

Schlussbericht

ZE: Fraunhofer-Institut für Digitale Medizin MEVIS		Förderkennzeichen 13GW0372D
Vorhabensbezeichnung Teilvorhaben „Integration multimodaler Daten und Bewegungsanalyse zur Unterstützung minimalinvasiver vaskulärer Interventionen“ Im Verbundprojekt „3D Multimodales Navigationssystem für transvaskuläre Interventionen (TRANSSNAV)“		
Laufzeit des Vorhabens: 01.10.2019 – 31.3.2023		Berichtszeitraum: 01.10.2019 – 31.3.2023

Autoren

Johanna Brosig, MSc

Stephanie Häger, MSc

Prof. Dr. Anja Hennemuth

Dr. Stefan Heldmann

Ausführende Stelle

Fraunhofer-Institut für Digitale Medizin MEVIS

Maria-Goeppert-Straße 3

23562 Lübeck

Inhalt

Teil I: Kurzdarstellung

Teil II: Eingehende Darstellung

1	Zielsetzung und Einleitung	1
2	Durchgeführte Arbeiten	2
2.1	Segmentierung (AP1.2)	2
2.1.1	Aortenwurzel	2
2.1.2	4D-Ventrikel	2
2.1.3	Tracking Aortenklappe / Tracking Koronararterien	4
2.2	Multimodale Visualisierung (AP2.3)	4
2.2.1	Bewegungsanalyse	4
2.2.2	Visualisierung	5
2.3	Computergestützte Planung (AP2.4)	5
2.3.1	Formate und Schnittstellen	5
2.3.2	Demonstrator	5
2.4	Registrierung (AP4.1)	6
2.4.1	CT-MR-Registrierung	6
2.4.2	Bewegungsanalyse 4D CT/Cine MRT	7
2.4.3	Prä-Post-Analyse	10
3	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	11
4	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	11
5	Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse	12
6	Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt	12
7	Erfolgte Veröffentlichungen	13

Teil I: Kurzdarstellung

Zentrales Forschungsziel des Verbundes war die Entwicklung eines multimodalen Navigationssystems zur Planung und Durchführung transvaskulärer Interventionen. Das entwickelte System unterstützt die drei wesentlichen Phasen der Intervention - Planung, Navigation, Kontrolle - durch die Nutzung patientenspezifischer Gefäß- und Organmodelle. Die verbesserte Planung und Navigation soll es ermöglichen, komplexe Prozeduren effizient und risikoarm durchführen zu können.

Im Rahmen dieses Teilvorhabens wurden Daten, die der Planung, Durchführung und Kontrolle von Pulmonalvenenisolation (PVI) und Herzklappeninterventionen (TAVI) dienen, integriert und bezüglich der anatomischen Positionsunsicherheit charakterisiert werden.

Dazu wurde die Aortenwurzel segmentiert und basierend auf relevanten Landmarken quantitative Maße evaluiert. Die Ergebnisse wurden im International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery veröffentlicht (Krüger et al, CARS 2021).

Weiterhin wurden zunächst mittels einer selbst-entwickelten Annotationssoftware Referenzstrukturen (linkes Atrium, linker Ventrikel, aufsteigende Aorta, Aortenwurzel und Aortenklappe) annotiert. Diese wurden verwendet, um Modelle mittels maschinellen Lernens und Deep Learning zu optimieren. Das resultierende Modell ermöglicht Segmentierungen der annotierten Strukturen in 4D. Zusätzlich wurden die Koronararterien und Aortenklappen anhand von Markerpositionen über die Zeit getrackt. Hierfür wurden die Markerpositionen mithilfe von Deformationsfeldern in 4D propagiert. Die Positionsunsicherheit der Marker wurde analysiert und in einem Demonstrator dargestellt. Dieser wurde im Rahmen des Live Demonstrations Workshops auf der SPIE Medical Imaging 2023 vorgestellt.

Darüber hinaus wurde eine multi-modale Registrierungsmethode entwickelt. Dabei werden CT und MR-Bilder mithilfe von Aortensegmentierungen zueinander registriert. Außerdem wurden CT- Aufnahmen des ganzen Oberkörpers zu Herz-CTs registriert und prä-operative MR-Bilder zu post-operativen MR Bildern registriert.

Teil II: Eingehende Darstellung

1 Zielsetzung und Einleitung

Transvaskuläre Interventionen (durch Blutgefäße geführte Eingriffe) zur Therapie von Herzrhythmusstörungen und Herzklappenerkrankungen sind dem deutschen Herzbericht 2016 zufolge mit ca. 91.782 Eingriffen in 2015 von zunehmender klinischer und gesundheitsökonomischer Bedeutung. Mit Hilfe transvaskulärer Interventionsunterstützung können zunehmend komplexere Prozeduren durchgeführt werden. Dazu gehört die transvaskuläre Implantation von Aortenklappen und die Behandlung von Arrhythmien durch Ablation. Mit wenigen Ausnahmen erfolgt die Platzierung von Behandlungswerkzeugen auch bei komplexen Interventionen heute mittels bildbasierter Navigation auf Basis von Röntgenfluoroskopie, häufig unter Verwendung hoher Strahlendosen und nierenschädigender Kontrastmittel. Nicht-invasive Bildgebung mittels MRT und Ultraschall ist bisher kaum in die Workflows integriert.

Zentrales Forschungsziel des Verbundes war die Entwicklung eines multimodalen Navigationssystems zur Planung und Durchführung transvaskulärer Interventionen. Das entwickelte System unterstützt die drei wesentlichen Phasen der Intervention - Planung, Navigation, Kontrolle - durch die Nutzung patientenspezifischer Gefäß- und Organmodelle. Die verbesserte Planung und Navigation soll es ermöglichen, komplexe Prozeduren effizient und risikoarm durchführen zu können.

Im Rahmen dieses Teilvorhabens wurden Daten, die der Planung, Durchführung und Kontrolle von Pulmonalvenenisolation (PVI) und Herzklappeninterventionen (TAVI) dienen, integriert und bezüglich der anatomischen Positionsunsicherheit charakterisiert werden.

Das Teilvorhaben wurde in vier Arbeitspakete gegliedert:

- *AP1.2 Segmentierung:* Entwicklung von bildbasierten Methoden zur Computerunterstützung transvaskulärer Aortenklappen-Implantationen (TAVI).
- *AP2.3 Multimodale Visualisierung:* Visualisierung der Ergebnisse der bildbasierten Verfahren zur Registrierung, Segmentierung und Tracking.
- *AP2.4 Computergestützte Planung:* Anbindung der Ergebnisse aus AP2.1, AP4.1 und AP2.3 an das Gesamtsystem
- *AP4.1 Registrierung:* Entwicklung von Registrierungsverfahren zur Integration der Modalitäten CT, MRT und US für Planung, Navigation und Kontrolle

2 Durchgeführte Arbeiten

2.1 Segmentierung (AP1.2)

2.1.1 Aortenwurzel

In Vorexperimenten wurden maschinelle Lernverfahren zur Detektion relevanter Landmarken und quantitativer Maße der Aortenwurzel untersucht. Hierzu wurden annotierte Daten genutzt, bei denen Centerline, Aorten Konturen, sowie Landmarken an der Klappe zur Verfügung standen. Die Ergebnisse dieser Experimente wurden als Journalpaper für die CARS 2021 veröffentlicht (Krüger et al, CARS 2021).

Zudem wurde im Rahmen des Arbeitspaketes *Segmentierung* eine Deep Learning basierte Methode zur automatischen Segmentierung der Aortenwurzel in cCTs entwickelt und auf den Projektdaten evaluiert.

2.1.2 4D-Ventrikel

Zunächst wurden Vorarbeiten in Form vorhandener heuristische Verfahren untersucht. Erste Experimente haben schnell gezeigt, dass diese nur begrenzt für die im Projekt vorhandenen Daten geeignet sind, so dass neue auf state-of-the-art Deep Learning-Technologie basierende Verfahren entwickelt wurden.

Für das Training maschineller Lernverfahren wurde eine Annotationssoftware (siehe Abbildung 1) für die vorhandenen Daten entwickelt, mit dem Referenzsegmentierungen für 20 Patienten mit je 4 Zeitpunkten (80 cCTs) erzeugt wurden. Segmentiert wurden hierbei 5 Strukturen: linkes Atrium, linker Ventrikel, aufsteigende Aorta, Aortenwurzel und Aortenklappe.

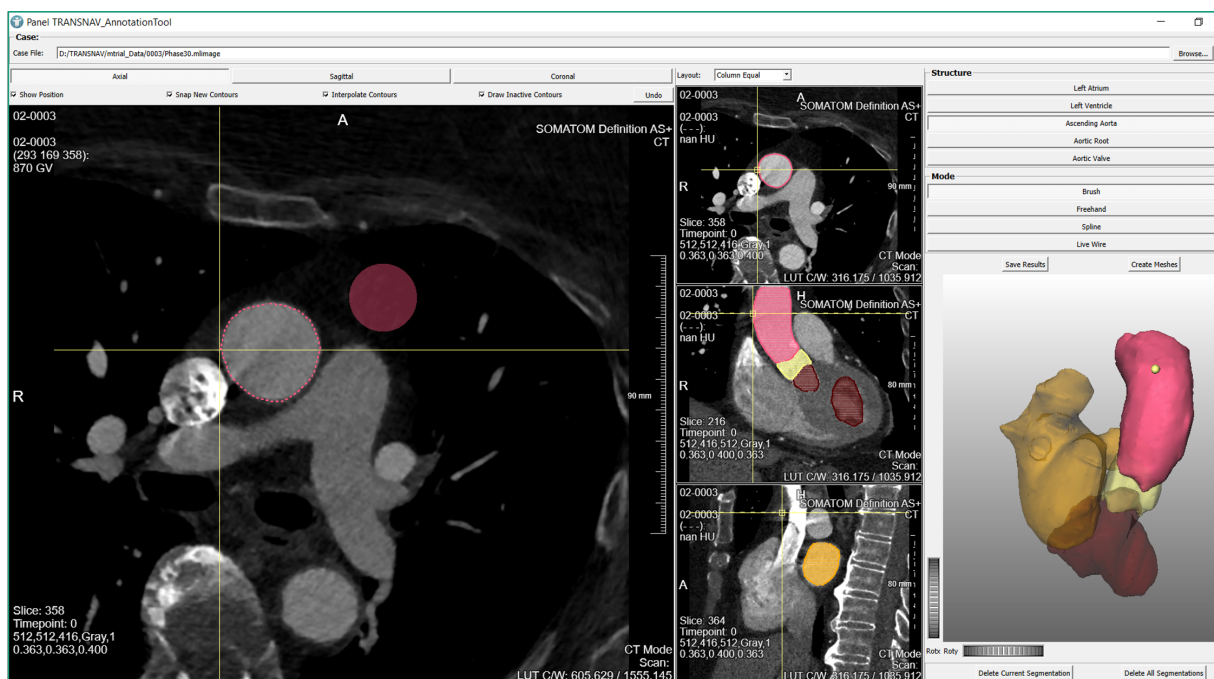


Abbildung 1: Ansicht des entwickelten Annotationstools mit Annotationsbereich (links), synchronisierter axialer, coronaler und sagittaler Übersicht (Mitte) und Struktur- und Toolauswahl sowie 3D Visualisierung (rechts).

Anhand der so erzeugten Referenzsegmentierungen wurde ein nnU-Net (Isensee et. Al, 2018) zur automatischen Segmentierung der 5 Strukturen trainiert. Da es sich beim nnU-Net um ein selbstanpassendes Framework für U-Net-basierte medizinische Bildsegmentierung handelt, musste keine manuelle Parameteroptimierung hinsichtlich Netzwerkarchitektur, Vorverarbeitung, Training und Inferenz vorgenommen werden. Als Trainingsmenge wurden die Referenzsegmentierungen von 15 Patienten (60 cCTs) genutzt, die Evaluation wurde auf den verbleibenden 5 Patienten (20 cCTs) durchgeführt.

Zur Evaluation wurde der Dice-Koeffizient zwischen den Referenzsegmentierungen und den automatischen Segmentierungen berechnet. Der durchschnittliche Dice-Koeffizient über alle 5 Strukturen beträgt 0.952. Für jede der 5 Strukturen separat beträgt der durchschnittliche Dice-Koeffizient: linkes Atrium 0.964, linker Ventrikel 0.926, aufsteigende Aorta 0.971, Aortenwurzel 0.841, Aortenklappe 0.699 (siehe Abbildung 2).

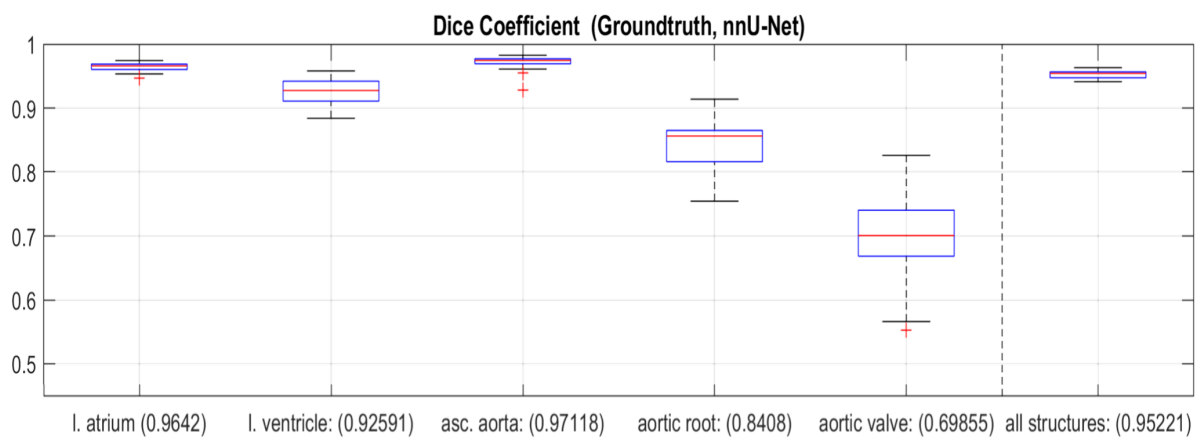


Abbildung 2: Evaluation der Genauigkeit (Dice-Überlap) der entwickelten automatischen Segmentierung für linkes Atrium, linker Ventrikel, aufsteigende Aorta, Aortenwurzel, Aortenklappe.

Die relativ kleinen Dice-Koeffizienten für die Strukturen Aortenwurzel und Aortenklappe, sind dadurch bedingt, dass es sich um sehr kleine Strukturen handelt, bei denen bereits sehr kleine Abweichungen zu einer verhältnismäßig großen Reduzierung des Dice-Koeffizienten führt. In Abbildung 3 ist dies beispielhaft für Segmentierungen der aufsteigenden Aorta und der Aortenklappe dargestellt.

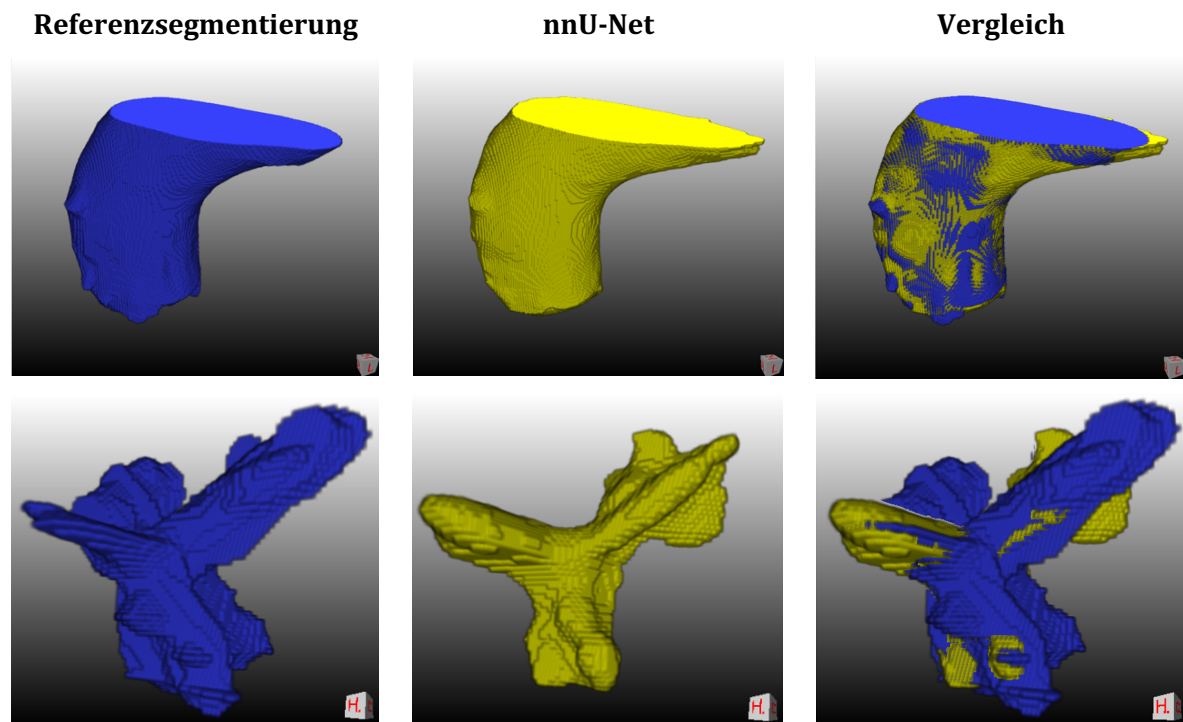


Abbildung 3: Vergleich der Referenzsegmentierung (blau) mit der durch das nnU-Net generierten Segmentierung (gelb) für eine aufsteigende Aorta (oben, Dice 0.964) und eine Aortenklappe (unten, Dice 0.566).

2.1.3 Tracking Aortenklappe / Tracking Koronararterien

Die Aortenklappe und die Koronararterien wurden anhand von Markerpositionen getrackt. Hierzu wurden Marker (non-coronares Segel, rechts-coronares Segel, links-coronares Segel, Ostium der rechten und linken Koronararterie) für einen Zeitpunkt annotiert. Die im Rahmen des Arbeitspaketes *Registrierung* erstellten Deformationsfelder wurden genutzt, um die Klappenmarker in Datensätze anderer Zeitpunkte zu propagieren.

In weiterführenden Arbeiten konnten die Markerpositionen durch neuronale Netze automatisch annotiert werden. Basierend auf dem Ansatz von Astudillo et al. (Astudillo et al., 2020) wurde das Bestimmen der Markerpositionen als Segmentierungsproblem formuliert. Hierzu wurden an den Markerpositionen Kugeln eingefügt. Aus dem Segmentierungsergebnis kann dann die Markerposition aus dem Mittelpunkt der prädizierten Kugeln ermittelt werden.

2.2 Multimodale Visualisierung (AP2.3)

2.2.1 Bewegungsanalyse

Basierend auf den im Arbeitspaket *Segmentierung* getrackten 4D-Markerpositionen wurde die Veränderung verschiedener quantitativer Parameter analysiert. Dazu zählen u.a. die Angulation der Klappenebene, der Winkel zwischen linksventrikulärem Ausflusstrakt (LVOT) und Klappenebene, die Distanz zwischen Klappenebene und Koronararterien. Darüber hinaus konnte durch das Überlagern der im Rahmen des Arbeitspaketes *Segmentierung* erstellten Segmentierungen der Aortenwurzel und des Ventrikels die Bewegung visuell bewertet werden.

2.2.2 Visualisierung

Die im Rahmen des Arbeitspaketes *Segmentierung* ermittelten Markerpositionen wurden in Kombination mit den ebenfalls erstellten Segmentierungen dargestellt. Als Teil dieses Arbeitspakets wurden zusätzlich die Registrierungsergebnisse aus dem Arbeitspaket *Registrierung* visualisiert. Außerdem wurde die Veränderung der im Arbeitspaket *Multimodale Visualisierung* ermittelten quantitativen Parameter visuell dargestellt. Die Ergebnisse dieses Arbeitspakets wurden im Demonstrator im Arbeitspaket *Computergestützte Planung* zusammengefasst (siehe Abbildung 4).

2.3 Computergestützte Planung (AP2.4)

2.3.1 Formate und Schnittstellen

Im Rahmen des Meilensteintreffens am 30.09.2021 wurden Formate und Schnittstellen diskutiert. Es wurde sich auf Standard Bild- und Datenformate zum Austausch geeinigt.

2.3.2 Demonstrator

Die technologischen Ergebnisse aus dem Arbeitspaket *Segmentierung* zu Tracking der Aortenklappen und Koronararterien sowie aus dem Arbeitspaket *Multimodale Visualisierung* zur Bewegungsanalyse und Visualisierung wurden in einem Demonstrator (Abbildung 4) integriert und auf einem internationalen Workshop im Rahmen der Konferenz SPIE Medical Imaging im Februar 2023 vorgestellt.

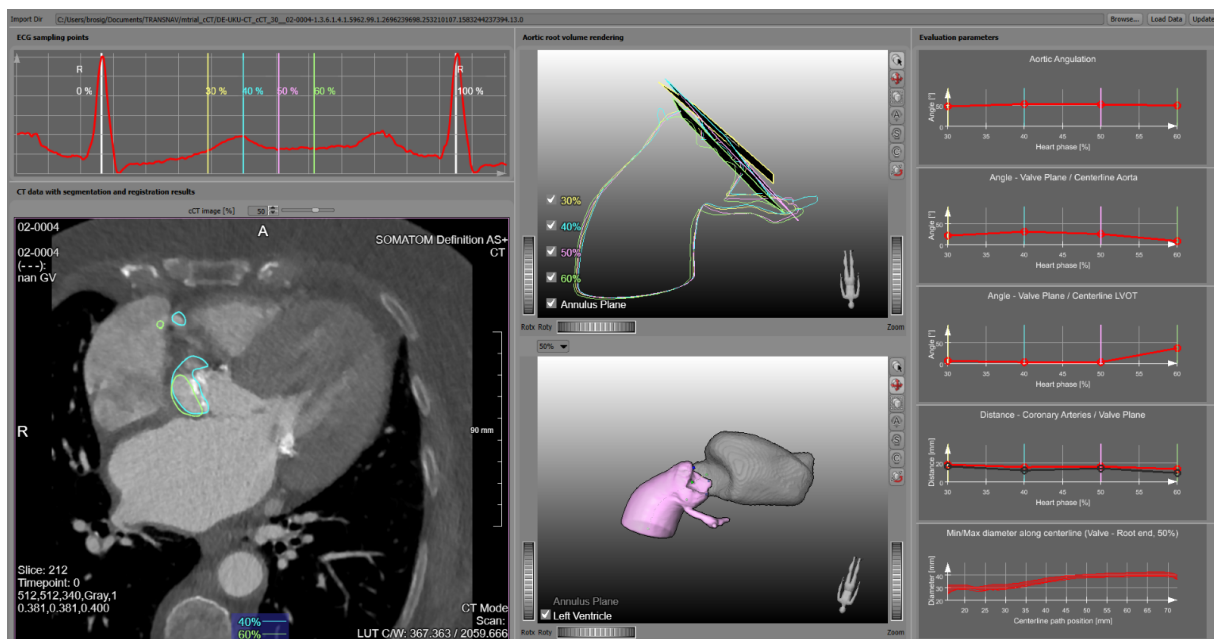


Abbildung 4: Benutzeroberfläche des im Arbeitspaket *Computergestützte Planung* entwickelten Demonstrators - 4D Herz-CT-Daten werden quantitativ und visuell evaluiert. Gezeigt werden abgeleitete Ergebnisse aus CT-Daten, die zu vier unterschiedlichen Zeitpunkten des Herzzyklus aufgenommen wurden. Die Bewegung der Aortenwurzel wird als Überlagerung der segmentierten Konturen innerhalb des CT-Bilds dargestellt (unten links). Außerdem wird die Bewegung als Überlagerung der Segmentierungsergebnisse aller Zeitpunkte angezeigt sowie die Bewegung der Annulusebene (Mitte oben). Im Bild darunter wird das Ergebnis der ermittelten Markerpositionen aus dem Arbeitspaket *Segmentierung* dargestellt. Im rechten Teil wird die Veränderung quantitativer Parameter über alle Zeitpunkte gezeigt (Arbeitspaket *Multimodale Visualisierung*).

2.4 Registrierung (AP4.1)

2.4.1 CT-MR-Registrierung

Zu Beginn des Projektes stand noch kein Datenmaterial (MR) für die Arbeiten zur CT-MR-Registrierung zur Verfügung. Im weiteren Verlauf wurden auf Grund der Covid19 Pandemie keine entsprechenden Eingriffe durchgeführt und darüber hinaus auch kein weiteres Datenmaterial (CT/MR) zu Forschungszwecken erzeugt.

Aus diesem Grund wurde auf Basis bereits vorhandener Fraunhofer intern verfügbarer CT/MR Daten, die für eine ähnliche Fragestellung erhoben wurden, ein Registrierungs-Prototyp entwickelt. Dieser konnte jedoch, wie oben ausgeführt, noch nicht auf Projekt-Daten angepasst und evaluiert werden.

Für die Validierung des Navigationstools, das im Rahmen des Projektes entwickelt wird, wurde von UKU testweise ein Phantom des linken Atriums aus dem segmentierten Ganzkörper-CT eines Probanden erstellt und mit MR gemessen. Um die Genauigkeit des Phantoms zu überprüfen, wurde das CT und die MR Aufnahme des Phantoms registriert. Hierfür wurde der Registrierungs-Prototyp auf die konkreten Daten angepasst und zusätzlich die Distanzmaßberechnung der Registrierung auf den Bereich der Segmentierung des linken Atriums vom Ganzkörper-CT beschränkt. Zudem wurde eine automatische Vorregistrierung anhand der CT-Segmentierung und einer durch Anwendung eines Schwellenwert aus dem MR erzeugten Maske entwickelt. Darüber hinaus verlangte die freie Positionierung des Phantoms im MR eine manuelle Vorausrichtung des MR-Bild im Raum. Anschließend konnte die Registrierung automatisch durchgeführt werden und erzielte gute Ergebnisse, siehe Abbildung 5.

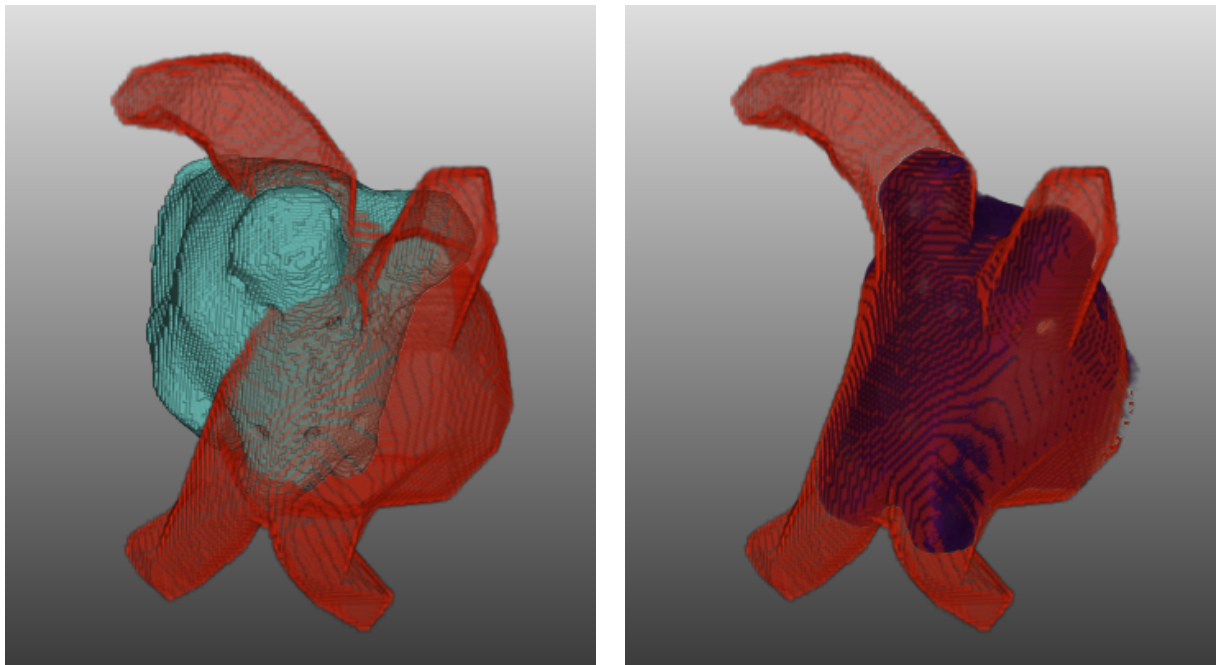


Abbildung 5: Ergebnis der Vorregistrierung (links) und der gesamten Registrierung (rechts) von Ganzkörper-CT und Phantom-MR. In rot ist die Segmentierung des linken Atriums aus dem CT dargestellt, in türkis das Phantom im MR nach der Vorregistrierung und in lila nach der gesamten Registrierung zu sehen.

2.4.2 Bewegungsanalyse 4D CT/Cine MRT

Zu Beginn des Projektes stand noch kein ausreichendes Datenmaterial von den klinischen Partnern für die Arbeiten zur Bewegungsanalyse zur Verfügung. Daher wurde der öffentliche DIR-Lab-Datensatz (www.dir-lab.com) zur Entwicklung herangezogen. Dieser besteht aus 10 4D-Thorax-CT-Bildern mit jeweils 10 Zeitpunkten und annotierten Landmarken der Lunge auf den Extremphasenbildern. Es fand eine erste methodische Entwicklung der 4D-Registrierung statt. Mit den ermittelten Deformationsfeldern konnten anschließend die gegebenen Landmarken des ersten Phasenbildes auf die anderen 9 propagiert werden. Abbildung 6 zeigt die Landmarken sowie die ermittelte Bewegungsanalyse für einen DIR-Lab-Datensatz.

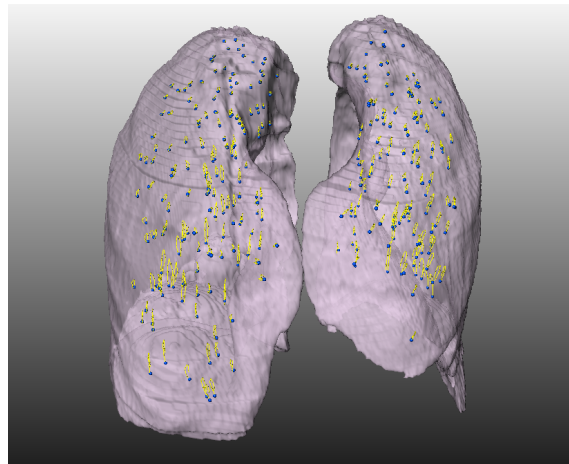


Abbildung 6: Bewegungsanalyse eines 4D CT aus dem DIR-Lab Datensatz

Im weiteren Verlauf wurden von UKU 20 Datensätzen mit je einem Ganzkörper-CT (wbCT) mit Aorta-Segmentierung und einem 4D-CT (mit den vier Phasen cCT30, cCT40, cCT50, cCT60) mit dazugehörigen Aorta-Segmentierungen zur Verfügung gestellt. Die Phasen-CTs wurden bei 30%, 40%, 50% und 60% des Herzzyklus, gemessen von R-Zacke zu R-Zacke, aufgenommen und entsprechend benannt. (Abbildung 7).

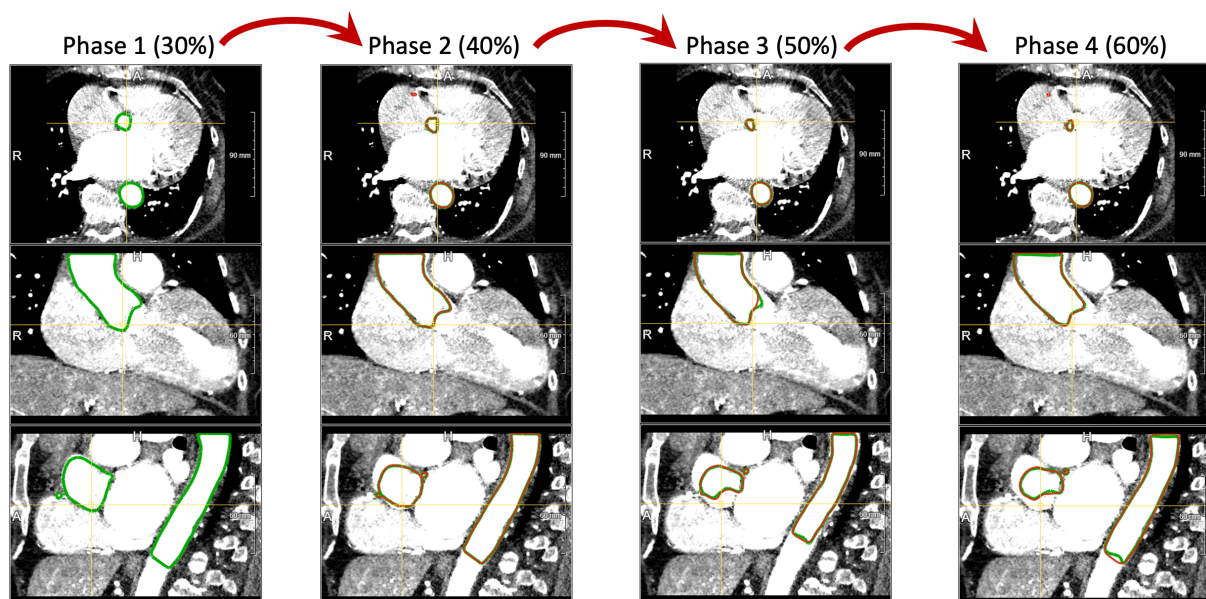


Abbildung 7: 4D-CT Registrierung mit dazugehörigen Aorta Segmentierung (grün = Segmentierung der aktuellen Phase, rot = propagierte Segmentierung aus der vorherigen Phase).

Der anfänglich entwickelte Registrierungs-Prototyp wurde auf die konkreten 4D-CT-Projektdaten für eine paarweise Registrierung von der ersten bis zur vierten Phase angepasst. Zusätzlich wurden die zur Verfügung gestellten Aorta-Segmentierungen in die Registrierungs-Pipeline integriert, um die Registrierung durch die zusätzlichen Informationen zu präzisieren. Zur Evaluation wurden der Dice-Koeffizient und die Hausdorff-Distanz der Aorta-Segmentierungen vor und nach der Registrierung berechnet. Der durchschnittliche Dice-Koeffizient konnte durch die Registrierung von 0.9527 auf 0.9937 gesteigert werden, die durchschnittliche Hausdorff-Distanz [mm] von 11.0455 auf 7.0230 verbessert werden (Abbildung 8).

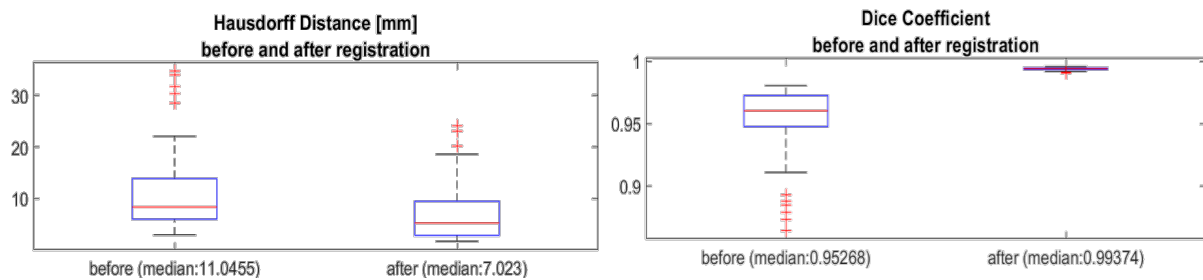


Abbildung 8: Evaluation wbCT-cCT-Registrierung von Ganzkörper-CT (wbCT) und des 30% Phasen-Kontars-CT (cCT) anhand von Dice-Überlapp und Hausdorff-Distanz der Aorta-Segmentierungen vor und nach Registrierung.

Abbildung 9 zeigt die Registrierungsergebnisse für einen Datensatz anhand der Aorta-Segmentierungen aus zwei verschiedenen Perspektiven. Die ermittelten Deformationsfelder wurden 1000shapes zur Verfügung gestellt. Da im weiteren Verlauf verfeinerte Segmentierungen der Aorta durch 1000shapes zur Verfügung gestellt wurden, wurde die Registrierung ebenso mit diesen neuen Daten durchgeführt und auch die so ermittelten Deformationsfelder zur Verfügung gestellt.

Phase 30% (vor Registrierung), Phase 40%, proagierte Phase 30% (=nach Reg.)

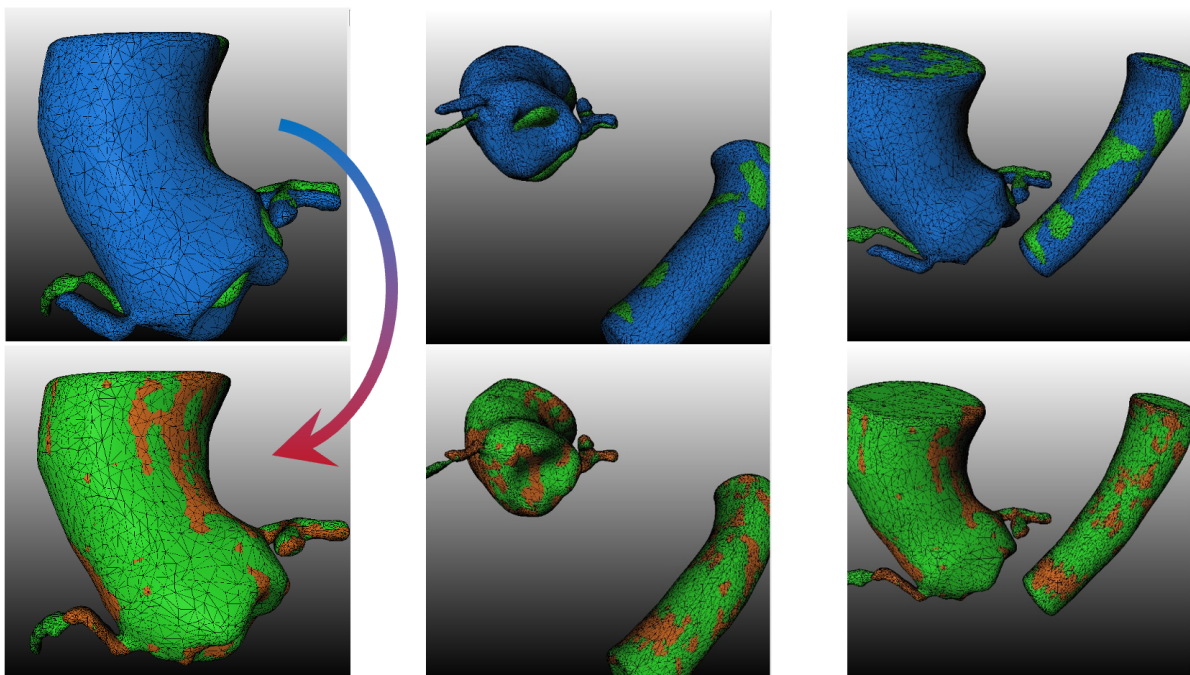


Abbildung 9: Vergleich der Aorta Segmentierung des Referenzbildes (grün) mit der Aorta Segmentierung des Templatebildes vor (blau) und nach (orange) der Registrierung

Zusätzlich wurde eine wbCT-cCT30 Registrierung entwickelt, um die Korrespondenz zwischen dem Ganzkörper-CT und den Phasen-CTs herzustellen (siehe Abbildung 10).

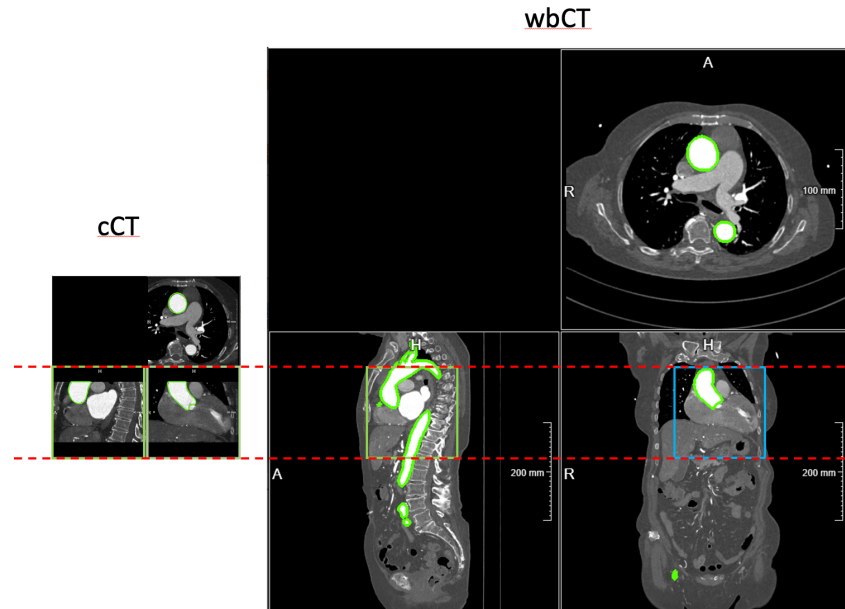


Abbildung 10: Registrierung eines Ganzkörper-CT-Scans (wbCT) und eines Phasen-CT-Scans (cCT). Eine besondere technische Herausforderung ist der Umgang mit den großen Unterschieden in den Bildausschnitten bei der Registrierung.

Auch in dieser Registrierung wurden die zur Verfügung gestellten Aorta-Segmentierung als zusätzliche Information mit in die Registrierung eingebunden und diese auf den anatomischen Bereich der Phasen-CTs beschränkt. Die Registrierung wurde für alle 20 Datensätze durchgeführt und die ermittelten Deformationsfelder zur Verfügung gestellt. Zur Evaluation dieser Registrierung wurden ebenfalls der Dice-Koeffizient und die Hausdorff Distanz der Aorta-Segmentierungen vor und nach der Registrierung berechnet. Der durchschnittliche Dice-Koeffizient konnte durch die Registrierung von 0.8956 auf 0.9851 gesteigert werden, die Hausdorff-Distanz [mm] von 47.5734 auf 34.0302 verbessert werden (Abbildung 11).

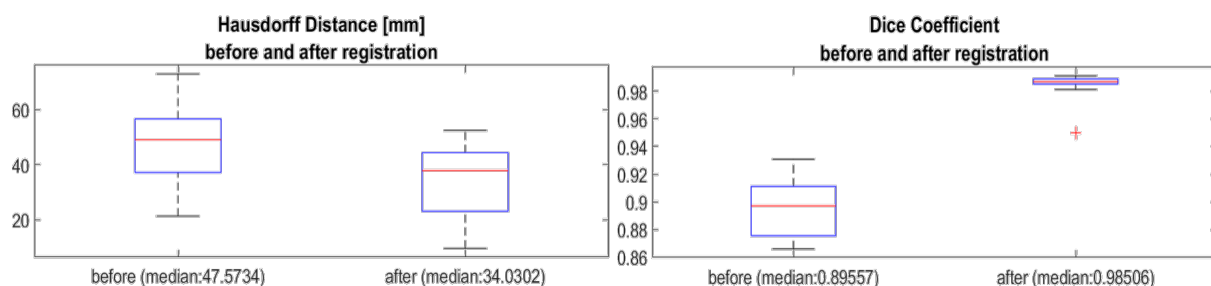


Abbildung 11: Evaluation wbCT-cCT-Registrierung von Ganzkörper-CT (wbCT) und des 30% Phasen-Kontars-CT (ccCT) anhand von Dice-Überlapp und Hausdorff-Distanz der Aorta-Segmentierungen vor und nach Registrierung.

Weiter gibt Abbildung 12 einen repräsentativen qualitativen Eindruck der Genauigkeit der Registrierungsergebnisse für einen Datensatz anhand der Aorta-Segmentierungen aus zwei verschiedenen Perspektiven.

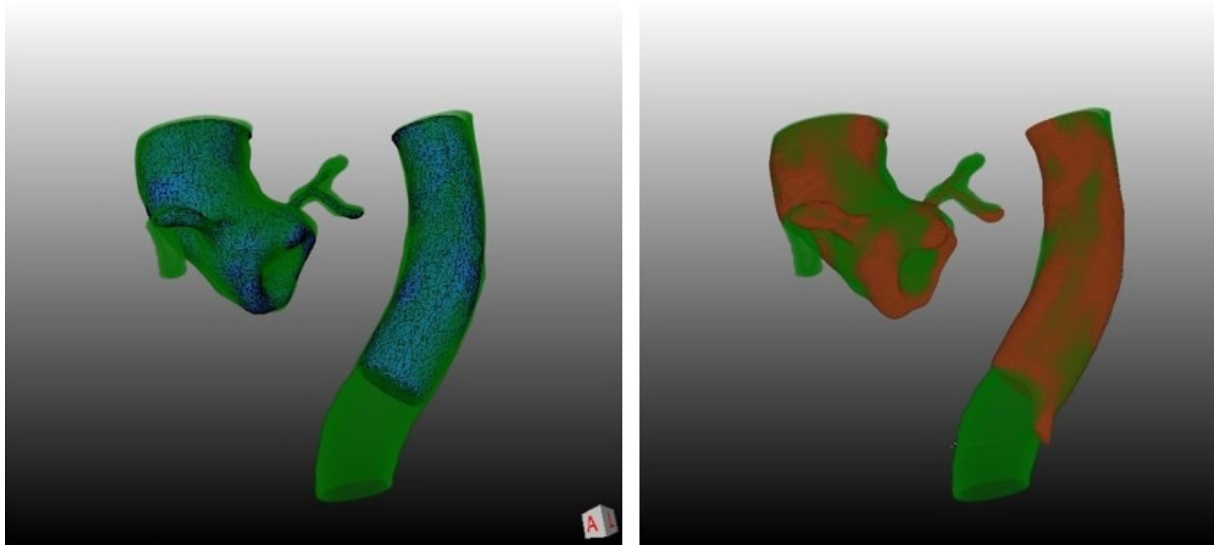


Abbildung 12: Vergleich der Aorta Segmentierung des Referenzbildes (grün) mit der Aorta Segmentierung des Templatebildes vor (blau) und nach (orange) der Registrierung

2.4.3 Prä-Post-Analyse

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes wurde eine Prä-Post-Registrierungs-Pipeline entwickelt und auf insgesamt 14 Prä-MR/Post-MR-LAA-Patientendatensätze, die von UKU im Laufe des Projektes zur Verfügung gestellt wurden, getestet.

Die Prä-MR und Post-MR Bildpaare wurden jeweils mittels der entwickelten Pipeline zunächst rigide und in einem zweiten Schritt deformierbar miteinander registriert. Die Ergebnisse wurden visuell begutachtet und insgesamt für „gut“ befunden. Abbildung 13 zeigt ein Beispielergebnis der Prä-Post-Registrierung eines Projektdatensatzes.

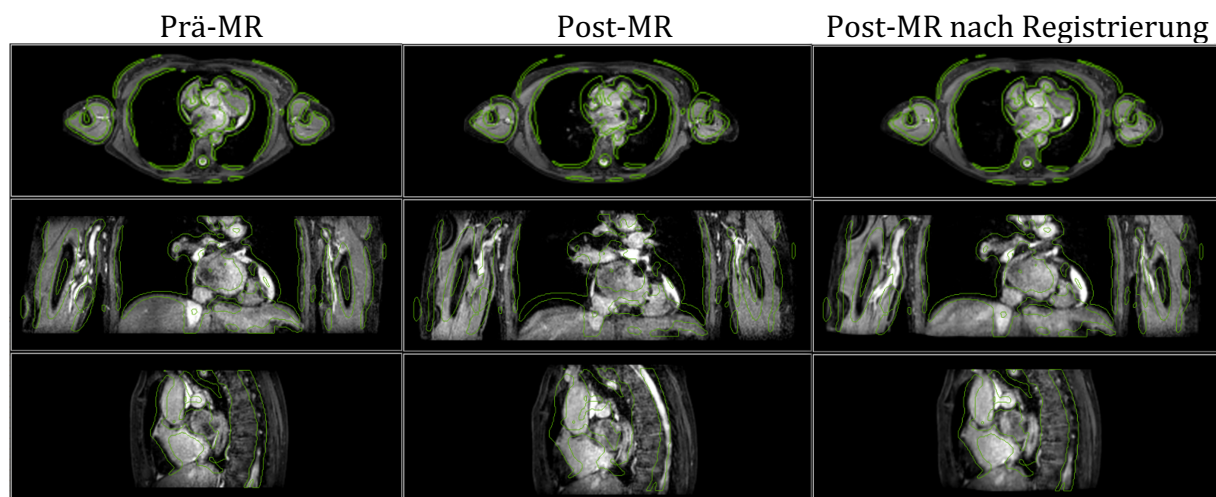


Abbildung 13: Beispielergebnis der Prä-Post-MR-Registrierung: Links: Prä-MR mit Konturen in grün überlagert. Mitte: Post-MR mit Konturen des Prä-MR in grün überlagert. Rechts: Registrierungsergebnis – deformiertes Post-MR mit Konturen des Prä-MR in grün überlagert.



3 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Alle bewilligten Mittel wurden für die Durchführung des Projekts und zum Erreichen der Projektziele verwendet. Die erhaltene finanzielle Zuwendung wurde zur Finanzierung von Personal- und Reisekosten genutzt.

Personalmittel

Die Personalmittel wurden ausschließlich zur Finanzierung der Arbeiten des Teilprojektes im Umfang von 31 PM, verteilt auf ein Team von Wissenschaftler*innen und über die Laufzeit von 3,5 Jahren, verwendet. An dem Projekt waren insgesamt 5 wissenschaftliche Mitarbeiter*innen der MEVIS Standorte Berlin und Lübeck beteiligt, wobei das Gros der Arbeiten und Personalmittel auf zwei Mitarbeiter*innen verteilt war. Zur erfolgreichen Umsetzung des ambitionierten Projektplans wurden diverse Vorentwicklungen von Fraunhofer MEVIS genutzt und für den Projekterfolg war es notwendig, dass Teile der geplanten Arbeiten von erfahrenen Mitarbeiter*innen ausgeführt bzw. angeleitet wurden. Insbesondere wurden Erfahrung, methodisches Überblickswissen und Spezialkenntnisse für die Technologien Registrierung und Segmentierung zur erfolgreichen Umsetzung des Projektplans innerhalb der angestrebten Laufzeit benötigt.

Reisemittel

Die Reisekosten von Fraunhofer MEVIS belaufen sich auf insgesamt 8.900€ und liegen damit im Rahmen des für das Projekt bewilligten Budget von 9.000€. Die Reisemittel wurden zur Vorstellung, Diskussion und den wiss. Austausch der Projektergebnisse auf nationalen und internationalen Fachkonferenzen, sowie für Reisen zu Arbeits-, Projekt-, und Meilensteintreffen in Ulm, Würzburg, Berlin und Lübeck genutzt.

4 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die im Projekt durchgeführten Arbeiten waren unabdingbar für den erfolgreichen Abschluss des Projektes. Die besondere Herausforderung bestand in der Entwicklung praxistauglicher Methoden, was besondere Anforderungen an Robustheit stellt. Trotz umfangreicher Vorarbeiten in den Bereichen

- Segmentierung,
- Visualisierung,
- Computergestützte Planung und Simulation kardiovaskulärer Interventionen und
- Registrierung

waren diverse Anpassungen und teilweise Neuentwicklungen notwendig, um ein System zu entwickeln, dass komplexen Anforderungen genügt. Rückblickend bewerten wir die geleistete Arbeit als absolut notwendig und angemessen. Die geplanten Ziele waren ambitioniert und wären ohne den Einsatz erfahrener Mitarbeiter*innen und Vorarbeiten nicht oder nur bedingt in vorliegender Qualität und Umfang erreichbar gewesen.

5 Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die im Rahmen des Projektes von Fraunhofer MEVIS erforschten Verfahren und Methoden zur Segmentierung, Tracking und Registrierung von cardio-vaskulären CT und MRT Bildern, sowie die dafür entwickelten Komponenten für Registrierung, Segmentierung und Volumetrie, liegen in Form voll funktionaler Software-Prototypen vor. Diese Ergebnisse sind als Module in unserer Entwicklungsplattform MeVisLab (www.mevislab.de) verfügbar und können direkt in anderen Projekten genutzt, weiterentwickelt und auf andere Fragestellungen übertragen werden, ohne dass weitere Integrationsarbeiten nötig sind. Insbesondere sind die entwickelten Komponenten und das erlangte Know-How auch auf andere Gebiete, Follow-Up-Fragestellungen und für die Verarbeitung longitudinaler Daten übertragbar.

Die wirtschaftliche Verwertung der Ergebnisse soll primär durch Lizenzierung der Komponenten sowie Weiterentwicklung des Gesamtsystems in Folgeprojekten erfolgen. Hierzu wurden bereits Gespräche mit den Projektpartnern und insbesondere den beteiligten KMU-Partnern geführt.

6 Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt

Die Informationsrecherche zur Erfassung und Beurteilung relevanter Entwicklungen erfolgte durch regelmäßige elektronische Schlagwortsuche:

Online-Portale	Suchbegriffe	In Verbindung mit
• Google Scholar • PubMed	• TAVI • Transcatheter aortic valve • PVI • Catheter ablation • Left ventricle • Aortic root	• Tracking • Segmentation • Registration

Die Suche ergab insgesamt 313 Treffer für die Jahre 2019-2023 mit Google-Scholar¹ und 85 Treffen für den Projektzeitraum Zeitraum mit Pub-Med².

¹

https://scholar.google.de/scholar?q=%28intitle%3ATAVI+OR+intitle%3A%22transcatheter+aortic+valve%22+OR+intitle%3APVI++OR+intitle%3A%22catheter+ablation%22+OR+intitle%3A%22aortic+root%22+OR+intitle%3A%22left+ventricle%22+AND+%28intitle%3Atracking+OR+intitle%3Asegmentation+OR+intitle%3Areistration%29&hl=de&as_sdt=0%2C5&as_vis=1&as_ylo=2019&as_yhi=2023

²

<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/?term=%28TAVI%5Bti%5D+OR+%22transcatheter+aortic+valve%22%5Bti%5D+OR+PVI%5Bti%5D+OR+%22catheter+ablation%22+%5Bti%5D+OR+%22aortic+root%22%5Bti%5D+OR+%22left+ventricle%22+%5Bti%5D%29+AND+%28tracking%5Bti%5D+OR+segmentation%5Bti%5D+OR+registration%5Bti%5D%29+AND+%28%222019%2F10%2F01%22%5BPDAT%5D+%3A+%222023%2F03%2F31%22%5BPDAT%5D%29>



Das Gros der gefundenen Publikationen beschäftigt sich mit Deep-Learning-Ansätzen zur Segmentierung der Anatomie des Herzens in Röntgen-, CT-, MRT-, oder Ultraschall-Bildern. Zwei Veröffentlichungen beschäftigen sich mit Tracking von Herzbewegungen und in einer weiteren Publikation werden Registrierungsverfahren eingesetzt.

Die Inhalte der Arbeiten haben Bezug zu unserem Vorhaben, wobei keine der Arbeiten als disruptive Entwicklung beurteilt wurde und die von uns entwickelten Methoden dem Stand der Forschung entsprechen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass von dritter Seite keine FE-Ergebnisse bekannt geworden sind, die zu Änderungen des Vorhabens und/oder der Durchführung des Vorhabens geführt haben.

7 Erfolgte Veröffentlichungen

N Krüger, A Meyer, L Tautz, M Hüllebrand, I Wamala, M Pullig, M Kofler, J Kempfert, S Sündermann, V Falk, A Hennemuth: Cascaded neural network-based CT image processing for aortic root analysis, International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery, 17(3):507–519, 2022.

J Brosig: Image-based Assessment of Anatomical Structures and Position Uncertainty for TAVI Planning, SPIE Medical Imaging 2023, Live Demonstrations Workshop, 2023