

Schlussbericht

M²OLIE – Mannheim Molecular Intervention Environment



Verbundprojekt: Systemplattform für die minimalinvasive, assistierte molekulare Intervention (M²INT)

Teilvorhaben: Systemplattform für die Applikation der molekularen Intervention¹

Förderkennzeichen:	13GW0389A
Zuwendungsempfänger:	Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V.
Projektleiter:	Dr. Jens Langejürgen
Laufzeit des Vorhabens:	01.06.2019 – 31.05.2024
Berichtszeitraum:	01.06.2019 – 31.05.2024

¹ Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieses Berichts liegt beim Autor.

Inhalt

I.	Kurzbericht.....	3
II.	Eingehende Darstellung	5
II.1	• Erzielte Ergebnisse	5
II.2	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	12
II.3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	12
II.4	Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses.....	12
II.5	Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen.....	13
II.6	Veröffentlichungen des Ergebnisses	13
III.	Erfolgskontrollbericht	14
III.1	Wissenschaftlich-technische Ergebnisse, Nebenergebnisse und gesammelte Erfahrungen ..	14
III.2	Fortschreibung des Verwertungsplans	15
III.3	Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen und erteilte Schutzrechte	15
III.4	Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende	15
III.5	Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende	16
III.6	Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit	16
III.7	Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben	16
III.8	Einhaltung der Ausgaben- und Zeitplanung	17
IV.	Kurzfassung	18

I. Kurzbericht

Im Rahmen des Forschungscampus M²OLIE befasste sich das Fraunhofer IPA im Gesamtvorhaben M²INT mit der Systemplattform für die Applikation der molekularen Intervention. Die Arbeiten bauten auf den Entwicklungen der 1. Förderphase (FP) auf, speziell den Basistechnologien für das robotische Assistenzsystem und dessen Einbindung in die hybride OP-Umgebung und den M²OLIE-Closed-Loop-Prozess. Innerhalb dieser Umgebung wurden zwei grundlegende Aufgaben identifiziert: 1. die Platzierung des Patienten und des Assistenzsystems im Operationssaal und 2. die Ertüchtigung des Assistenzsystems mit weiteren medizinischen Instrumenten. Ein weiterer Schwerpunkt war die intrainerventionelle Qualitätskontrolle bei der Thermoablation. Aufgrund einer mit dem Fördergeber abgestimmten Mittelreduktion und einem damit verbundenen Übergang von Themen und Arbeitsinhalten an die Universität Heidelberg während der Laufzeit der 2. FP wurden einige Arbeitspakete in geringerem Maße durch das Fraunhofer IPA bearbeitet als in der ursprünglichen Beantragung vorgesehen.

Ein moderner Operationssaal ist eine komplexe Umgebung, die eine Vielzahl an stationären und mobilen Geräten und Komponenten auf engstem Raum beherbergt. Insbesondere wenn aktive selbstfahrende Geräte wie ein Conebeam-CT oder das robotische Assistenzsystem hinzukommen, ist die zuverlässige Platzierung und Ausrichtung unerlässlich, um Kollisionen und daraus resultierende Personen- und Sachschäden zu vermeiden. Um das zu erreichen, wurde die OP-Umgebung mit den darin enthaltenen Komponenten vollständig digitalisiert. Innerhalb dieser virtuellen 3D-Umgebung wird der Eingriff geplant und simuliert. Das beinhaltet die korrekte Lagerung des Patienten, um den optimalen Zugang des Assistenzroboters für den Eingriff zu erreichen. Aus der Simulation wird eine Anleitung erzeugt, die mittels einer Augmented-Reality-Anwendung direkt im OP verfügbar gemacht wird und das OP-Personal Schritt für Schritt durch die OP-Vorbereitung und Patientenlagerung leitet und auch während des Eingriffs hilfreiche Hinweise gibt, beispielsweise auf die imminenten Bewegungen der robotergestützten Geräte. Ein weiterer Use-Case für den hier erforschten Ansatz für eine Dokumentation der Patientenlagerung und einer augmentierten Darstellung von Lagerungshilfen und Positionen wurde darüber hinaus gemeinsam mit der Strahlentherapie der Universitätsmedizin Mannheim untersucht.

Robotische Assistenzsysteme werden aktuell vorwiegend genutzt, um Hilfestellung bei der Behandlung zu geben, indem beispielsweise eine Schablone in Position über dem Operationsfeld ausgerichtet und gehalten wird. Bewegungen, die Patient*innen verletzen, wie der Einstich einer Nadel oder das Führen eines Skalpells oder einer chirurgischen Säge, bleiben dem Operateur vorbehalten. In diesem Teilprojekt wurde untersucht, wie robotische medizinische Instrumente aussehen können, die tatsächlich invasive Tätigkeiten ausführen. Als Beispiel wurde der Nadeleinstich gewählt, der sowohl diagnostisch bei einer Biopsie als auch therapeutisch bei einer Nadelablation, bei der Medikamentengabe oder bei einer Implantation eingesetzt werden kann. Ein entsprechendes Instrument wurde entwickelt und prototypisch umgesetzt. Es ist gepaart mit einem telemedizinischen Steuerpult, das Kraffeingaben entgegennimmt, aber auch die auftretenden Reaktionskräfte des Einstichs ins Gewebe zurückmeldet und haptisch erlebbar macht. Das Instrument kann vom Assistenzroboter getragen und ausgerichtet werden.

Ein weiteres wesentliches Ergebnis aus der 2. FP ist die impedanzbasierte Technologie zur intrainerventionellen Ablationskontrolle. Diese Technologie lässt sich direkt auf die Ablationsnadel integrieren und intraoperativ während der Ablation verwenden. Dabei wird ein für Geweberwärmung und Ablation jeweils charakteristischer zeitlicher Verlauf der komplexen Impedanz zwischen verschiedenen Elektroden auf der Ablationssonde mit einem personalisierten

Modell des erwarteten Verlaufs verglichen. Abweichungen zwischen dem gewünschten und dem tatsächlichen Verlauf der Ablation können so frühzeitig erkannt und dargestellt werden, so dass eine Anpassung von Ablationsparametern noch möglich ist. Der zugrunde liegende Use-Case wurde mit einem Team der Klinik für Radiologie der Universitätsmedizin Mannheim entwickelt. Das Verfahren und eine Vorrichtungsbeschreibung wurden zum Patent angemeldet. Eine Referenzsensorik für die Bestimmung der lokalen Koagulation wurde an der Hochschule Mannheim erforscht. Weiterhin wurde die integrierte Messtechnik erfolgreich während einer Ablation am Tiermodell (ex vivo an einer Rinderleber) getestet. Die Ergebnisse wurden auf der Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Biomedizinische Technik präsentiert und sind in diesem Kontext auch zur Publikation akzeptiert.

II. Eingehende Darstellung

II.1 • Erzielte Ergebnisse

Im Rahmen des Arbeitspakets 1 wurde ein prototypisches System zum assistierten und automatisierten Setup des OP implementiert und weiterentwickelt, der sog. OR Companion. Es basiert auf den ermittelten Anforderungen an das automatisierten OP Setup und die patientenindividuelle Lagerung.

Der OR Companion bildet sowohl die robotischen Systeme des Interventionsraums (guidoo der BEC GmbH, Artis zeego von Siemens Healthineers, Operationstisch der Maquet GmbH mit Patient bzw. Phantom) als auch die passiven Komponenten (z. B. Kontrollpult, OP-Beleuchtung und Deckenversorgungseinheiten) innerhalb des sogenannten digitalen Zwillings ab, einer virtuellen dreidimensionalen Umgebung. Der digitale Zwilling basiert auf einem detaillierten 3D-Scan des experimentellen, hybriden OP-Saals und der umgebenden Räume und beinhaltet die darin installierten Geräte und Infrastruktur. Weiterhin standen von einigen Geräten 3D-Modelle vom Hersteller zur Verfügung, die genutzt wurden, um den digitalen Zwilling zu ergänzen und zu verfeinern. Dabei konnten insbesondere Skelette und kinematische Ketten modelliert werden, die es ermöglichen, realistische Bewegungen der Roboterarme zu simulieren.



Abb. 1: 3D-Scan des experimentellen, hybriden OP-Saals inklusive der installierten Geräte und Infrastruktur

Anhand des vom Arzt geplanten medizinischen Eingriffs und der daraus resultierenden Einstichstellen und Nadeltrajektorien wird in der virtuellen Umgebung die Anordnung der OP-Umgebung errechnet, simuliert und optimiert. Dabei wird insbesondere eine Kollisionserkennung und -vermeidung durchgeführt, um eine kollisionsfreie Bahnplanung zu erreichen. Die Planungsdaten werden für den Benutzer in einer Augmented-Reality-Umgebung auf einem Heads-Up-Display (einer Microsoft Hololens 2) dargestellt. Dabei werden auch Anweisungen

übermittelt, in welcher Reihenfolge und auf welchen Pfaden die aktiven und passiven Komponenten innerhalb des Interventionsraums bewegt werden sollen, um das optimale virtuelle Setup in der Realität auszurüsten.

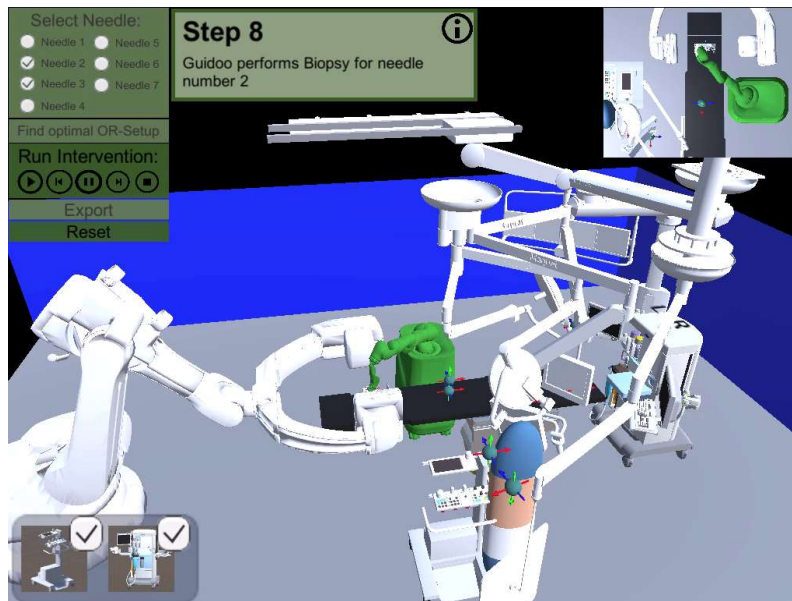


Abb. 2: Virtuelles Abbild (digitaler Zwilling) des Interventionsraums



Abb. 3: OR Companion – AR-Umgebung wird mittels Hololens in Interventionsraum projiziert

Die Genauigkeit der Registrierung des AR-Headsets im Raum wurde durch Einsatz des robusten, markerbasierten Systems „ArUco“, welches explizite künstliche Marker verwendet, deutlich verbessert. Die Registrierung ist maßgeblich für die Verortung und deckungsgleiche Anzeige der computergenerierten Modelle im realen Raum. Mit dem verbesserten System wurden Demonstrationen und Studien mit zukünftigen Endnutzern durchgeführt. Das Feedback aus den Befragungen wurde genutzt, um das User Interface, die User Interaktion und die generelle Funktionsweise des Systems weiter zu verbessern. Auch wurde die Funktion filmisch dokumentiert.

Weiterhin wurde die Technologie in eine neue Anwendung überführt, die zusammen mit der Klinik für Strahlentherapie und Radioonkologie definiert wurde. Dabei wurde die ursprüngliche Fragestellung der Patientenlagerung betrachtet, die im Rahmen der Therapie durch stereotaktische Bestrahlung eine hohe Bedeutung hat. Die Patient*innen erhalten in regelmäßigen Behandlungssitzungen über einen Zeitraum von mehreren Wochen oder Monaten eine definierte

Strahlendosis. Dabei ist es wichtig, dass die Patient*innen immer in der gleichen Position gelagert werden, damit die Strahlung gezielt im erkrankten Gewebe ankommt, während die umliegenden Organe bestmöglich geschont werden. Mit der Technologie aus OR Companion können die Patientenlage sowie die Position der Lagerungshilfsmittel bei der ersten Sitzung schnell und genau dokumentiert und bei allen folgenden Sitzungen zuverlässig reproduziert werden.

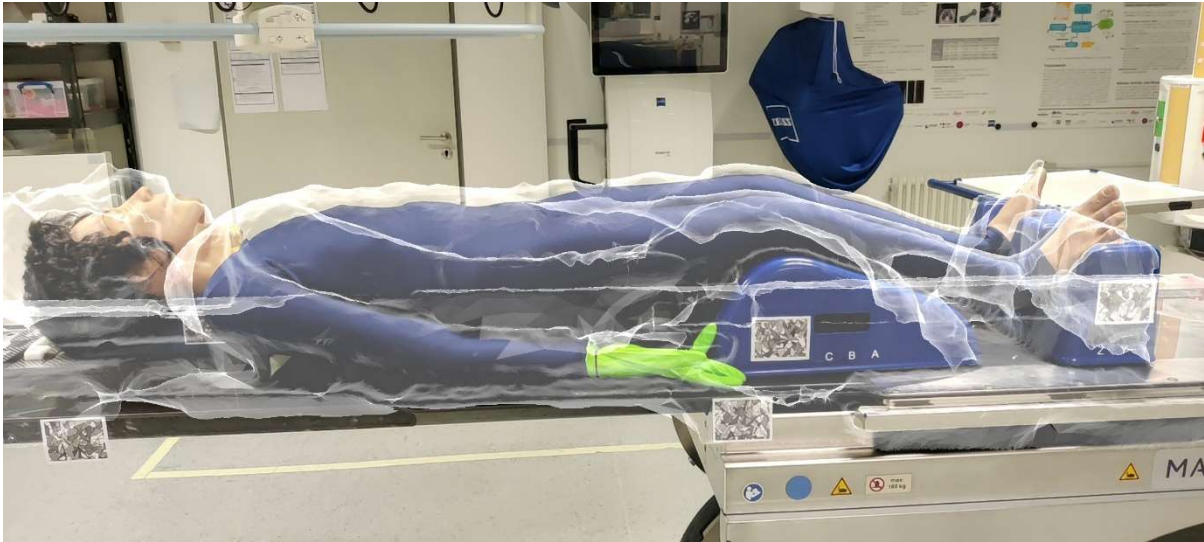


Abb. 4: Die holographische Darstellung von Patientenlage und Lagerungshilfsmitteln aus der Planungssitzung erlaubt die einfache und zuverlässige Patientenlagerung im Beispiel am Phantom

Im Rahmen von Arbeitspaket 3 wurde ein Prototyp für ein System zur telemanipulierten Nadelplatzierung aufgebaut. Es besteht aus zwei primären Komponenten:

- 1) Einem Aktuator zum Vorschub der Biopsienadel: Der Aktuator erlaubt optional auch die Drehung der Nadel zur Stabilisierung entlang des Einstichpfads bzw. zur Pfadkorrektur. Mittels integrierter Sensorik kann der tatsächliche Vorschub und die Gegenkraft beim Einstechen der Nadel ins Gewebe erfasst werden. Die Kraftsensoren sind in der Lage, die Kräfte auf die Nadelhülse (d. h. Reibung des durchstochenen Gewebes entlang des Einstichkanals) und auf die Nadelspitze separat aufzulösen. Das komplette Modul wurde miniaturisiert und kann vom Roboterarm des Interventionsassistenten getragen werden, ebenso wie von passiven Stativen.
- 2) Einem Kontrollpult mit haptischem Feedback, dem sogenannten Interventionscockpit: Es beinhaltet einen Kraftsensor zur Steuerung des Nadelvorschubs durch den Benutzer sowie einen Aktuator, der die Gegenkraft auf die Nadel fühlbar macht.



Abb. 5: Links: Kontrollpult mit Force-Feedback-Eingabegerät; rechts: Nadelaktuator an Stativ über Phantom

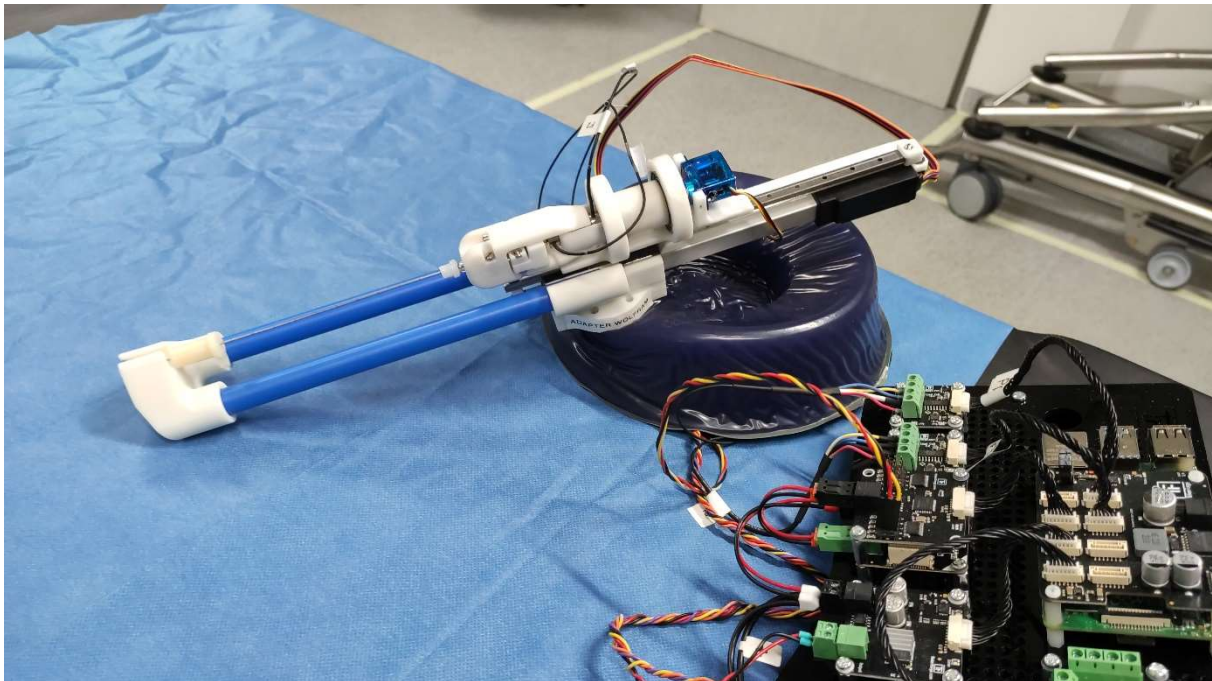


Abb. 6: Miniaturisierter Nadelaktuator mit zwei Kraftsensoren an Steuerungsprototyp basierend auf Raspberry Pi

Beide Module verfügen jeweils über einen eigenen Controller basierend auf der Raspberry Pi Architektur und sind über serielle Kommunikation verbunden. Dies erlaubt den einfachen Austausch der physikalischen Kommunikationsebene. Die ursprünglich verwendete, kabelgebundene Übertragung wurde durch ein Paar Funkmodems ersetzt, die den neuen 5G-Standard für mobile Datenübertragung verwenden und innerhalb des 5G-Campusnetzes von Fraunhofer eine Verbindung mit geringer Latenz aufbauen können. Die nächsten Schritte umfassen die Erprobung und Verfeinerung hin zu einem robusten System, welches für eine präklinische Erprobung geeignet ist. Weiterhin wird angestrebt, das Kontrollpult zukünftig durch einen algorithmischen Controller zu ersetzen, um einen vollautomatischen Nadeleinstich zu erreichen. Aufgrund der Mittelreduktion konnten diese Arbeiten im Rahmen von M²INT zwar nicht weitergeführt werden, jedoch wird das System im Rahmen des Projekts 5G-OR weiterentwickelt und

erfolgreich als Demonstrator eingesetzt. Der Fokus liegt dabei insbesondere auf der Kommunikationstechnologie (5G Standard) und der möglichst latenzfreien Regelung des Vorschubs mit dem Ziel eines standortübergreifenden telemedizinischen Einsatzes.

Durch die BEC GmbH wurde der Interventionsassistent zu Marktreife entwickelt und zur Zulassung nach MDR vorbereitet. Er wurde in 2023 unter dem Namen guidoo in den Markt eingeführt. Ein Nullserienmodell steht in Mannheim zur Verfügung. Er wurde erfolgreich im Kadaversversuch und im Tierversuch getestet und für weitere Forschungstätigkeiten angewendet (z. B. für die Nutzerstudie in Arbeitspaket 1). Die Zulassung als Medizinprodukt ist erfolgt und der Ethikantrag für den Einsatz am Menschen wurde positiv bewertet. In Folge dessen wurde im Dezember 2023 eine Behandlung am Menschen erfolgreich durchgeführt, die auch eine Nutzerstudie beinhaltet. Im Rahmen der noch laufenden klinischen Studie wurden in 2024 bereits neun erfolgreiche Behandlungen von Patienten durchgeführt.

In Arbeitspaket 4 wurde ein System entwickelt, das es ermöglicht den planungsmäßigen Fortschritt einer Mikrowellenablation zu erkennen. Im jetzigen Stand der Technik ist es nicht möglich, direkt noch während des Eingriffs zu bewerten, ob ein Tumor vollständig abladiert wurde. Thermische Kontrollverfahren messen den Erfolg nur indirekt, weshalb ein integriertes auf der Impedanz basiertes Verfahren zum Einsatz kommt. Das Grundprinzip ist die zustands- und temperaturabhängige komplexe elektrische Impedanz des Gewebes, welche durch einen Messstrom und einen Impedanzanalyser bestimmt wird. Hierbei liegt der Messstrom zwischen verschiedenen Elektrodenpaaren an, die um die Ablationsadel angebracht sind (Abbildung 7 und 8). Das System wurde in mehreren Iterationen entwickelt und validiert. In der finalen Version besteht es aus einem Array aus acht Elektroden an einer Nadel, einem Elektroden-Multiplexer und einem Impedanzanalyser mit Microcontroller. Der Output des Geräts sind die Real- und Imaginärteile der gemessenen Impedanz, die digital weiterverarbeitet werden. Messungen können auch während der aktiven Mikrowellenablation durchgeführt werden.

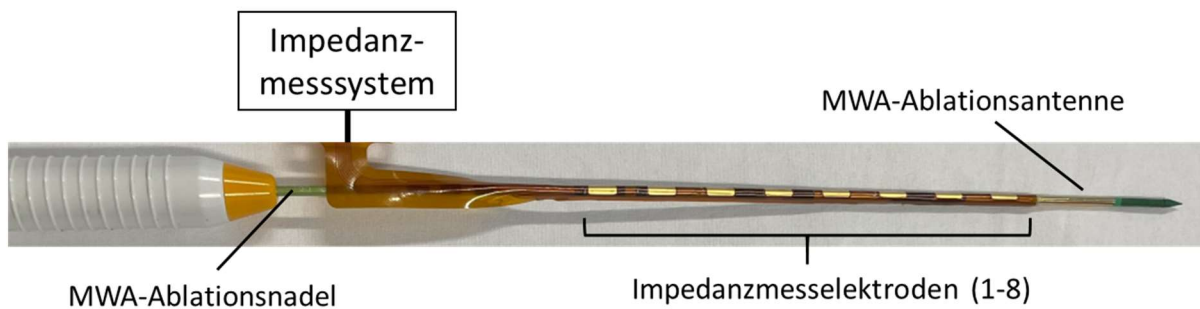


Abb. 7: Mikrowellen-Ablationssystem mit integrierten Impedanzmeselektroden

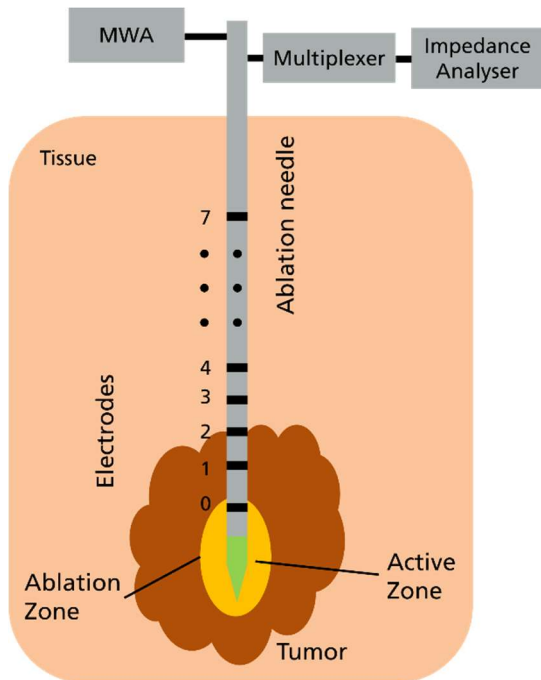


Abb. 8: Grundprinzip des Messsystems

Die Impedanzmessungen erfolgten dabei zwischen beliebigen Elektroden entlang der Applikationsnadel. Je nach Entfernung der Elektroden voneinander ergaben sich räumlich unterschiedliche Messpfade mit unterschiedlichen axialen, aber auch radialen Tiefeninformationen, die genutzt wurden, um die Ausbreitung der Ablationszone zu überwachen. So wird durch nahe beieinander platzierte Elektroden kaum ein Messstrom durch radial entferntes Gewebe geleitet, während bei einer größeren axialen Entfernung auch eine höhere radiale Penetration des Messstroms erfolgt.

In den Messdaten (Abbildung 9) ist deutlich zu erkennen, dass sich die Ablationszone ausbreitete und Einfluss auf den Magnituden und Phasenverlauf der Impedanz nahm. Dabei wurden reversible bekannte Effekte der Temperatur auf die Leitfähigkeit als auch irreversible Effekte beobachtet. Irreversible Effekte sind durch den Koagulationseffekt zu erklären. Bei erhöhter Temperatur wurde die Zelle und Zellmembran irreparabel beschädigt, was eine irreversible Änderung der Leitfähigkeit und Permittivität zur Folge hatte. Vielversprechend ist hierbei die Phasenverschiebung, welche zuerst bei Messpfaden in Nähe der Ablationszone auftritt.

Um eine quantitative Bewertung des Ablationsverlaufs und einen Vergleich mit den theoretisch erwarteten Werten zu ermöglichen, wurde zusätzlich ein Simulationsmodell für Mikrowellenablationen entwickelt. Dieses Simulationsmodell (Abbildung 10) beinhaltet Komponenten, um die thermische Ausbreitung, den Temperatureffekt und den Koagulationseffekt zu simulieren. Es wird die Änderung der elektrischen Impedanz des Gewebes über die Zeit ausgegeben. Das Modell wurde experimentell parametrisiert und validiert. Kernkomponente des Modells ist die Arrhenius Gleichung, die den Koagulationsgrad über die eingebrachte Energie modelliert. Durch diese können irreparable Beschädigungen der Gewebezellen einbezogen werden.

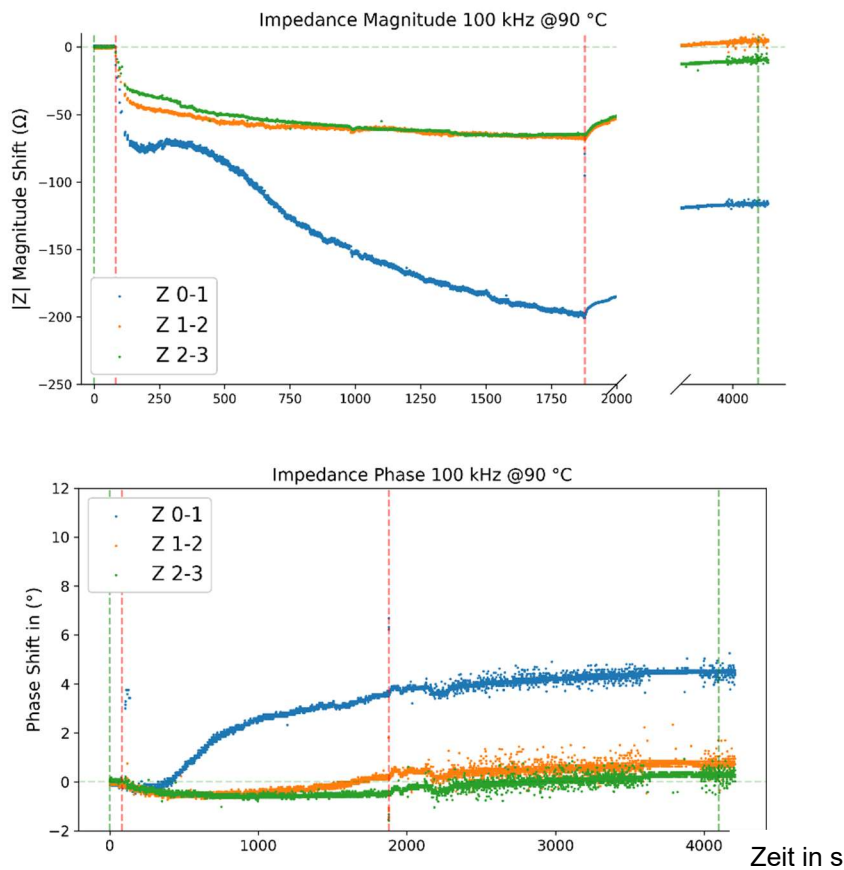


Abb. 9: Verlauf von Magnitude und Phase

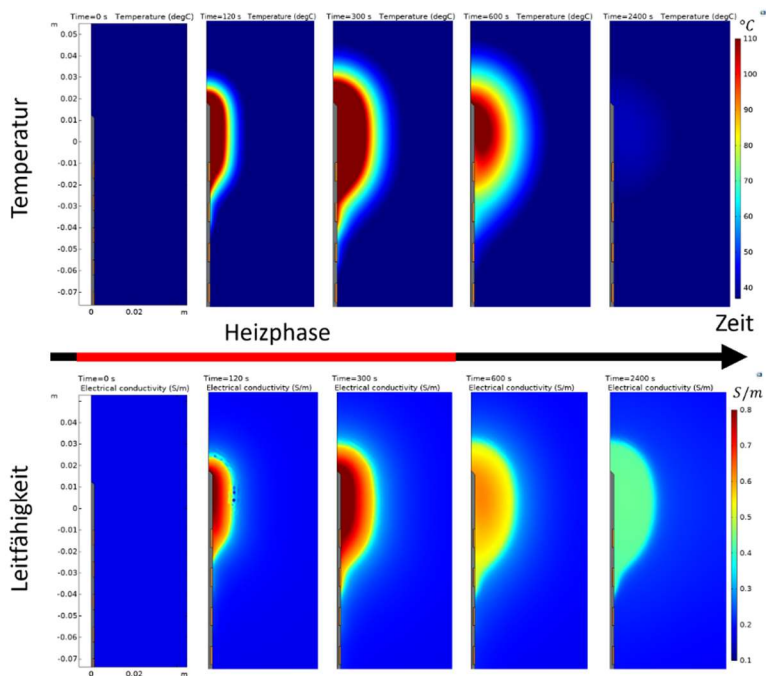


Abb. 10: Heatmap der simulierten Temperatur und Leitfähigkeit zu verschiedenen Zeitpunkten

In Kombination mit den Messdaten kann diese präoperative Simulation genutzt werden, um den zeitlichen Verlauf zwischen dem idealisierten Modell und der realen Ablation zu vergleichen. So können die Simulationsdaten während des Eingriffes genutzt werden, um Abweichungen im Messverlauf über Features im Magnituden- und Phasenverlauf zu erkennen. Ein solches System kann eine intraoperative Kontrolle des Ablationseingriffes ermöglichen.

II.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Position	Gesamtvorkalkulation	Abgerechnete Kosten
0837	1 185 650,00 EUR	1 251 598,92 EUR
0838	22 000,00 EUR	8 963,32 EUR
0847	10 000,00 EUR	599,69 EUR
Gesamt	1 217 650,00 EUR	1 261 161,93 EUR

II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die molekulare Intervention mit ihren angestrebten schnellen Behandlungen und kurzen Warte- bzw. Verweilzeiten in der Klinik erfordert einen erheblich höheren Technologieeinsatz für neue Prozesse und Therapiemethoden. Diese müssen ständig und zuverlässig verfügbar sein und benötigen eine Vielzahl von technischen und prozessualen Schnittstellen. In der e1. FP wurden dafür grundlegende technische Konzepte erforscht, die die Basis für 2. FP bildeten. Hauptaufgabe in der 2. FP war es, diese Konzepte, die zunächst noch weit von einer Anwendung am Menschen entfernt waren, dahingehend weiterzuentwickeln und robust und sicher zu machen. Durch die notwendige Integration von Organisationsstrukturen, Gerätetechnik und Software weisen die resultierenden Aufgaben eine hohe Komplexität, Interdisziplinarität und damit auch Risiko auf, die von keiner beteiligten Forschungseinrichtung allein und aus eigener Kraft bewältigt werden konnte. Das Forschungsbudget des Zuwendungsempfängers gestattete keine vollständige Finanzierung der Vorhaben, so dass hier verschiedene Ressourcen bzw. Ergebnisse auch aus weiteren assoziierten Projekten, z. B. 5G4KMU und 5GOR, gebündelt wurden.

II.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses

Im Rahmen der nun abgeschlossenen 2. FP wurde das robotische Assistenzsystem an die Firma BEC GmbH lizenziert und dort zum marktfähigen Medizinprodukt weiterentwickelt. Diese Entwicklung wurde durch Fraunhofer durch Wissenstransfer sowie durch Expertise bei der Durchführung von entwicklungsbegleitenden Versuchen und Erprobungen im experimentellen Hybrid-OP unterstützt. Diese dienten als Grundlage für präklinische Studien am Tier sowie klinische Studien am Menschen in der Universitätsklinik Mannheim. Das Assistenzsystem guidoo wurde am Markt eingeführt und steht der Universitätsklinik, speziell der zukünftigen M²OLIE-Klinik, nun für Behandlungen zur Verfügung. Zusätzlich verfügt Fraunhofer nun über ein Experimentalsystem basierend auf dem guidoo-System und Software sowie einem regulären KUKA-Leichtbauroboter, das genutzt wird, um weitere synergistische Anwendungen zu erschließen.

Die OR-Companion-Software wurde mit Endanwendern erprobt und durchweg positiv bewertet. Der Anwendungsfall der Patientenlagerung zeigt ein großes Marktpotential. Da die Software schon sehr nahe an einem MVP ist, werden alternative Wege parallel zu M²OLIE angestrebt, um diese schnell und agil zu einem marktfähigen Produkt weiterzuentwickeln und zu

vermarkten. Dabei wird eine Ausgründung und/oder Auslizenzierung angestrebt, da Fraunhofer selbst durch seine Geschäftsform nicht in der Lage ist, ein Serienprodukt zu vertreiben. In diesem Zusammenhang erfolgte eine Fraunhofer interne Ausgründungsförderung (AHEAD) für dieses Thema.

Die Ablationskontrolle konnte nach erfolgter Patenteinreichung der Fachcommunity im Rahmen einer Konferenz und nachfolgender Publikation nähergebracht werden. Es ist geplant, das System in einer Industriekooperation auf ein höheres Technological-Readiness Level zu bringen, wobei derzeit aktiv auf möglich Partner zugegangen wird (z. B. im Rahmen Medica 2024). Einzelne Forschungsergebnisse, die innerhalb von M²OLIE nicht weiterverfolgt werden können, beispielsweise der automatisierte Nadelapplikator mit Fernsteuerung durch das Interventionscockpit, wurden erfolgreich in andere parallellaufende Forschungsprojekte, beispielsweise 5GOR, überführt. Sie dienen nun als Anwendung und Demonstrator für telemedizinische Eingriffe, die dafür notwendige Übertragungstechnologie und die Entwicklung von ergonomischen Mensch-Maschine-Schnittstellen und waren grundlegend für die erfolgreiche Beantragung dieser Forschungsprojekte.

II.5 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Nicht bekannt.

II.6 Veröffentlichungen des Ergebnisses

1. Neumann et al. (2019). A multiparametric (1H, 23Na, diffusion, flow) anthropomorphic abdominal phantom for multimodal MR and CT imaging. Proc. Intl. Soc. Mag. Reson. Med., Montreal, Canada, 27, p.1121 (1)
2. Schäfer et al. (2021) BEC GUIDOO - A Novel Robotic Assistant for Fast, Precise Needle Placement. Biomedizinische Technik / Biomedical Engineering 66
3. Currle et al. (2021) Towards a companion system for collision avoidance during robot-assisted needle placement. Current Directions in Biomedical Engineering 7
4. Kostrzewa et al. (2021) Robotic Assistance System for Cone-Beam Computed Tomography-Guided Percutaneous Needle Placement. CardioVascular and Interventional Radiology
5. Hemm et al. (2022) Mixed Reality User Interface for a Hybrid Operation Room. 2022 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR-Adjunct)
6. Bauer et al. (2022) Development of an Abdominal Phantom for the Validation of an Oligometastatic Disease Diagnosis Workflow. Medical Physics 49
7. Grüne et al. (2024) Robotic-assisted versus manual Uro Dyna-CT-guided puncture in an ex-vivo kidney phantom. Minimally Invasive Therapy & Allied Technologies, Vol. 3, 2024
8. Gölz et al. (2024) Intraoperative monitoring system for microwave ablations. Current Directions in Biomedical Engineering – Accepted for print