



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:

**Validierung neuer dynamischer MR-Akquisitionstechniken des Sprunggelenks**

**Teil I: Kurzbericht**

**Teilprojektleiter:**

Prof. Dr. Andreas H. Mahnken, MBA, MME  
Philipps-Universität Marburg  
Klinik für Diagnostische und Interventionelle Radiologie  
Baldingerstraße 1  
35043 Marburg  
Tel: 06421-5866231  
Email: radiologie@uni-marburg.de

Förderkennzeichen: 13GW0398B  
Laufzeit: 01.01.2021 – 30.09.2025  
Projekträger: VDI Technologiezentrum GmbH – PT Medizintechnik

31. März 2026

## 1 Zielsetzung des Teilvorhabens

Das Teilvorhaben der Philipps-Universität Marburg (PUM) im Verbundprojekt RAMI verfolgte das Ziel, den notwendigen klinischen Wissenstransfer zu generieren, damit durch die neuartige Untersuchungsmethode in Form einer MRT-kompatiblen Bewegungsapparatur (BeApp) erstmals dynamische Aufnahmen des Fuß- und Sprunggelenks mittels Magnetresonanztomographie (MRT) erfolgen können. Die PUM übernahm im Verbund drei zentrale Aufgaben: (1) die Sequenzoptimierung und MR-Bildgebung anhand von Prototypendetektorelementen (AP13), (2) die MR-Bildgebungsmessung an der robotischen Bewegungsapparatur (BeApp) mittels Prüfkörper (AP15) sowie (3) die Konzipierung und Durchführung einer klinischen Machbarkeitsstudie mit Probanden (AP19). Darüber hinaus beteiligte sich die PUM an der Evaluation der Vorverstärker (AP7), der Konstruktion des Multikanal-Arrays (AP10), den Sicherheitsmessungen (AP17) und der regulatorischen Dokumentation (AP20). Partner im Verbund waren die MotionRAD GmbH (Entwicklung der Bewegungsapparatur, Verbundkoordination) und die Technische Hochschule Mittelhessen (THM) (Entwicklung der 16-Kanal-MRT-Empfangsspulen-Arrays). Das übergeordnete Ziel des Verbundprojekts war die erstmalige Realisierung dynamischer MRT-Aufnahmen des Fußes und Sprunggelenks während kontrollierter, motorisierter Gelenkbewegung.

## 2 Stand von Wissenschaft und Technik bei Projektbeginn

Die muskuloskeletale MRT war bei Projektbeginn eine etablierte Methode für die strukturelle Diagnostik, jedoch ausschließlich auf statische Aufnahmen beschränkt. Funktionelle Defizite des Bewegungsapparates, etwa Gelenkinstabilitäten, Impingement-Syndrome oder insuffiziente Bandstrukturen, konnten mit der herkömmlichen statischen Bildgebung nicht dargestellt werden. Diese Einschränkung führte in der klinischen Praxis dazu, dass Patienten trotz persistierender Beschwerden falschnegative Befunde erhielten und notwendige Therapien verzögert wurden. Frühere Ansätze zur dynamischen Gelenkbildgebung nutzten die aktive Eigenbewegung des Patienten, was zu unkontrollierten Bewegungsabläufen, variablen Geschwindigkeiten und Bewegungsartefakten führte. Parallele Bildgebungsverfahren ermöglichten zwar hohe Beschleunigungsfaktoren, erforderten jedoch geeignete Mehrkanal-Empfangsspulen mit ausreichend unterschiedlichen Sensitivitätsprofilen. Die dynamische muskuloskeletale MR-Bilddiagnostik war klinisch-radiologisch nirgends etabliert; es existierten keine Untersuchungstechniken zur bildgebenden Funktionsdiagnostik der Gelenke. Ein integriertes System, das motorisierte Gelenkbewegung, dedizierte Mehrkanal-Empfangsspulen und simultane MR-Datenakquisition kombiniert, existierte nicht.

## 3 Projektablauf

Das Teilvorhaben war auf eine Laufzeit von 36 Monaten (01.01.2021 bis 31.12.2023) angelegt. Aufgrund pandemiebedingter Lieferengpässe bei den Verbundpartnern (COVID-19-Pandemie, Russland-Ukraine-Krieg) wurde die Laufzeit kostenneutral um 21 Monate bis zum 30.09.2025 verlängert. Die Arbeiten gliederten sich in mehrere Phasen: Im ersten Projektabschnitt unterstützte die PUM die Verbundpartner bei der Systemdefinition und stellte die MRT-Infrastruktur für erste Kompatibilitätstests bereit. Ab dem zweiten Projektjahr erfolgten die Sequenzoptimierung und erste MR-Bildgebung anhand einzelner Prototypendetektorelemente (AP13). Im Übergang zum dritten Projektjahr wurden umfangreiche Phantombildgebungsmessungen an der BeApp durchgeführt (AP15), bei denen Bildparameter, Signal-zu-Rausch-Verhältnis und mögliche Artefakte durch die BeApp systematisch untersucht wurden. Parallel beteiligte sich die PUM an den Sicherheitsmessungen (AP17) und der regulatorischen Dokumentation (AP20). Im letzten

Projektabschnitt wurde die klinische Machbarkeitsstudie (AP19) durchgeführt, für die ein positives Ethikvotum der Philipps-Universität Marburg für 20 gesunde Probanden vorlag. Alle Meilensteine wurden innerhalb des verlängerten Zeitrahmens erreicht.

## 4 Projektergebnisse

Die Sequenzoptimierung (AP13) ermöglichte die Anpassung der Bildgebungsprotokolle an die spezifischen Anforderungen der dynamischen Gelenkbildgebung mit der BeApp. Spulen-spezifische Parameter (Empfangsprofile, Rauscheigenschaften) wurden für die Sequenzanpassung bereitgestellt; die Ergebnisse der Bildgebungsmessungen flossen direkt in die iterative Elektronikoptimierung (AP14) des Partners THM ein.

Die Phantombildgebungsmessungen (AP15) bestätigten die Funktionsfähigkeit des integrierten Systems aus BeApp und 16-Kanal-Empfangsspulen-Array. Es traten keine signifikanten Bildartefakte durch die Bewegungsapparatur auf. Die Integration der Mehrkanal-Empfangsspule führte zu einer mittleren Signal-zu-Rausch-Steigerung von etwa 35 % gegenüber einer kommerziellen Fußspule bei gleichbleibend homogener Feldverteilung.

Im Rahmen der klinischen Machbarkeitsstudie (AP19) wurden 15 von 20 geplanten Probanden am 1,5T-Siemens-MRT des Universitätsklinikums Marburg untersucht. Eine Messung am 3T-System konnte nicht durchgeführt werden, da zum Zeitpunkt der Studie kein geeignetes 3T-MRT am Standort Marburg verfügbar war. Dies wurde erst nach dem Projektende im Dezember 2025 installiert. Die Probandenstudie demonstrierte die Machbarkeit dynamischer MRT-Aufnahmen des Sprunggelenks unter kontrollierter Bewegung und bestätigte die diagnostische Bildqualität des Gesamtsystems.

Die PUM beteiligte sich an den Sicherheitsmessungen (AP17), die die Einhaltung aller einschlägigen Normen bestätigten: Die HF-induzierte Erwärmung betrug weniger als 0,5 °C über 20 min und lag damit deutlich unter dem Grenzwert von 2 °C.

Alle technischen Projektziele des Teilvorhabens wurden erreicht.