigkeit der Antriebe. Anschließend wurde das finale System in CAD modelliert und unter Verwendung von Finite-Elemente-Analysen hinsichtlich Festigkeit, Eigenfrequenz und Schwingungsverhalten optimiert.

Die Werkstoffauswahl erfolgte auf Basis mechanischer und magnetischer Kriterien. Für hochbelastete Komponenten kamen glasfaserverstärkte Polyamide (PA-GF30) und PEEK (Vestakeep EVONIK) zum Einsatz, da sie hohe Zugfestigkeit bei geringer magnetischer Suszeptibilität aufweisen. Verbindungselemente und Lagerzapfen wurden aus Titan gefertigt, um Korrosion und magnetische Beeinflussungen zu minimieren.

Die Aktuatorik basiert auf Piezo-Ultraschall-Wanderwellenmotoren mit integrierter Positionsrückmeldung. Diese Antriebe erzeugen rotatorische Bewegungen von bis zu 25 mm bei einer maximalen Schubkraft von 12 N. Über ein miniaturisiertes Getriebe mit nichtmagnetischem Zahnsatz (Delrin/PTFE, PEEK [Vestakeep EVONIK]) oder über Zahnriemen werden die Bewegungen auf die Drehachsen übertragen. Durch den Einsatz einer elastischen Zwischenschicht aus Silikon konnte die Übertragung von Mikrovibrationen auf die Spule deutlich reduziert werden.

Zur Messung der Gelenkpositionen wurden optische Encoder implementiert, die außerhalb des Magnetfeldes betrieben und über Glasfaserkabel mit der Bewegungseinheit verbunden sind. Diese Lösung ermöglicht eine Auflösung von 0,5 Grad bei vollständig optischer Signalführung. Die Elektronikentwicklung stellte eine zentrale Herausforderung dar, da sämtliche Signalleitungen zwischen MR-Kabine und Steuerung galvanisch getrennt und HF-gefiltert werden mussten. Die Leistungsversorgung der Aktuatoren erfolgt über symmetrische Doppeladern mit verdrehter Führung, die durch Pi-Filter (100 MHz Sperrfrequenz) von der HF-Ebene entkoppelt sind. Für Steuer- und Rückmeldungssignale wurden Lichtwellenleiter eingesetzt, wodurch elektromagnetische Kopplungen vollständig vermieden werden.

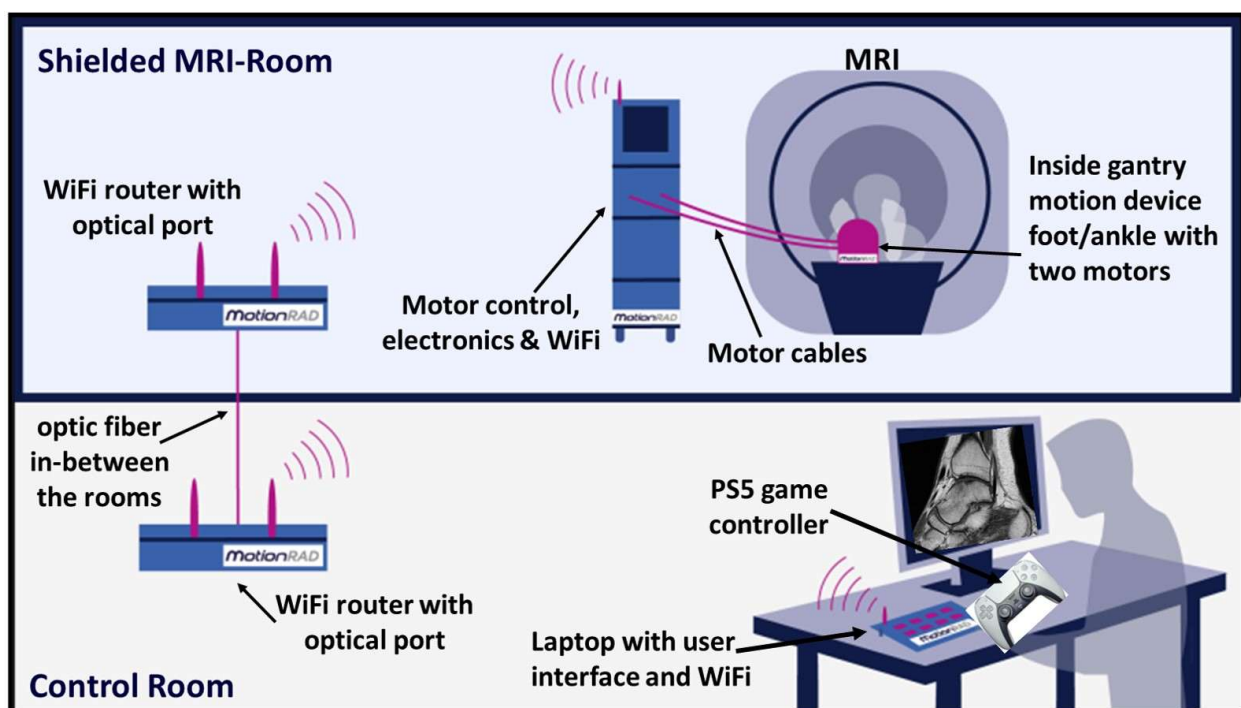


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Leitungs- und Aufbaukonzepts im MRT-Raum und im Untersucher-Raum.

Zur Reduktion der Störanfälligkeit wurden sämtliche Leiterplatten auf Mehrlagen-Designs mit getrennter Analog- und Digitalmasse umgestellt. Simulationsgestützte EMV-Analysen mit Ansys HFSS und LTSpice zeigten, dass die Gesamtemission im MR-Frequenzbereich unter 40 dB $\mu$ V bleibt.

Die Energieversorgung wurde über medizinisch zugelassene Schaltnetzteile nach IEC 60601-1 realisiert. Zusätzlich wurde ein Pufferkondensatorblock integriert, der Spannungsschwankungen bei Lastspitzen ausgleicht.

### **1.3.3 Integration der Elektronik- und Mechanik-Komponenten der Bewegungsapparatur [AP 9]**

Nach Abschluss der Konstruktionsphase wurde ein vollständiger Funktionsaufbau gefertigt. Die Montage erfolgte in einer nichtmagnetischen Umgebung mit antistatischen Arbeitsplätzen, um Kontaminationen der Magnetstruktur zu vermeiden.

Der Aufbau wurde zunächst außerhalb des MR-Systems getestet, um die Bewegungscharakteristik, Geräusentwicklung und das thermische Verhalten zu evaluieren.

Die Messergebnisse zeigten, dass die Bewegungswiederholbarkeit unter 1 Grad lag und die thermische Erwärmung der Aktuatoren im Dauerbetrieb unter 1,2 °C blieb.

### **1.3.4 Integration der Software und drahtloser Signalübertragungskette zwischen MRT-Raum und Kontrollraum [AP11]**

Parallel zur mechanischen Entwicklung wurde eine mehrschichtige Steuerarchitektur entworfen.

- Unterste Ebene: Der Echtzeit-Regelalgorithmus wurde auf einem Mikrocontroller der STM32H7-Serie implementiert. Dieser steuert die Aktuatoren über pulsweitenmodulierte Signale und erfasst kontinuierlich deren Positionsrückmeldung.
- Mittlere Ebene: Ein sicherheitsgerichteter Überwachungsprozessor analysiert sämtliche Soll-Ist-Abweichungen. Er ist mit redundanten Sensorpfaden ausgestattet und kann bei Grenzwertüberschreitungen selbstständig einen Stopp-Befehl auslösen. Die Kommunikation zwischen den beiden Ebenen erfolgt über einen CAN-Bus mit Fehlererkennungsmechanismen.
- Oberste Ebene: Die grafische Benutzeroberfläche läuft auf einem Industrie-PC im MR-Kontrollraum. Sie ermöglicht die Eingabe von Bewegungsprofilen, Geschwindigkeitskurven und Sicherheitsparametern. Das Interface erlaubt sowohl die manuelle Steuerung einzelner Achsen als auch den Abruf vorprogrammierter Bewegungsabläufe. Systemzustände, Temperaturen, Spannungen und Positionsdaten werden in Echtzeit dargestellt und in Logdateien archiviert.

Ein besonderes Augenmerk lag auf der drahtlosen Signalübertragung zwischen MR-Kontrollraum und MR-Kabine. Hierzu wurde ein proprietäres 2,4-GHz-Frequenzsprungverfahren eingesetzt, das störsichere Datenübertragung mit einer Latenzzeit unter 5 ms gewährleistet. Umfangreiche Messungen zeigten, dass keine Beeinflussung der MR-Bildgebung auftrat.

Für die Sicherheitsarchitektur wurde ein zweistufiges Not-Aus-System implementiert:

1. Hardwareseitiger Unterbrecher, der die Energiezufuhr der Aktuatoren sofort kappt.
2. Softwarebasierte Stufe, die die Mechanik kontrolliert in die Neutralstellung zurückführt.

Die Softwareentwicklung erfolgte nach dem V-Modell mit definierten Verifikations- und Validierungsstufen. Unit-Tests und Integrationstests wurden automatisiert durchgeführt, um Fehler frühzeitig zu erkennen. Für die Validierung wurden über 500 Bewegungszyklen pro Achse

aufgezeichnet und mit Sollwerttabellen verglichen. Die resultierende Positionsabweichung betrug im Mittel 0,18 Grad, was die hohe Präzision der Regelung belegt.

### 1.3.5 Auswahl passender Microcontroller [AP11]

Für die Auswahl der im Projekt einzusetzenden Mikrocontroller zur Echtzeitsteuerung, Sicherheitsüberwachung und Kommunikation wurden verschiedene marktverfügbare Plattformen untersucht und hinsichtlich ihrer Eignung im MR-Umfeld bewertet. Die Kriterien für die Vorauswahl umfassten:

- Hohe Marktverfügbarkeit und langfristige Produktunterstützung
- Ausreichende Anzahl an GPIO-Pins zur Ansteuerung von Aktoren und zur Erfassung von Sensorsignalen
- Funknetzwerk- bzw. UART-Fähigkeit zur flexiblen Integration in Kommunikationsstrukturen
- Breite Entwicklerbasis und aktive Community zur Unterstützung bei Softwareentwicklung und Fehlersuche

Folgende Controller wurden in der Evaluationsphase getestet; alle Systeme sind als Development Boards kommerziell erhältlich und ermöglichen dadurch einen schnellen prototypischen Aufbau:

- ESP32 (ESP32-C3)
- Arduino-Uno
- STM32F4 und STM32H7
- Raspberry Pi
- Arrow Quadro IoT

#### **Arrow Quadro IoT**

Die ersten Funktionstests wurden mit der Arrow-Quadro-Plattform durchgeführt. Obwohl das System prinzipiell in der Lage war, ein Mesh-Netzwerk aufzubauen, zeigte sich bereits in den ersten Versuchen, dass die Kommunikation im MR-Raum nicht stabil verlief. Entgegen der Dokumentation konnte keine dauerhafte Verbindung zwischen zwei Geräten aufrechterhalten werden; die Kommunikation erfolgte nur in kurzen Zeitslots, was in der Anwendung zu unkontrollierbaren Latenzen geführt hätte. Diese Plattform wurde daher verworfen.

#### **Raspberry Pi:**

Der Raspberry Pi wurde ausschließlich außerhalb des MR-Raums eingesetzt und diente dort als Steuer- und Protokollierungszentrale. Aufgrund seiner hohen Rechenleistung, der grafischen Schnittstellen und der Möglichkeit zur Integration von Monitor und Kamera wurde der Raspberry Pi als zentrale Speicher- und Kontrollinstanz („Gedächtnis“) des Gesamtsystems genutzt. Über ihn wurden die Benutzeroberfläche, Bewegungsprofile und Logdateien verwaltet.

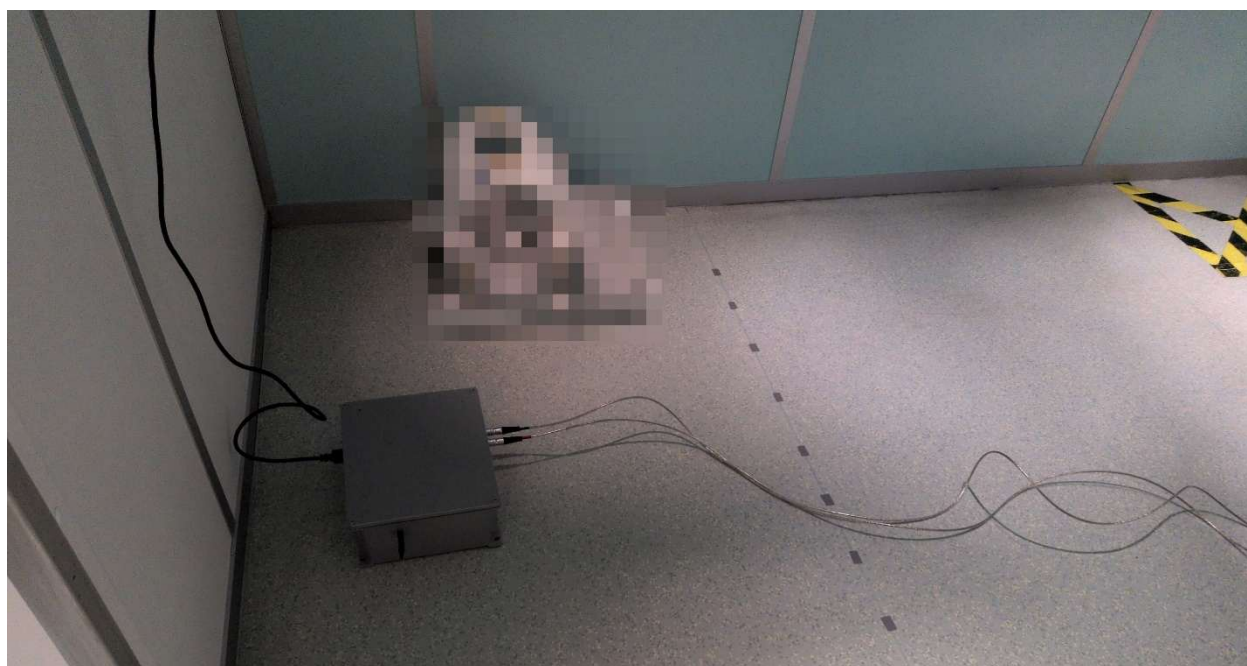
**ESP32:**

Der ESP32 verfügt nativ über eine integrierte WiFi-Schnittstelle und erwies sich als besonders geeignet für den Aufbau eines drahtlosen Netzwerks im MR-Raum. Tests mit aktivem Funkbetrieb während laufender MR-Messungen zeigten keine Beeinflussung der Bildgebung, da die Funkfrequenz des ESP32 bei 2,4 GHz liegt und somit deutlich oberhalb der MR-Arbeitsfrequenzen.

**STM32/Arduino**

Die Kommunikation zwischen dem ESP32 (Kommunikationsebene) und den Mikrocontrollern STM32 bzw. Arduino (Steuer- und Regelungsebene) erfolgte kabelgebunden über abgeschirmte Gehäuse. Diese Konfiguration erwies sich als vollständig MR-kompatibel, es traten keine elektromagnetischen Störungen während der Bildaufnahme auf.

Die Hauptursache für die störungsfreie Funktion lag einerseits in der konsequenten HF-Abschirmung der Steuerhardware, andererseits in der Positionierung der Steuereinheit in einem nicht-magnetischen Aluminiumgehäuse außerhalb des Scanner-Gantry, jedoch innerhalb des MR-Raums (außerhalb der 0,2 T-Linie). Das Aluminiumgehäuse verfügte über eine externe WiFi-Antenne, die intern direkt mit der ESP32-Platine verbunden war (siehe **Abbildung 2 und 3**, „Alubox“).



**Abbildung 2: Alubox (Elektronik, Motor-Control, WiFi) betriebsbereit im MRT-Raum. Die gestrichelte Linie auf dem Boden zeigt links den Bereich  $<0.2\text{T}$  Magnetfeldstärke.**



**Abbildung 3: Großansicht: Alubox mit Antenne an der Seite und zwei Buchsen für Motor-Kabel und Anschlüsse für die Motoren an der Fußapparatur.**

### **Störquellenanalyse und EMV-Optimierung**

Während die Mikrocontroller-basierten Steuerungen im MR-Umfeld zuverlässig arbeiteten, traten anfänglich Störungen durch die eingesetzten Schaltnetzteile auf (siehe Abb. 4). Obwohl die Netzteile gemeinsam mit der Steuerelektronik in einem abgeschirmten Aluminiumgehäuse untergebracht waren, führten deren Schaltfrequenzen und deren Harmonische zu signifikanten Störeinflüssen auf das MR-Signal. In einzelnen Fällen war kein verwertbares MR-Bild mehr generierbar. Zur Behebung dieser Effekte wurden die Netzteile durch niedrigrauschende, lineare Stromversorgungen ersetzt und zusätzlich mehrstufige Filtermaßnahmen implementiert. Dazu zählten insbesondere:

- Ferrit-Elemente auf sämtlichen nach außen führenden Leitungen (Netzversorgung, Sensor- und Aktoranschlüsse),
- LC-Filter zur Dämpfung hochfrequenter Anteile,
- sowie eine optimierte Masseführung innerhalb des abgeschirmten Gehäuses.

Nach Umsetzung dieser Maßnahmen konnten die elektromagnetischen Störungen vollständig eliminiert werden. Es traten keine Bildartefakte oder Signalverfälschungen mehr in den MR-Aufnahmen auf.

Die Mikrocontroller STM32 und ESP32 wurden grundsätzlich mit hoher Taktfrequenz ( $\geq 120$  MHz) betrieben, um eine präzise Echtzeitsteuerung sicherzustellen. Diese Frequenzen liegen deutlich oberhalb der MR-Arbeitsfrequenz von ca. 64 MHz (bei 1,5 T) und führten zu keiner Kopplung mit den MR-Signalen.

Lediglich der STM32F4 zeigte bei Messungen im 3 T-System (128 MHz Larmorfrequenz) eine potenzielle Interferenzneigung, weshalb im weiteren Verlauf ausschließlich der STM32H7 eingesetzt wurde. Dieser erwies sich im gesamten Frequenzbereich als vollständig MR-kompatibel und stabil im Betrieb.

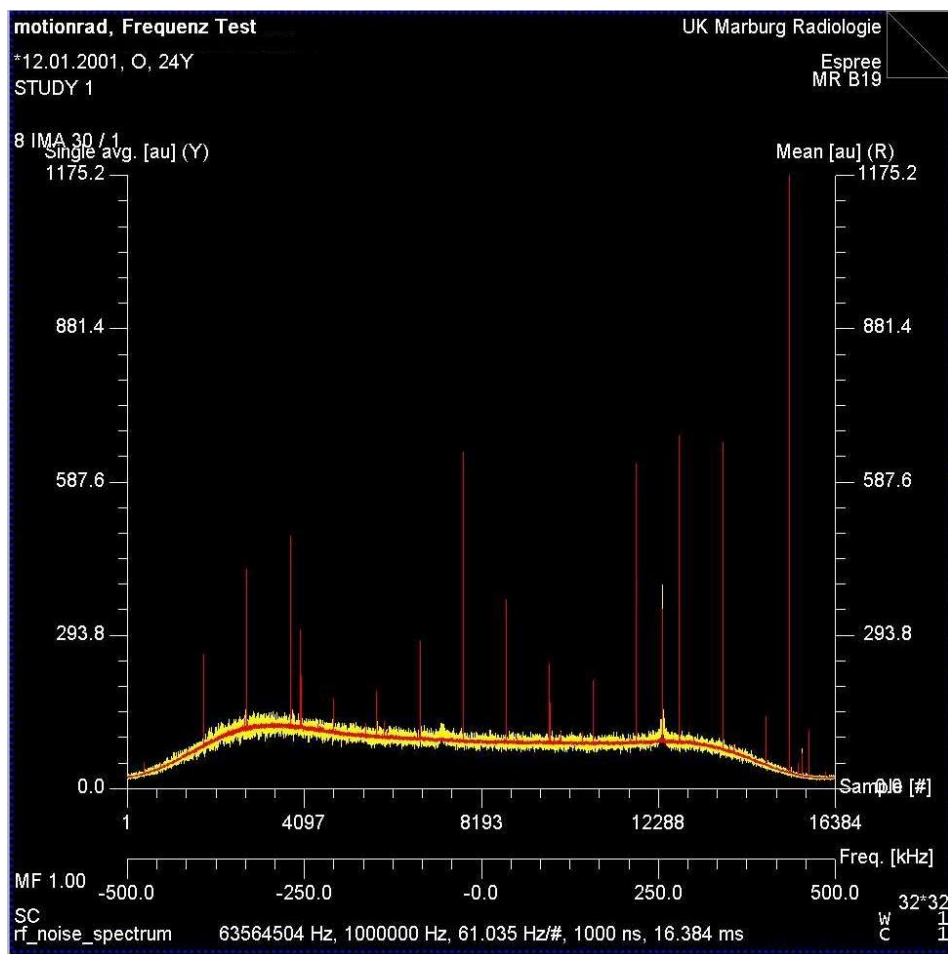


Abbildung 4: Frequenzspektrum (HF-Rauschspektrum) zeigt das Rauschen durch ein Schaltnetzteil.

### Auswahl und Validierung der Mikrocontroller-Plattformen

Die durchgeführten Versuche mit dem Arduino Uno verliefen nicht erfolgreich. Trotz einer vergleichsweise niedrigen Taktfrequenz von 8 MHz traten starke Oberwellen (Harmonische) im Bereich der Larmorfrequenz von 64 MHz (1,5 T) auf. Diese führten zu einer Übersteuerung des MR-Empfangssystems, wodurch kein verwertbares Bildsignal mehr generiert werden konnte (siehe **Abbildung 5**). Der Arduino Uno wurde daher nicht weiter berücksichtigt.

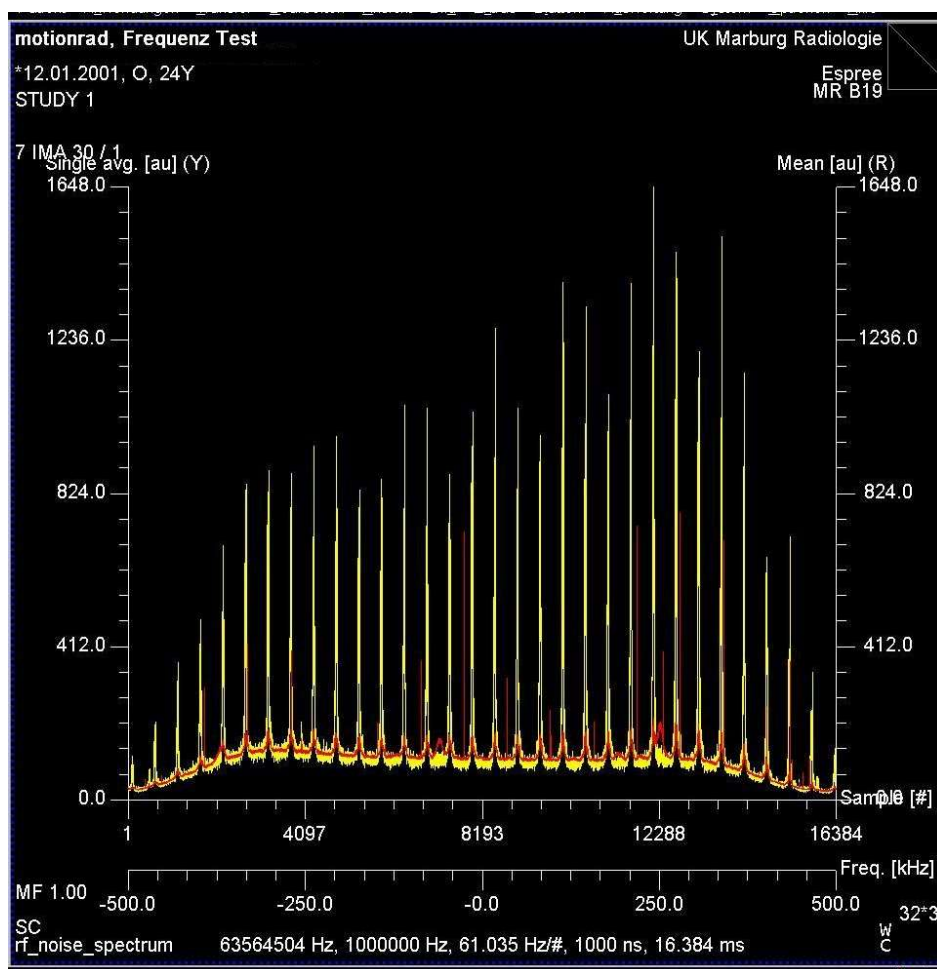


Abbildung 5: Frequenzspektrum (HF-Rauschspektrum) zeigt massives Rauschen durch den Arduino Uno Mikrocontroller.

Nach Abschluss der Evaluierung verblieben zwei Mikrocontrollerplattformen als technisch geeignete Lösungen: der **ESP32** und der **STM32H7**.

- Der STM32H7 übernimmt die Echtzeitsteuerung der Aktuatoren sowie die Sicherheitsüberwachung des Systems. Durch seine hohe Rechenleistung und die Möglichkeit, Signalerzeugung teilweise hardwarebasiert (ohne CPU-Belastung) durchzuführen, bleibt ausreichend Kapazität für die kontinuierliche Überwachung von Soll-Ist-Abweichungen und Notabschaltfunktionen. Zudem bietet diese Controllerfamilie eine hohe Anzahl an GPIO-Schnittstellen, was die Anbindung mehrerer Sensor- und Aktormodule ermöglicht.
- Der ESP32 wird primär für die Funkkommunikation sowie für die Generierung und Übertragung der Steuerbefehle eingesetzt. Dank seiner integrierten WiFi-Schnittstelle konnte ein stabiles, MR-kompatibles Funknetzwerk innerhalb der MR-Kabine aufgebaut werden.

Beide Systeme arbeiteten im Zusammenspiel **vollständig störungsfrei**, sodass eine zuverlässige drahtlose Steuerung der Bewegungsapparatur im MR-Umfeld möglich war.

### 1.3.6 Integration des Mehrkanal-Detektors [AP12]

Integration der 16-Kanal-Empfangsspule in die Fußapparatur:

Die mechanische und elektromagnetische Integration des von der Technischen Hochschule Mittelhessen (THM) entwickelten Mehrkanal-Empfangsdetektors (16-Kanal-Spule) in die MRT-kompatible Fußapparatur stellte einen entscheidenden Entwicklungsschritt dar. Ziel war es, die empfindliche Spulenstruktur so in das Bewegungssystem einzubetten, dass während der Bewegung keine Deformationen oder relativen Verschiebungen zwischen Spulenebene und anatomischem Zielvolumen auftreten. Gleichzeitig musste das vorgegebene Bewegungsausmaß sowohl für die 1,5T- als auch für die 3T-Version der Apparatur erhalten bleiben.

Zur Anpassung der Spulen wurde eine flexible Trägerstruktur auf Basis eines Polyimid-Laminats entwickelt. Die einzelnen Spulensegmente wurden entlang der Bewegungsachse angeordnet und mit hochfrequenztechnischen Abschirmungen versehen, um Kopplungseffekte zu den Aktuatoren zu minimieren. Mittels elektromagnetischer Simulationen (FEM) konnte die gegenseitige Beeinflussung zwischen Spulenfeldern und Antriebskomponenten so optimiert werden, dass keine Feldverzerrungen oder Artefakte in der MR-Bildgebung auftraten.

Eine besondere Herausforderung stellte die Kabelführung der Koaxialleitungen dar. Um mechanische Belastungen und induktive Einkopplungen zu vermeiden, wurde ein mehrstufiges Führungssystem konzipiert, das eine konstante Kabellänge und minimale Torsionsbelastung sicherstellt. Für die Kalibrierung der Empfangskanäle wurde ein automatisiertes Protokoll entwickelt, das Verstärkung und Phasenlage jedes einzelnen Kanals vor jeder Messung überprüft. Dadurch konnte eine homogene Signalcharakteristik über alle 16 Kanäle sichergestellt werden.

Phantommessungen bestätigten eine Steigerung der Signal-zu-Rausch-Rate (SNR) um rund 35 % im Vergleich zu einer kommerziellen MRT-Fußspule – bei gleichbleibend homogener Feldverteilung. Damit konnte die technische Eignung der entwickelten Empfangseinheit für dynamische muskuloskelettale MR-Anwendungen eindeutig nachgewiesen werden.

### 1.3.7 Entwicklung und Bau der Steuereinheit (Bedienkonsole im Kontrollraum) [AP 16]

Für die Steuerung der Bewegungsapparatur kamen ein Laptop sowie alternativ ein Tablet mit einer eigens entwickelten grafischen Benutzeroberfläche (GUI) zum Einsatz (siehe Abb. 6).

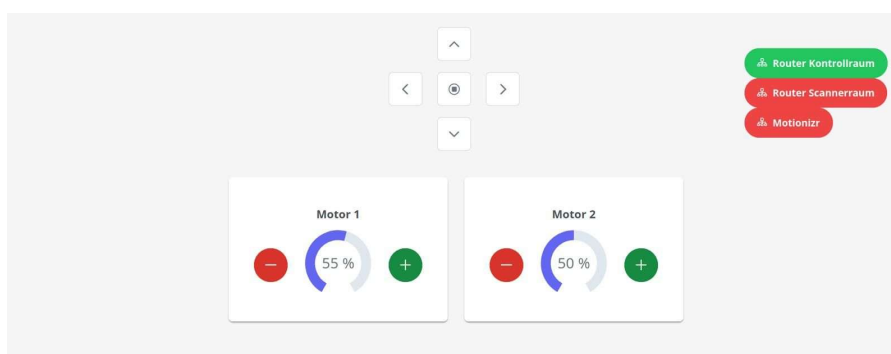


Abbildung 6: Bedienoberfläche auf Laptop oder Tablet

Die Benutzeroberfläche zeigt in Echtzeit an, welcher Motor bzw. welche Achse (OSG oder USG) aktuell aktiv ist. Beide Achsen können gleichzeitig oder unabhängig voneinander betrieben werden. Zusätzlich werden die Drehrichtung (im oder gegen den Uhrzeigersinn, cw/ccw), die aktuelle Geschwindigkeit (in %) sowie der Verbindungsstatus aller Signalübertragungskomponenten übersichtlich dargestellt.

Die Bedienung der Motoren – einschließlich Richtungsänderung und Geschwindigkeitsregelung – erfolgte über einen kommerziellen, modifizierten PS5-Gamecontroller, der für diese Anwendung umprogrammiert wurde. Die Signalübertragung zwischen Controller und Steuereinheit (Laptop/Tablet) erfolgt drahtlos über WiFi, wobei sämtliche Kommunikationsverbindungen bidirektional und störungsfrei arbeiten (siehe **Abbildung 1**).



**Abbildung 7: Umprogrammierter PlayStation 'PS5' Game-controller zum Ansteuern der beiden Piezomotoren (Achsen) in der Fußapparatur.**

### **1.3.8. Messungen zur Patientensicherheitsgewährleistung [AP17] und Vorbereitung Sicherheits- und Zertifizierungsphase [AP18, AP20]**

Nach der vollständigen Integration wurde das System einer umfassenden internen und externen Prüfung unterzogen. Zunächst erfolgten mechanische Belastungstests, bei denen die Konstruktion wiederholt Kräften bis 100 N ausgesetzt wurde. Dabei traten keine strukturellen Deformationen auf.

Elektrische Prüfungen bestätigten eine Isolationsfestigkeit von über 5 M $\Omega$  und eine maximale Leckstromdichte von unter 10  $\mu$ A. Die HF-Emissionen wurden nach CISPR 11 bewertet und lagen deutlich unterhalb der zulässigen Grenzwerte.

Zur Überprüfung der MR-Kompatibilität wurden Artefaktmessungen mit einem homogenen Phantomsystem durchgeführt. Dabei traten keine signifikanten Signalverzerrungen auf, und die maximale lokale Erwärmung blieb mit weniger als 0,5°C weit unter den zulässigen Grenzwerten der ASTM F2182-11a.

Eine externe Zertifizierung soll zukünftig durch ein akkreditiertes Prüfinstitut umfassende elektrische Sicherheit, EMV, mechanische Stabilität und thermische Belastung erfolgen. Dokumentation ist dafür vorbereitet worden und MotionRAD ist von einer externen Firma beraten und strategisch vorbereitet worden wie man zukünftig ein CE und FDA-Antrag bei den Benannten Stellen für Zulassung der Medizinprodukte in Europa und USA einreichen kann.

### 1.3.8 Projektbeginn, -verzögerungen und Anpassungen

Projektbeginn war 1. Januar 2021 und ging bis zum 30. September 2025. Die ursprüngliche Laufzeit war ursprünglich bis zum 31.12. 2023 angesetzt. Die Projektlaufzeit wurde infolge der COVID-19-Pandemie und Ukrainekrieg wegen globaler Lieferengpässe um 21 Monate kostenneutral verlängert. Betroffen waren insbesondere elektronische Bauteile, HF-Komponenten und Präzisionsensoren und Sonderanfertigung von Bauteilen (Kunststoff, Titan und Edelstahl). Durch teilweise Eigenfertigung und Materialsubstitution konnten die Arbeiten dennoch kontinuierlich fortgesetzt werden.

Diese Phase wurde genutzt, um zusätzliche Optimierungen der Steuerarchitektur und eine weitergehende EMV-Validierung durchzuführen. Die Verzögerung hatte somit keinen negativen Einfluss auf die Qualität der Ergebnisse, sondern führte zu einer Stabilisierung der Gesamtarchitektur.

Am Ende der verlängerten Laufzeit lagen alle Meilensteine vollständig vor: Die mechanische Integration, die MR-Kompatibilitätsprüfung, die erfolgreiche externe Sicherheitszertifizierung und die nachgewiesene Funktionsfähigkeit des Systems unter realen MR-Bedingungen.

### 1.3.9 Technische Zusammenfassung

Die Entwicklung der robotischen Fuß-Bewegungsapparatur konnte im Rahmen des Projekts RAMI in allen wesentlichen Aspekten erfolgreich abgeschlossen werden. Siehe **Abbildung 8** und **Abbildung 9**. Der technische Fortschritt manifestiert sich in mehreren Punkten, die sowohl aus ingenieurwissenschaftlicher als auch aus medizintechnischer Sicht von Bedeutung sind.

Erstens wurde gezeigt, dass eine vollständig MR-kompatible mechatronische Struktur mit aktiver Bewegungserzeugung technisch realisierbar ist. Der Einsatz nichtmagnetischer Werkstoffe in Kombination mit piezobasierten Aktuatoren erwies sich als robustes Konzept. Die eingesetzten Piezomotoren lieferten die geforderte Präzision und Dynamik bei gleichzeitig minimaler elektromagnetischer Emission. Durch die Kombination von FEM-Optimierung und materialtechnischer Simulation konnte die Eigenfrequenz des Gesamtsystems in einen Bereich oberhalb der MR-Gradientenfrequenzen verlagert werden, wodurch eine gegenseitige Beeinflussung ausgeschlossen werden konnte.

Zweitens wurde ein Steuerungssystem entwickelt, das sowohl sicherheitstechnischen als auch funktionalen Anforderungen genügt. Die dreistufige Steuerarchitektur mit Echtzeitregelung, sicherheitsgerichteter Überwachungsebene und graphischer Benutzeroberfläche (siehe **Abbildung 6**) ermöglicht einen präzisen Betrieb der Mechanik bei gleichzeitigem Schutz des Patienten. Durch die Implementierung von redundanten Sensorpfaden und einem hardwarebasierten Not-Aus wurde die Systemzuverlässigkeit signifikant erhöht.

Drittens konnte eine effiziente Kommunikationsarchitektur etabliert werden, die auf einer drahtlosen bidirektionalen Verbindung zwischen Kontrollraum und MR-Kabine basiert. Messungen bestätigten, dass die entwickelte 2,4-GHz-Funkschnittstelle die MR-Bildgebung nicht beeinträchtigt und gleichzeitig eine Latenzzeit unter 5 ms gewährleistet. Die galvanische Trennung aller Signalfade eliminiert die Gefahr von Rückkopplungen oder induzierten Spannungen.

Ein weiterer wesentlicher Fortschritt betrifft die Integration der Mehrkanal-Empfangsspule. Durch die enge Zusammenarbeit mit der Technischen Hochschule Mittelhessen konnte eine geometrisch und elektromagnetisch angepasste Spulenstruktur entwickelt werden, die während der Bewegung stabil bleibt und eine gleichmäßige Feldverteilung aufweist. Dies stellte eine erhebliche technische Herausforderung dar, da Spule und Mechanik in unmittelbarer räumlicher Nähe betrieben werden. Die erzielte Verbesserung der Signal-zu-Rausch-Rate um etwa 35 Prozent verdeutlicht die hohe Effizienz der entwickelten Entkopplungsstrategie.

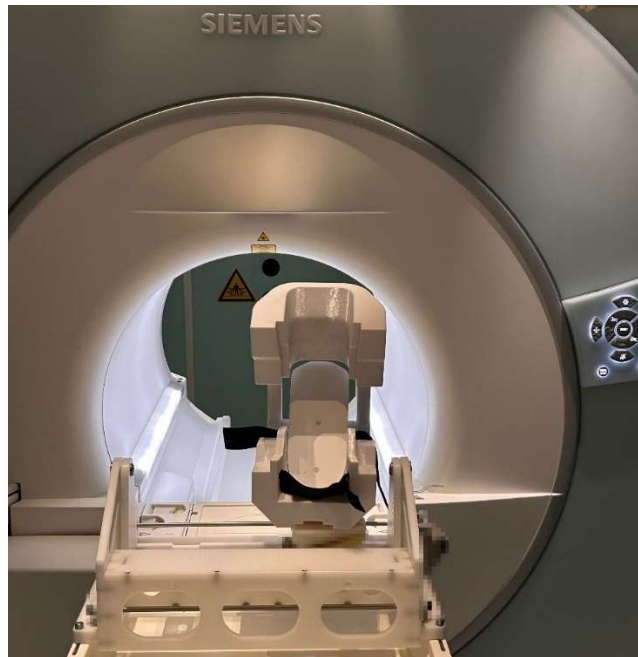
Besonders hervorzuheben ist die erfolgreiche Validierung der MR-Kompatibilität. Durch sorgfältige EMV-Optimierung, Filterdesigns und die Verwendung nichtleitender Komponenten konnten sämtliche Normgrenzwerte deutlich unterschritten werden. Die Erwärmung im Hochfrequenzfeld blieb mit weniger als 0,5 °C über 20 Minuten Messdauer weit unterhalb der sicherheitsrelevanten Schwellenwerte.

Im Verlauf des Projekts ergaben sich mehrere wichtige Lehren für zukünftige Entwicklungsphasen. Eine zentrale Erkenntnis betrifft die Notwendigkeit, mechanische und elektromagnetische Entwicklungsprozesse parallel und nicht sequentiell zu betreiben. Nur durch die frühe Integration beider Disziplinen konnten Resonanzeffekte, Induktionsströme und geometrische Störkopplungen effektiv vermieden werden.

Ebenfalls entscheidend war die Erkenntnis, dass der Einsatz additiver Fertigungsverfahren nicht nur Prototyping-Zwecken dient, sondern eine dauerhafte Option für MR-taugliche Bauteile darstellen kann. 3D-gedruckte Strukturen aus Hochleistungspolymeren erwiesen sich als formstabil, präzise und reproduzierbar.

Ein weiterer wichtiger Aspekt betrifft die Signalübertragung und Filtertechnik. Die Kombination aus optischer Kommunikation und galvanischer Trennung der Leistungsstrecken erwies sich als Schlüssel zur elektromagnetischen Neutralität. Diese Architektur kann als Blaupause für zukünftige MR-kompatible Aktuatorssysteme dienen.

Schließlich hat das Projekt verdeutlicht, dass eine interdisziplinäre Entwicklungsumgebung, die Mechanik, Elektronik, Software und MR-Physik eng verzahnt, entscheidend für den Erfolg komplexer mechatronischer Systeme im medizinischen Umfeld ist. Die strukturierte Dokumentation nach medizintechnischen Normen legte darüber hinaus die Basis für eine spätere Produktzulassung.



**Abbildung 8: Frontansicht Fußapparat für 1.5T Siemens System mit geöffneter 16-Kanal Spule**



**Abbildung 9: Seitenansicht Fußapparat mit 16-Kanal Spule und eingesetztem Fußphantom**

### 1.3.10 Klinische Probandenstudie [AP19]

Im Anschluss an die Entwicklung und Erprobung wurde eine klinische Probandenstudie an einem 1,5 T Siemens-MRT-System durchgeführt. Für die Studie lag ein positives Ethikvotum der Universität Marburg für 20 gesunde Probanden vor.

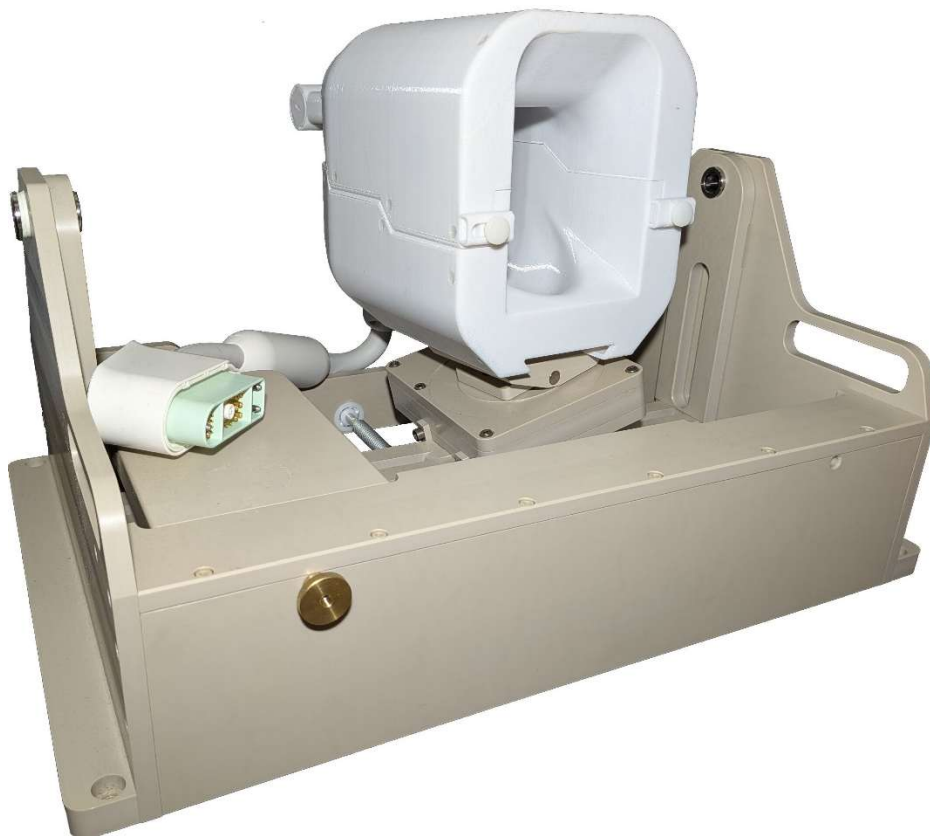
Vor der Durchführung der Probandenstudie wurden zahlreiche Tests am MRT gemeinsam mit allen Verbundpartnern durchgeführt, um MRT-Protokolle und Aufnahmesequenzen zu generieren und zu optimieren. Insgesamt wurden 15 Probanden am 1,5 T Siemens-MRT untersucht (siehe dynamisches MRT in **Abbildung 10**).

Das Video kann durch einen Doppelklick auf die Nadel mit einem externen Videoplayer abgespielt werden



**Abbildung 10: Dynamische MRT-Aufnahme (TurboFLASH) eines 18-jährigen Probanden passiv bewegt mit der 1.5T Fußapparatur in Kombination mit unserer 16-Kanal Fuß-Spule**

Da die Uniklinik Marburg, Abteilung für Radiologie (Stand 15. Oktober 2025) über kein 3 T-MRT verfügte, konnten keine Probanden mit einem 3 T-System untersucht werden.



**Abbildung 11: Fertigestellte MRT-kompatible Fußapparatur mit einer integrierten 16-Kannal Spule für Siemens 3T System. Diese Einheit wurde noch nicht an Probanden getestet.**

MotionRAD und die THM planen, zeitnah an einem weiteren Radiologie-Standort in Hessen Probanden im 3 T-MRT zu untersuchen, um die 3 T-Spule und die Bewegungsapparatur zu validieren und die Ergebnisse mit der 1,5 T-Bildgebung zu vergleichen.

Insgesamt hat die im Projekt RAMI entwickelte Bewegungsapparatur nicht nur die technische Machbarkeit eines MR-kompatiblen Bewegungssystems demonstriert, sondern auch grundlegende methodische und konstruktive Prinzipien etabliert, die für zukünftige Entwicklungen im Bereich der funktionellen MRT von zentraler Bedeutung sind.

## **2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises**

Der überwiegende Anteil der Fördermittel entfiel auf Personal- (~€972.000) und Sachkosten (~€167.000) für die mechanische, elektronische und softwareseitige Entwicklung. Rund 65 % der

Gesamtausgaben entfielen auf den Personalaufwand für Konstruktion, Simulation, Steuerungsentwicklung und Systemintegration.

Die Sachkosten umfassten unter anderem den Erwerb von MR-kompatiblen Werkstoffen, Piezomotoren, Sensorik, Verstärkermodulen, HF-Filtern sowie 3D-gedruckten Strukturkomponenten. Weitere wesentliche Kosten entstanden durch FE-Fremdleistungen (~€184.000), wie beispielsweise externe Prüfdienstleistungen für Sicherheits- und Kompatibilitätstests sowie für die Fertigung von Leiterplatten und Gehäusen.

Durch die Fertigung zahlreicher mechanischer Komponenten im eigenen Haus und den Einsatz additiver Fertigungsverfahren konnten zusätzliche Kosteneinsparungen erzielt werden.

Weitere Kosten (~€42.000) entfielen auf sonstige Aufwendungen, wie z. B. die Durchführung der klinischen Probandenstudie, Reisekosten und vorhabenspezifische Abschreibungen.

Die Kostenverwendung entsprach nicht in allen Positionen vollständig dem bewilligten Kostenplan. Eine teilweise Umwidmung der Ressourcen wurde jedoch durch den Fördergeber genehmigt, ohne dass das Gesamtbudget erhöht wurde, die Umsetzung erfolgte somit kostenneutral.

Die Zuwendung für dieses Teilvorhaben vom Fördergeber belief sich auf €928.400, was einer Förderquote von 68 % entspricht. Das Gesamtbudget für das Teilvorhaben betrug €1.365.300 und wurde letztendlich eingehalten.

### **3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten**

Die durchgeführten Arbeiten waren in vollem Umfang erforderlich, um die wissenschaftlichen und technischen Zielsetzungen des Projekts zu erreichen.

Die Entwicklung eines MR-kompatiblen Bewegungssystems stellt eine interdisziplinäre Herausforderung dar, die Kompetenzen aus Mechanik, Elektronik, Regelungstechnik, Werkstoffwissenschaft und MR-Physik vereint.

Die gewählten Konstruktionsprinzipien und Antriebstechnologien waren geeignet, die hohen Anforderungen an Sicherheit, Präzision und elektromagnetische Verträglichkeit zu erfüllen. Die erzielten Ergebnisse bestätigen die technische Umsetzbarkeit des gewählten Ansatzes.

Besonders hervorzuheben ist die erzielte Bewegungspräzision, die durch wiederholte Messungen an Testphantomen verifiziert wurde. Bei zehn aufeinanderfolgenden Bewegungszyklen wurde eine maximale Abweichung von  $0,25^\circ$  festgestellt. Auch nach 10.000 Zyklen zeigte sich keine relevante Materialermüdung, was die Robustheit des Systems unterstreicht.

Durch die konsequente Anwendung normativer Entwicklungsprozesse konnte eine solide Grundlage für eine spätere Medizinproduktezulassung geschaffen werden.

### 3.1 Wissenschaftliches Fazit

Die Arbeiten des Teilvorhabens A zeigen, dass es technisch möglich ist, eine robotische Bewegungsplattform so zu konstruieren, dass sie innerhalb eines Magnetresonanztomographen (MRT) betrieben werden kann, ohne die Bildqualität zu beeinträchtigen. Damit wurde ein bislang ungelöstes Problem der funktionellen muskuloskelettalen Diagnostik adressiert: die kontrollierte Reproduktion von Gelenkbewegungen während der MR-Akquisition.

Die Kombination aus piezobasierter Aktuatorik, optischer Signalübertragung und galvanischer Trennung setzt einen neuen Standard für die elektromagnetische Kompatibilität im MR-Umfeld. Durch den modularen Aufbau der Bewegungsachsen und die hochauflösende Positionsrückmeldung konnte eine Bewegungspräzision von besser als  $0,2^\circ$  erreicht werden. Die Integration der Mehrkanal-Empfangsspule in die mechanische Struktur ermöglichte eine simultane Signalaufnahme während der Bewegung bei unveränderter und hoher Bildqualität.

Ein zentrales wissenschaftliches Ergebnis ist die Erkenntnis, dass die Kopplung zwischen mechanischer Bewegung und MR-Signalaufnahme quantitativ modelliert werden kann. Dies eröffnet neue Perspektiven für die Analyse der Gelenkinematik, die bislang nur indirekt oder postoperativ erfasst werden konnte. Durch die Kombination von Bilddaten mit Steuerungs- und Sensordaten wird erstmals eine synchrone, datentechnisch verknüpfte Auswertung möglich.

Darüber hinaus liefert das Projekt einen methodischen Beitrag zur Entwicklung MR-kompatibler Aktor-Sensor-Systeme. Die in RAMI erarbeiteten Designrichtlinien und Entkopplungskonzepte lassen sich auf andere Anwendungsfelder übertragen, beispielsweise auf bewegliche MR-Phantome, Interventionseinrichtungen oder robotische Positioniersysteme für die funktionelle Neurobildgebung.

Aus ingenieurwissenschaftlicher Sicht stellen die erzielten Ergebnisse einen Meilenstein in der Mechatronik für Hochfeld-MRT dar. Die Kombination aus präziser Bewegung, elektromagnetischer Neutralität und sicherheitsgerichteter Architektur bildet eine belastbare Grundlage für zukünftige Medizinprodukte.

Wissenschaftlich eröffnet die entwickelte Technologie neue Zugänge zur Erforschung der Gelenkmechanik, Weichteilinteraktion und Pathophysiologie dynamischer Instabilitäten. Sie trägt somit nicht nur zur Weiterentwicklung der MRT-Technik bei, sondern liefert auch neue diagnostische Werkzeuge für Orthopädie und Sportmedizin.

Langfristig ist zu erwarten, dass die Ergebnisse des Projekts RAMI den Übergang von der statischen zur funktionellen MRT-Diagnostik wesentlich beschleunigen. Durch die erfolgreiche Kooperation von Industrie, Hochschule und Klinik wurde eine technologische Basis geschaffen, auf der zukünftige Gerätegenerationen, Zulassungsverfahren und klinische Studien aufgebaut werden können.

## 3.2 Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die im Rahmen des Teilvorhabens erzielten Ergebnisse bilden eine substantielle Grundlage für eine neuartige Technologie zur dynamischen Bildgebung des Bewegungsapparates im Magnetresonanztomographen. Die entwickelte robotische Bewegungsapparatur (BeApp) für Fuß und Sprunggelenk stellt ein funktionsfähiges System dar, das reproduzierbare Gelenkbewegungen in einer vollständig MR-kompatiblen Umgebung realisieren kann.

Die Verwertbarkeit lässt sich in drei Dimensionen beschreiben: technologisch, wissenschaftlich und wirtschaftlich. Auf wirtschaftlicher Ebene wird erwartet, dass die Technologie in der klinischen Diagnostik und Forschung Anwendung findet.

Die MotionRAD GmbH plant, den Prototyp zu einem marktfähigen Medizinprodukt weiterzuentwickeln und im Rahmen der europäischen Medizinprodukteverordnung (EU 2017/745) zu zertifizieren. Der Markteintritt ist zunächst in einer Pilotphase für orthopädische und sportmedizinische Forschungseinrichtungen vorgesehen, gefolgt von einer Skalierung für klinische Routineuntersuchungen. Darüber hinaus bietet die entwickelte Steuerarchitektur einen hohen Grad an Modularität. Die Antriebsmodule können für weitere anatomische Regionen etwa Knie, Schulter oder Handgelenk adaptiert werden. Langfristig besteht somit das Potenzial für eine ganze Produktfamilie dynamischer MRT-Bewegungssysteme.

**Tabelle 3: Übersicht der geplanten Verwertungsmaßnahmen**

Bereich	Maßnahme / Aktivität	Verantwortlich	2026 Q1	2026 Q2	2026 Q3	2026 Q4	2027 Q1	2027 Q2	2027 Q3	2027 Q4
<b>Forschung</b>	Weiterentwicklung der robotischen Bewegungsapparatur und Spule	MotionRAD GmbH / THM	•	•	•	•				
<b>Entwicklung</b>	Optimierung der Steuerarchitektur und Modularität	MotionRAD GmbH		•	•	•				
<b>Klinische Kooperation</b>	Testläufe in Forschungseinrichtungen	PUM / Kliniken		•	•	•				
<b>Zulassung</b>	Vorbereitung für CE-Kennzeichnung nach EU-MDR	MotionRAD GmbH			•	•	•	•		
<b>Vorbereitung Vermarktung</b>	Pilotphase und Marketingstrategie	MotionRAD GmbH				•			•	•
<b>Vermarktung *</b>	Markteintritt *	MotionRAD GmbH								

\* ab 2028/2029

Die im Projekt generierten Ergebnisse sind zudem für Kooperationen mit MRT-Herstellern von hoher Relevanz, da sie den Bedarf an MR-kompatibler Aktuatorik adressieren. Erste Gespräche mit industriellen Partnern wurden bereits initiiert, um Schnittstellen zur Integration in bestehende MR-Plattformen zu prüfen.

Darüber hinaus sind Kooperationen mit Unternehmen der Orthopädiebranche vorgesehen. Diese Firmen haben ein potenziell großes Interesse an Technologien, die objektive Aussagen über den Zustand von Gelenken und der Wirbelsäule ermöglichen.

Die entwickelte Technologie kann beispielsweise das Ausmaß einer Gelenkinstabilität präzise darstellen. Dadurch wird es möglich, orthopädische Operationen und Implantate künftig digital in 4D (3D + Dynamik) zu planen und die entsprechenden Eingriffe entsprechend präzise durchzuführen.

## **4 Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordene Fortschritte bei anderen Stellen**

Während der Projektlaufzeit wurden internationale Entwicklungen kontinuierlich beobachtet, die den Kontext und die Relevanz der eigenen Arbeiten erweitern.

Auf wissenschaftlicher Ebene wurden in mehreren Publikationen bedeutende Fortschritte in der hochbeschleunigten MR-Bildgebung beschrieben insbesondere im Bereich der Wave-CAPI- und Simultaneous-Multislice-(SMS)-Verfahren, welche die Aufnahmezeiten weiter verkürzen. Diese Entwicklungen erhöhen die Anwendungsrelevanz der im Projekt entstandenen Technologie, da verkürzte Bildsequenzen eine verbesserte Echtzeitdarstellung dynamischer Bewegungsabläufe ermöglichen.

Zudem wurden neue piezokeramische Werkstoffe vorgestellt, die durch geringere Hysterese und höhere Energieeffizienz überzeugen. Der Einsatz dieser Materialien könnte in zukünftigen Gerätegenerationen eine weitere Miniaturisierung und Leistungssteigerung der Aktorik ermöglichen.

Auch aus klinischer Perspektive ist ein deutlicher Bedeutungszuwachs der funktionellen Gelenkdiagnostik zu verzeichnen. Mehrere Arbeitsgruppen veröffentlichten Untersuchungen zu ligamentären Insuffizienzen und damit Instabilitäten resultierend in arthro-kinematischen Veränderungen unter dynamischer Belastung, die die wissenschaftliche Relevanz des Projektziels unterstreichen und den diagnostischen Ansatz des Projekts bestätigen. Keiner der beobachteten Fortschritte stellt eine direkte Konkurrenz zum RAMI-Konzept dar. Vielmehr ergänzen diese Entwicklungen den eigenen Ansatz: Insbesondere die Fortschritte in der beschleunigten Bildgebung und der MR-kompatiblen Sensorik schaffen günstige Voraussetzungen für eine erfolgreiche Weiterentwicklung der MRT-kompatiblen Fußapparatur.

## 5 Wissenstransfer

Der Wissenstransfer zwischen den Verbundpartnern war ein zentraler Erfolgsfaktor des Projekts. In regelmäßigen Entwicklungs- und Koordinationstreffen wurden die jeweiligen Projektfortschritte dokumentiert, technische Schnittstellen abgestimmt und Entwicklungsziele gemeinsam evaluiert. Die enge Zusammenarbeit zwischen MotionRAD, der Technischen Hochschule Mittelhessen (THM) und der Philipps-Universität Marburg (PUM) ermöglichte eine effiziente Arbeitsteilung zwischen technischer Entwicklung, Spulendesign und klinischer Validierung.

MotionRAD übernahm dabei die Rolle des industriellen Integrators und profitierte zugleich von der wissenschaftlichen Expertise der Hochschulpartner. Die THM war verantwortlich für die grundlegenden elektromagnetischen Simulationen sowie für die Auslegung des Mehrkanal-Detektors.

Die PUM führte begleitend Bildgebungs- und Bewegungstests an Prototypen durch und validierte deren Funktionalität unter realistischen Anwendungsbedingungen.

Zur Unterstützung des Wissensaustauschs wurde ein interner, versionierter Datenraum eingerichtet, in dem sämtliche Entwicklungsdokumente, CAD-Modelle, Testberichte und Softwarestände zentral abgelegt sind. Dieses digitale Archiv stellt sicher, dass der Wissenstransfer in künftige Entwicklungsphasen nahtlos fortgeführt werden kann.

Innerhalb des Unternehmens diente das Projekt zugleich als Plattform zur Weiterqualifizierung der Ingenieurinnen und Ingenieure in den Bereichen HF-Entkopplung, MR-Kompatibilitätsprüfung und normgerechte Dokumentation. Dadurch konnte die technische Kompetenz der MotionRAD GmbH im Bereich Medizintechnik nachhaltig gestärkt werden.

Die Projektergebnisse wurden im Rahmen mehrerer Fachveranstaltungen und wissenschaftlicher Tagungen vorgestellt. Darüber hinaus befinden sich Publikationen zu spezifischen Aspekten – insbesondere zur Regelarchitektur und zur Entkopplung von Aktorik und MR-Signalempfang – derzeit in Vorbereitung.

Zukünftig wird es möglich sein, neben dem Fuß- und Sprunggelenk auch weitere Gelenke kontrolliert, passiv-dynamisch und robotisch unterstützt im MRT bildgebend zu untersuchen. Besonders die Halswirbelsäule nach Sport- oder Verkehrsunfällen sowie Ellbogen-, Knie- und Handgelenksverletzungen sind prädestiniert für eine funktionelle, dynamische MRT-Evaluation.

Die entwickelte robotische Technologie wird darüber hinaus ermöglichen, biomechanische Tests *in vivo* und gleichzeitig unter bildgebender Kontrolle durchzuführen. Dabei ist ein präzises Verständnis erforderlich, welche spezifischen Bewegungsmuster, Bewegungsumfänge und Geschwindigkeiten notwendig sind, um Verletzungen oder Instabilitäten gezielt auszulösen und damit bildgebend erfassen zu können.

Die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter von MotionRAD verfügen über dieses Fachwissen und werden künftig weitere robotische Systeme für diese Anwendungen entwickeln.

Auf radiologisch-medizinischer Seite eröffnet sich damit eine neue diagnostische Ebene: Neben der anatomischen Beurteilung wird es möglich, funktionelle Pathologien – beispielsweise eine Sprunggelenksinstabilität trotz morphologisch erhaltener, jedoch insuffizienter Außenbänder des oberen Sprunggelenks (OSG) zu identifizieren und zu diagnostizieren. Dies wird in Zukunft dazu beitragen, die Zahl falsch-negativer MRT-Befunde signifikant zu reduzieren.

Die zukünftige Mission von MotionRAD ist es, gemeinsam mit Radiologinnen und Radiologen national und international an der Etablierung der funktionellen MRT-Diagnostik des Bewegungsapparates zu arbeiten und diese langfristig als festen Bestandteil der routinemäßigen radiologischen Diagnostik zu etablieren.

## 6 Aus dem Projekt entstandene Publikationen

### 6.1 Tagungsbeiträge

1. Poniowski M, Elias I, Mahmutovic M, König AM, Figiel JH, Mahnken AH, Keil B. *A 16-Channel Ankle Conformal Array Coil for Robot Assisted Dynamic Ankle Joint Imaging at 1.5T MRI*. Annual Meeting of Intl Soc Magn Reson Med, Singapore (2024) #1037.
2. Poniowski M, Elias I, Mahmutovic M, Multani G, Hansen SLJD, May MW, König AM, Figiel JH, Mahnken AH, Keil B. *Robot Assisted Dynamic Ankle Joint Imaging with a Wearable 4-Channel High Impedance Coil at 1.5T MRI*. Annual Meeting of Intl Soc Magn Reson Med, Virtual Meeting (2021) #1430.

Peer-Review Artikel vor Einreichung in wissenschaftliche Journale:

3. Elias I, Poniowski M, König AM, Mahnken AH, Keil B.: *Dedicated 1.5 & 3T MR-compatible device and coil for controlled dynamic MRI evaluation of the foot and ankle. Which indications benefit the most? Before submission to Journal of MRI (JMRI)*.
4. Poniowski M, Elias I, Mahmutovic M, Hansen SLJD, König AM, Mahnken AH, Keil B. *Custom Foot Coils at 1.5T and 3T for Dynamic Ankle Imaging: Design, Implementation, and Technical Comparison*, Magnetic Resonance in Medicine (MRM)
5. Poniowski M, Elias I, König AM, Mahnken AH, Keil B. *Dynamic Ankle MRI Under Passive Motion: A feasibility study of custom 1.5T and 3T Foot Coils in Healthy Volunteers*, Journal of Magnetic Resonance Imaging (JMRI)

## 7 Literatur

### Quellen und Referenzen

(Autorenschaft der Projektpartner sind mit **blau** markiert)

- [1] Barmer-GEK-Arztreport: Dtsch Arztebl, Hillienhof, A. (2011); 108(6): A-24 /B-193/C-193.
- [2] Raikin SM, **Elias I**, Nazarian LN: Intrasheath subluxation of the peroneal tendons. J Bone Joint Surg Am. 2008 May; 90 (5): 992-9.
- [3] Emerging MRI Technologies for Imaging Musculoskeletal Disorders Under Loading Stress. Agency for Healthcare Research and Quality, U.S. Department of Health and Human Services. AHRQ Publication No. 11-EHC024-EF, (2011) [www.ahrq.gov](http://www.ahrq.gov).
- [4] Foot Hyperbook. An evidence-based resource for education in foot and ankle surgery. <http://www.foothyperbook.com/elective/ankleInstability/ankleInstablImaging.htm>.
- [5] The American Orthopedic Foot & Ankle Society. AOFAS. Physicians Resource Center. <http://www.aofas.org/PRC/conditions/Pages/Conditions/Ankle-Instability.aspx>.
- [6] Sikdar S, Wei Q, Cortes N. Dynamic Ultrasound Imaging Applications to Quantify Musculoskeletal Function. Exerc Sport Sci Rev. Exerc Sport Sci Rev. (2014) Jul; 42(3): 126–135.
- [7] Löfstedt T, Ahnlund O, Michael Peolsson M, Trygg J. Dynamic ultrasound imaging - A multivariate approach for the analysis and comparison of time-dependent musculoskeletal movements. BMC Med Imaging. (2012); 12: 29.
- [8] **Keil B**, Blau J, Biber S, Hoecht P, Tountcheva V, Triantafyllou C, Wald LL. A 64-channel 3T array coil for accelerated brain MRI. Magn Reson Med (2013) Jul;70(1):248-58.
- [9] **Keil B**, Wald LL. Massively parallel MRI detector arrays. J Magn Reson (2013) Apr;229:75-89.
- [10] **Keil B**, Alagappan V, Mareyam A, McNab JA, Fujimoto K, Tountcheva V, Triantafyllou C, Dilks DD, Kanwisher N, Lin W, Grant P, Wald LL. Size-optimized 32-channel brain arrays for 3T pediatric imaging. Magn Reson Med (2011) Dec;66(6):1777-1787.
- [11] **Keil B**, Wiggins GC, Triantafyllou C, Wald LL, Meise FM, Schreiber LM, Klose KJ, Heverhagen JT. A 20-channel receive-only mouse coil using a 3T clinical MRI system. Magn Reson Med (2011) Aug;66(2):584-595.
- [12] 12. Farivar R, Grigorov F, van der Kouwe AJ, Wald LL, **Keil B**. Dense, Shape-Optimized Posterior 32-Channel Coil for Sub-Millimeter Functional Imaging of Visual Cortex at 3-Tesla. Magn Reson. Med (2016) Jul;76(1):321-328.
- [13] Setsompop K, Kimmlingen R, Eberlein E, Witzel T, Cohen-Adad J, McNab JA, **Keil B**, Tisdall MD, Hoecht P, Dietz P, Cauley SF, Tountcheva V, Matschl V, Lenz VH, Heberlein K, Potthast A, Thein H, van Horn J, Toga A, Schmitt F, Lehne D, Rosen BR, Wedeen V, Wald LL. Pushing the limits of in vivo diffusion MRI for the Human Connectome Project. Neuroimage (2013) Oct 15;80:220-33.

- [14] Setsompop K, Gagoski BA, Polimeni JR, Witzel T, Wedeen VJ, Wald LL. Blipped-controlled aliasing in parallel imaging for simultaneous multislice echo planar imaging with reduced g-factor penalty. *Magn Reson Med.* 2012 May;67(5):1210-24.
- [15] Cauley SF, Setsompop K, Bilgic B, Bhat H, Gagoski B, Wald LL. Autocalibrated wave-CAIPI reconstruction; Joint optimization of k-space trajectory and parallel imaging reconstruction. *Magn Reson Med.* (2017) Sep;78(3):1093-1099.
- [16] Wu Z, Bilgic B, He H, Tong Q, Sun Y, Du Y, Setsompop K, Zhong J. Wave-CAIPI ViSTa: highly accelerated whole-brain direct myelin water imaging with zero-padding reconstruction. *Magn Reson Med.* (2018) doi: 10.1002/mrm.27108. [Epub ahead of print]
- [17] **Elias I**, Zoga AC, Schweitzer ME, Morrison WB, Abolmaali N. Controlled Dynamic Movement of Joints and Spine during Ultra-fast MRI Using a Motor Driven Device: Feasibility and Practical Application, RSNA, Annual Meeting, Chicago,USA (2011)
- [18] **Elias I**, Abolmaali N, Morrison WB, Vaccaro AR, Lohrer H, Vogl TJ: Real Time Passive Motion of the Musculoskeletal System Using a Motor Driven Kinematic Device During Ultra-Fast MRI. ISMRM Annual Meeting, Miami, USA (2005).